
Resumen

Título: Planificación, proyecto y construcción de túneles de gran longitud

Autor: López Fernández, Carlos

Tutor: López Pita, Andrés

Los túneles de gran longitud son cada día más comunes, pasando de ser grandes hitos de la ingeniería a una necesidad de la mayoría de las líneas de alta velocidad. Gran número de investigaciones en este joven sector del transporte ferroviario, y la experiencia en su servicio desde la inauguración de la línea Shinkansen en Japón el año 1964, seguida más tarde por Francia, Alemania, Bélgica, Suiza, Gran Bretaña, Italia y España; aconsejan la construcción de largos túneles para evitar los problemas y las exigencias causadas por la orografía. y cumplir los restrictivos parámetros requeridos para la circulación.

La circulación a velocidades de 200 a 300 km/h, y la planificación de futuras velocidades de 350 km/h, obliga a tener en cuenta restrictivos parámetros, como menores rampas, enormes radios de curva y la aparición de nuevos fenómenos, que eran de menor importancia a velocidades inferiores a 200 km/h, como la resistencia al avance y los cambios de presión dentro del túnel, o el vuelo de balasto, inesperado efecto que obligó a tomar medidas reparadoras en algunas líneas Japonesas. Estos factores aconsejan, por tanto, para atravesar las grandes cordilleras, la construcción de un único túnel base de gran longitud, con secciones superiores como mínimo a $95m^2$ y a baja cota, en vez de una consecución de terraplenes, viaductos y túneles de media altitud o de cota, más cortos y más elevados, que a corto plazo pueden parecer más económicos, pero que sin embargo a largo plazo tiene peores condiciones para el mantenimiento de la línea.

La construcción de un túnel es una de las empresas más complejas en el ámbito de la ingeniería, pese a multitud de estudios y sondeos previos, nunca se tiene la certeza de qué nueva dificultad encontraremos unos metros más allá. Es, por tanto, de interés estudiar las diferentes etapas que llevan a su consecución, partiendo desde la idea de la nueva línea, decidiendo qué puntos del territorio debe conectar y por dónde pasar, hasta llegar a su construcción, analizando los diferentes fenómenos que llevan a definir los parámetros que condicionan la forma de esta infraestructura y su diseño.

También se tratará de definir los métodos de excavación de túneles y el modo de llevarlos a cabo, así como la información topográfica, geológica y geotécnica necesaria durante el proceso constructivo.

Abstract

Title: Planning, design and construction of long length tunnels

Author: López Fernández, Carlos

Tutor: López Pita, Andrés

Long length tunnels are every day more and more common, they are becoming more a necessity of most high speed railways than a milestone in engineering history. A great deal of researches in the young railway transport sector, and also, the experience gained on the service of the Shinkansen Line, which was opened to the public in 1964, in Japan, and later followed by France, Germany, Switzerland, Great Britain, Italy and Spain, and after; recommend the construction of long tunnels in order to avoid problems and constraints which are caused by the orography, and to submit to the restrictive parameters which are required in this kind of lines.

High speed circulation reaches speeds from 200 km/h to 300 km/h, and in the future the trains are planned to achieve a top speed of 350 km/h, due to this fact we have to take into account restrictive parameters such as, less steeped ramps, huge radius of the benches, furthermore, the appearance of new phenomena, which were not noticeable at lower speed, below 200 km/h; such as, drive resistance and the sudden changes of pressure when going through the tunnel, or as the "schotterflug", which was utterly unexpected and made to the Japanese lines to take steps in order to fix up the railway situation. All these factors, let us see that the best option to cross through any mountain range is the long length tunnel, whose cross section has to be $95m^2$ and that it should be on a lower height. On the other hand, we would have to construct a string of viaducts, embankments and a bigger number of shorter higher tunnels, which in a short term may give the impression that is more economic, even though, the long-term maintenance has worse conditions on this sort of line.

The construction of tunnel is one of the most challenging and complex works in engineering, in spite of the fact that a great amount of geological and geotechnical studies are conducted previously, you never can be completely sure about what are you going to find in the next step. This is why, it is so interesting the study of the steps required to carry out the construction of the tunnel. From the mere idea, when the points to be connected by the line have to be chosen, to the construction, passing through the main points of the process, and analysing the phenomena that define the parameters which constrain the structure design its final shape.

We will also try to define the construction methods used and the way they should be conducted, as so the topographic, geological and geotechnic information required during the construction process.

Índice

I	Introducción y objetivos	1
II	Estado del Arte	3
1.	Alta velocidad y muy alta velocidad	3
2.	Líneas de Alta Velocidad	3
2.1.	Japón	4
2.1.1.	Línea Tokio -Osaka	4
2.1.2.	Línea Osaka - Fukuoka	6
2.1.3.	Túnel Seikan	7
2.2.	Europa	7
2.2.1.	Francia	7
2.2.2.	Alemania	9
2.2.3.	España	10
2.2.4.	Italia	11
2.3.	Túneles transalpinos	12
2.3.1.	Conexión Lyon- Turín	12
2.3.2.	Las nuevas líneas transalpinas suizas	13
2.3.2.1.	El eje del St. Gotthard	14
2.3.2.2.	El eje del Lötschberg – Simplon	15
2.3.3.	Túnel Canal de la Mancha	16
3.	Túnel convencional y de Alta Velocidad	16
3.1.	Tipos de túneles ferroviarios	18
III	Planificación y proyecto	19
4.	Definición del trazado	19
4.1.	Pre-estudios	19
4.2.	Estudio corredores	20
4.3.	Anteproyecto	21
5.	Proyecto	21
5.1.	Planificación	22
5.2.	Topografía	23
5.3.	Investigación	24
5.4.	Geología y geotecnia	24
5.4.1.	Tensiones in situ del macizo, recubrimiento y presiones sobre el túnel .	26

5.5.	Sondeos	27
5.5.1.	Métodos de perforación	28
5.5.2.	Sondeos para la consolidación de terrenos	28
5.5.2.1.	Aplicación en túneles	28
5.6.	Excavaciones exploratorias	29
6.	Diseño	29
6.1.	Parámetros geométricos de diseño en líneas de alta velocidad	29
6.2.	Trazado en planta	30
6.2.1.	Parámetros influyentes en el diseño del trazado en planta	30
6.2.1.1.	Radio mínimo de curva	30
6.2.1.2.	Peralte máximo, Insuficiencia de peralte y Exceso de peralte.	32
6.3.	Trazado en alzado	34
6.3.1.	Parámetros influyentes en el diseño del trazado en alzado	34
6.3.1.1.	Radio de los acuerdos verticales	34
6.3.1.2.	Rampa máxima y longitud de rampa	35
6.4.	Implicaciones técnicas de la circulación a alta velocidad	37
6.5.	Parámetros de diseño derivados del análisis de la dinámica vertical de una rama de alta velocidad	37
6.5.1.	Defectos de vía y rigidez vertical	37
6.6.	Vía sobre plataforma de balasto y plataforma de hormigón	39
6.6.1.	Vía de balasto	40
6.6.2.	Vía en placa	41
6.6.3.	El problema del vuelo del balasto (schotterflug):	43
6.6.4.	El problema de los asientos excesivos de terraplenes y pedraplenes	43
6.6.5.	Tendencias actuales en la plataforma ferroviaria	44
6.7.	Sección transversal	45
6.7.1.	Forma del túnel	45
6.7.2.	Parámetros de diseño derivados de fenómenos aerodinámicos en túneles	46
IV	Construcción	51
7.	Excavación mediante voladura de explosivos	51
7.1.	Sistema de avance	52
7.2.	Tipos de explosivos	54
7.3.	Detonadores	55
7.3.1.	Detonadores eléctricos:	56
7.3.2.	Detonadores no eléctricos:	56
7.3.3.	Conectores (para no eléctricos):	56

8. Excavación mecánica	57
8.1. Máquinas de ataque puntual	57
8.1.1. Rozadoras	58
8.1.2. Excavadoras con martillo hidráulico y fresadoras	59
8.2. Métodos tradicionales de construcción de túneles	60
8.2.1. Método Inglés:	60
8.2.2. Método Belga:	60
8.2.3. Método Alemán:	60
8.2.4. Método Italiano:	60
8.2.5. Método Austriaco:	60
8.2.6. EL NATM (New Austrian Tunnelling Method):	61
8.3. TBM	62
8.3.1. Tuneladoras para roca dura: Topos	64
8.3.2. Escudos	65
8.3.2.1. Tuneladoras para rocas blandas y suelos : Escudos	66
8.3.2.2. Escudos de frente cerrado	67
8.3.3. EPB (Earth Pressure Balance)	68
8.3.4. Doble escudo	69
8.3.5. Escudo mixto. Mixshield	70
9. Sostenimiento	71
9.1. Tipos de revestimiento	71
9.2. Dovelas de revestimiento	72
10. Esquema del proceso constructivo de túneles	73
V Seguridad	76
11. SEGURIDAD	76
11.1. Rutas de evacuación	76
11.1.1. Zonas seguras	76
11.1.2. El túnel paralelo	77
11.1.3. Galerías de conexión	77
11.2. Seguridad frente a incendios	77
11.3. Consideraciones exclusivamente respecto a los túneles	78
11.3.1. Equipos de seguridad de túneles:	80
11.3.2. Cómo afecta el fuego al hormigón estructural:	81
VI Conclusiones	83
Referencias	85

Índice de figuras

1.	Red de alta velocidad y gráfica de la evolución de la vía en balasto y placa en Japón. Fuente: [33]	5
2.	Situación del túnel Seikan en el estrecho de Tsugaru. Fuente: [V]	7
3.	Comparación del peso relativo de túneles, viaductos y terraplén en varias líneas de Alta Velocidad. Fuente: [47]	9
4.	Red de Alta Velocidad española en el año 2011.	11
5.	Corredores transalpinos. Fuente: [51]	12
6.	Línea Lyon-Turín.	13
7.	Corredores transalpinos suizos. Fuente: [M]	14
8.	Perfil longitudinal de la línea, con los túneles de base del Zimmerberg, el Gott-hard y Ceneri. Fuente: [50]	15
9.	Eje Berlín-Nápoles. Distinguimos la zona entre Innsbruck y Verona a través de los alpes. Fuente: [T]	16
10.	Clasificación de túneles respecto a la altitud. Fuente: [2]	18
11.	Ejemplos de Estudios de corredores sobre levantamientos topográficos.	21
12.	Componentes del Proyecto Básico y del Proyecto de Construcción. Fuente: [1]	22
13.	Túnel Pajares, boca norte Fuente: [31]	23
14.	Relación entre radio mínimo de curva en planta y velocidad. Fuente: [3]	32
15.	Radios curvas verticales normativa prRNV13803-1. Fuente: [2]	35
16.	Evolución de la velocidad de un tren de mercancías circulando a 120km/h en presencias de rampas. Fuente:[1]	36
17.	Secciones de vía sobre balasto.	41
18.	Secciones de vías en placa tipo RHEDA.	42
19.	Esquema de un trazado de Alta Velocidad con numerosos túneles de pico y de una alternativa con túnel base más largo y profundo. Fuente: [33]	44
20.	Variaciones de presión en el interior de un tren en la línea Tokaido. Fuente [2]	47
21.		48
22.	Relaciones coeficiente bloqueo, longitud túnel, resistencia al avance.	49
23.		50
24.	Sistemas de avance en la excavación de túneles y galerías. Fuente:[13]	53
25.	Banqueo vertical u horizontal en un túnel con avance en dos secciones. Fuente:[13]	53
26.	Esquema de voladura. Fuente:[13]	53
27.	Características de los explosivos y principales aplicaciones. Fuente: [49]	55
28.	Pega en sección de avance de un túnel. Fuente: [13]	56
29.	Características de los cortes tipo milling y ripping.	58
30.	Tipos de rozadoras en el mercado.	59
31.	Máquina excavadora con martillo hidráulico. Fuente[R]	59
32.	Secuencias de distintos métodos de excavación. Fuente:[44]	61
33.	Máquina excavadora creada por Beaumont. Fuente: [P]	63
34.	Detalle de un disco cortador. Fuente: [W]	63

35.	Tuneladoras tipo Topo. Fuente: [24]	64
36.	Esquema tuneladora tipo Topo. Fuente: [21]	65
37.	Escudo abierto Brunel empleado en el Túnel del Támesis. Fuente: [29]	66
38.	Tipos de escudo abierto.	67
39.	Hidroescudo. Fuente: [21]	68
40.	Esquema básico de un escudo de presión de tierras (EPB). Fuente: [21]	69
41.	Tuneladora de doble escudo. Fuente: [21]	70
42.	Esquema escudo mixto. Fuente: [21]	71
43.	Esquema y detalle de dovelas de hormigón armado.	73

Parte I

Introducción y objetivos

La construcción de un túnel es una de las empresas más complejas en el ámbito de la ingeniería, pese a multitud de estudios y sondeos previos, nunca se tiene la certeza de qué nueva dificultad encontraremos unos metros más allá. Aún así, el túnel es y ha sido una herramienta para salvar la barrera que representa la orografía, y permitir establecer nuevas vías comerciales, de viajeros, mercancías y antiguamente también de gran importancia para la estrategia militar. Napoleón I, ya consideró de gran importancia la construcción de vías a través de los Alpes Occidentales y Centrales, para resolver sus problemas logísticos de transporte de tropas, e impulsar a su vez impulsar el desarrollo comercial, desatado tras el Tratado de Utrecht, y la embrionaria industria de la época.

No obstante, ya desde tiempos remotos tenemos constancia de que nuestros antepasados excavaban túneles. El ejemplo más antiguo del primer túnel del que se tiene constancia gracias a los relatos de Diodoro de Sicilia, Herodoto y Estrabon, es el túnel de Babilonia, que mando construir Seminaris bajo el río Éufrates, para comunicar el Palacio y el Templo de Belos, en Babilonia, en el año 2200 a.C. [29]. Otro ejemplo de cómo el hombre ya se las ingeniaba en aquel entonces para minimizar los plazos de excavación, es el túnel de Ezequías en Jerusalén, calado sobre el año 700 a.C. En la excavación del túnel participaron dos equipos que avanzaron simultáneamente desde los dos extremos. El resultado fue un túnel de 450 m para cubrir una distancia de 300 m, ya que los equipos realizaron numerosos intentos fallidos en direcciones equivocadas.

Pero no es hasta el siglo XIX con la aparición del ferrocarril cuando la excavación de túneles alcanza su gran apogeo. El túnel de Terre-Noir en Francia, se podría considerar como el primer túnel ferroviario del mundo. Terminado en el año 1826 y con una longitud de 1.476 m, se trataba de un camino de carriles traccionado por caballos, que cubría la línea Roanne-Andrezieux. Ya en la segunda mitad del siglo XIX, se produce un extraordinario progreso en Europa con la construcción de los tres grandes túneles ferroviarios que permitirían atravesar los Alpes, realizando excavaciones que superaban los 10 km, cuando todavía los medios de los que se disponía por aquel entonces eran bastante rudimentarios. Los primeros en conseguir cruzar los Alpes fueron los ingenieros Sommelier, Grandis y Grattoni. Fue con el túnel de Mont Cenis, que con una longitud de 13,7 km, conectaron Francia (por Modane) con Italia (por Bardonecchia). Su construcción prevista para 25 años, se completó en sólo 14, entre los años 1857 y 1871, gracias a las innovaciones técnicas empleadas por el ingeniero francés Germain Sommeillier, desarrollando la primera taladradora de roca, usando la energía hidráulica mediante motores que funcionaban con aire comprimido y llegando incluso a utilizar al final del proyecto la recién inventada dinamita. Años más tarde, en 1882, se abrió el túnel ferroviario de Saint Gothard con casi 15 km de longitud en Suiza, tratándose de un solo tubo con dos vías. Construido por el ingeniero suizo Luis Favre en tan solo ocho años. La excavación comenzó por ambas bocas en el año 1872 y terminó en 1.880. El tercer túnel ferroviario que completó la triada en la lucha por perforar los Alpes, fue el túnel de Simplon I, entre Suiza e Italia, abierto en el año 1906 y con una longitud de 19,8 km. Gracias a estos túneles se cambió la manera de ver el mundo, haciéndolo más pequeño y dándole al sector ferroviario un aura de ensueño. Fue a través del Simplón que se consiguió unir París con Budapest con la mítica línea Simplon Orient Express, la cual incluso llegaba hasta Estambul, antigua Constantinopla.

Sin embargo, durante el siglo XX el desarrollo del versátil e independiente automóvil o los veloces aeroplanos, los que como hizo antes el ferrocarril, cambiaron el concepto de distancia en el mundo. Arrinconaron al ferrocarril, no dejándole otra opción que crecer o desaparecer.

Fue así, que dando solución a su falta de competitividad se desarrolló a mediados del siglo XX la Alta Velocidad, permitiendo recuperar su sitio al viejo ferrocarril. En 1964 Japón inauguró la primera línea comercial de alta velocidad, permitiendo viajar a 210 km/h, y abriendo las puertas del nuevo ferrocarril a Europa, que no tardó en construir nuevas líneas.

Con la Alta Velocidad llegaron también nuevos parámetros y condiciones a tener en cuenta por los Ingenieros de Caminos, tanto en las líneas como en la construcción de túneles, mucho más necesarios éstos para el nuevo ferrocarril.

El objetivo de esta tesina es analizar las necesidades que surgieron con la Alta Velocidad y las nuevas dificultades que deben superarse, las dificultades orográficas y las exigencias geométricas, que conducen a la construcción de túneles de gran longitud. Prestaremos atención a los aspectos que caracterizan la planificación, el proyecto y la construcción de estos túneles.

Los túneles son obras que no pueden tener un proyecto tipo, sino que cada uno de ellos es un caso particular que debe estudiarse separadamente. La implantación en el terreno, características geométricas de alzado y perfil, la sección transversal y los métodos de construcción están estrechamente ligados a la geología, tipos de terreno, volumen de tráfico, zona rural o urbana, etc. Es por ello, que los métodos de estudio previos son de gran importancia en su diseño durante la planificación y proyecto, así como durante su construcción.

Para acabar este apartado introductorio, me gustaría remarcar que el túnel se trata de la obra civil que mejor preserva el valor del paisaje, debido a que reduce los volúmenes de movimiento de tierra, evita la contaminación del nivel freático, limita el ruido producido en su interior y reduce los terrenos a expropiar. En definitiva, se trata de la obra de menor impacto ambiental. Ambos conceptos: “Comunicación” y “Medio Ambiente”, hacen del túnel un elemento imprescindible en la actualidad.

Parte II

Estado del Arte

La construcción de líneas de alta velocidad es una de las actividades que caracteriza en la actualidad, a la mayor parte de los países más avanzados. Las dificultades orográficas que deben superarse, por un lado, y las exigencias geométricas de este tipo de líneas, conduce, en ocasiones a la construcción de túneles de gran longitud. En este contexto la presente tesina pretende profundizar en los aspectos que caracterizan la planificación, el proyecto y la construcción de este tipo de túneles.

1. Alta velocidad y muy alta velocidad

En cuanto a la diferencia entre el concepto de Alta Velocidad y Muy Alta Velocidad, la realidad es que no existe un acuerdo acerca de la implicación de dichos términos y cuál es el límite diferenciador entre una y otra.

Se acepta generalmente, que el nacimiento de la alta velocidad tuvo lugar con la puesta en funcionamiento de la nueva línea Tokio - Shin-Osaka, el primero de Octubre de 1964, al alcanzarse en ella, por primera vez en servicios comerciales de carácter regular, los 210 km/h de velocidad punta, superando de largo las velocidades convencionales de la época, cercana a los 85 km/h.

Sin embargo, unos años más tarde en septiembre de 1981, en la línea París - Lyon se establece un nuevo hito alcanzando inicialmente los 260 km/h de la velocidad máxima, y poco tiempo después los 270 km/h.

Aún así en 1981 el entonces Secretario General de la UIC, Jean Bouley, designa por alta velocidad a toda circulación con velocidad superior, a la velocidad máxima que es posible practicar en una línea convencional; es decir, los 200 km/h de velocidad punta. (Referencia libro Pita Alta velocida en el ferrocarril)

Con lo que aceptando esta premisa, estableceremos como alta velocidad el rango entre los 200 y los 300 km/h, y el término “muy alta velocidad” quedará asignado a las circulaciones que sobrepasen los 300 km/h.

2. Líneas de Alta Velocidad

El gran hito que supuso la construcción de la primera línea de Alta Velocidad en Japón en 1964, dio inicio a una era completamente nueva del transporte por ferrocarril, impulsando la creación de líneas de alta velocidad en otros países e inyectando esperanzas a una industria que empezaba a declinar. Haciendo así, de la segunda mitad del siglo XX hasta la actualidad una época de resurgimiento del medio ferroviario, permitiendo, por fin, competir con el automóvil y el transporte aéreo. Después del desarrollo de las líneas japonesas, un gran número de países iniciaron el desarrollo de la alta velocidad, empezando por Francia y siguiendo Alemania, Italia, Gran Bretaña, Bélgica, Suiza y España; a los que se han añadido recientemente países emergentes como Corea, Taiwán y China.

2.1. Japón

El principal inconveniente al que tiene que enfrentarse la Alta Velocidad japonesa es la orografía. La topografía por la que tienen que transcurrir sus líneas de alta velocidad es francamente adversa. Japón es un país muy compacto con escasamente 200 km de ancho y formando el conjunto de sus islas una cadena montañosa, por lo que sólo existe una cuarta parte del territorio llano, concentrado en la zona próxima a la costa. En estas zonas es donde se agrupa la mayor parte de su población, pero para conectar estas regiones hay que atravesar una larga sucesión de cadenas montañosas (las Hida, las Kiso y las Akaishi), que dividen el archipiélago en dos mitades, una del lado del Océano Pacífico y la otra del lado del Mar del Japón. El único modo de salvar estas barreras ha sido construir gran cantidad de túneles y viaductos. A continuación analizaremos alguna de las líneas del trazado de alta velocidad japonés.

2.1.1. Línea Tokio -Osaka

La vieja línea entre las dos principales ciudades del territorio nipón, Tokio (6,7 millones de habitantes) y Osaka (3,8 millones), se efectuaban por una línea de ancho métrico, a lo largo de más de 550 km, equipada con doble vía en los 4/5 de su longitud y con cuatro vías en el resto de su recorrido. En algunos tramos de ésta, el tráfico soportado era de 120 a 200 trenes por día, soportando tanto tráfico de viajeros, como de mercancías.

A mediados de los años 50 del siglo XX, es razonable por tanto, afirmar que en perspectiva de que el tráfico por ferrocarril siguiera creciendo la mencionada línea se acercaba a su límite de capacidad. La búsqueda de la solución pasaba por la construcción de una nueva línea.

Para resolver los problemas de falta de capacidad en el sistema ferroviario japonés se presentaron varias soluciones o alternativas.

1. Construcción de una nueva línea de ancho métrico no paralela. (Hubiese aumentado la velocidad de circulación).
2. Construcción de una nueva línea paralela a la existente entre Tokio y Osaka de ancho métrico. (Hubiese aumentado la capacidad existente y la flexibilidad de explotación).
3. Realización de una nueva línea de ancho internacional apta para circulaciones a alta velocidad. [Referencia libro Pita Alta velocidad en el ferrocarril]

La tercera opción era la más arriesgada, no había precedentes. Antes de la construcción del Shinkansen sólo un tren experimental había alcanzado los 210 km/h entre Marienfelde y Zossen, en Alemania. Los problemas que se encontrarían para llevar a cabo su funcionamiento comercial eran todavía una incógnita.

La construcción de la obra requería una gran inversión por sus mayores requerimientos de parámetros geométricos (radio mínimo de las curvas en planta 2500 metros, rampas, etc.), lo que obligaba por la orografía a realizar grandes tramos en túnel y viaducto. La financiación de la línea no estaba garantizada, se tuvo que financiar mediante crédito del BM. El coste de construcción se estimó inicialmente en 200.000 millones de yenes, de los cuales 80 millones de dólares provenían del préstamo del Banco Mundial. Los costes, como suele ser habitual hoy en día, aumentaron a medida que se llevaba a cabo la construcción, por lo que la inversión total fue de 380.000 millones de yenes, casi el doble de lo estimado inicialmente. Con el riesgo añadido de que si el proyecto no funcionara, el ancho internacional no permitiría conectar la línea al sistema ferroviario existente. Finalmente, como se pudo ver fue todo un éxito y el préstamo del Banco Mundial pudo ser devuelto íntegramente en 1982, 18 años después de la puesta en marcha del Shinkansen.

Para construir la línea Tokaido se estableció un plazo de ejecución de la obra muy ajustado. Tenían que realizarse los 515 km del recorrido en 5 años para que su inauguración coincidiera con los Juegos Olímpicos de Tokio de 1964. Por ello se ajustó el trazado al máximo a la antigua línea Tokaido de ferrocarril convencional que ya existía por aquel entonces.

Este trazado discurría muy próximo al litoral evitando así las cordilleras montañosas entre Tokio y Osaka. Se limitaba así la construcción de túneles, viaductos o puentes que ralentizarían el proceso. Esta decisión provocó una importante limitación en los parámetros del trazado. Así pues, el trazado entre Tokio y Shin-Osaka tiene 49 túneles entre Tokio y Nagoya, y otros 31 entre Nagoya y Osaka. Del total de estos 80 túneles la mayoría son cortos, salvo 18 que tienen más de 1 km de longitud y el de Tanna, de 7,9 km. Este último, entre Mishima y Atami, ya se había empezado a construir en 1942 como parte del proyecto del danghan ressha, [38] pero la obra había sido abandonada por falta de fondos en la posguerra. Al final resultó un trazado de 515 km, con 89 km bajo túnel y 174 sobre puente o viaducto.

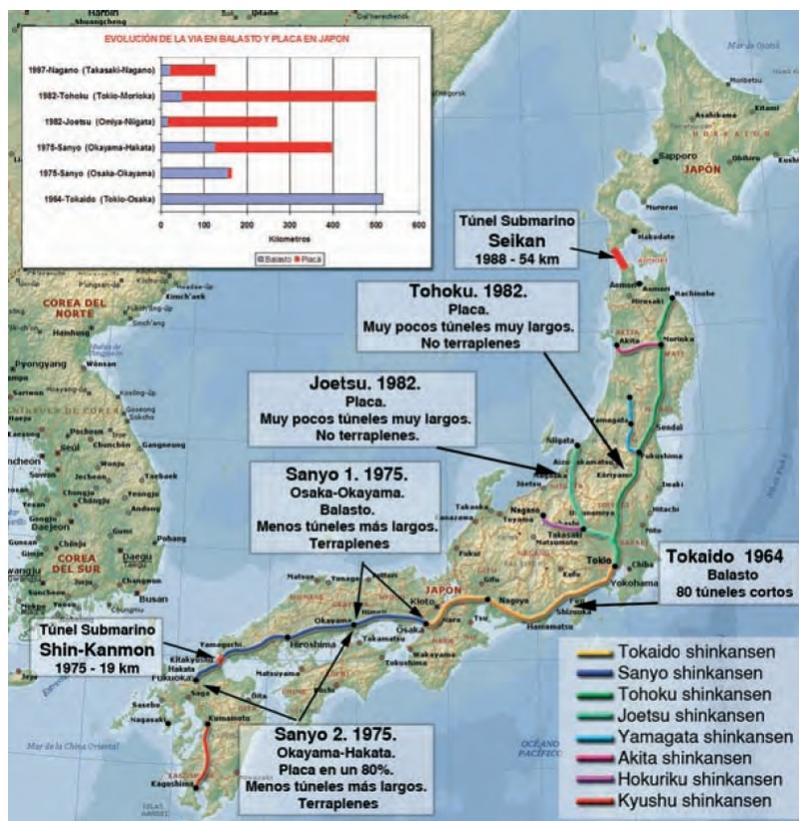


Figura 1: Red de alta velocidad y gráfica de la evolución de la vía en balasto y placa en Japón. Fuente: [33]

En la *figura 1*, sobre estas líneas y observamos las líneas de alta velocidad japonesas y el año de puesta en circulación, podemos ver como las líneas circulan por el litoral de la isla, evitando las principales dificultades orográficas, excepto la línea Joetsu que es la de mayor proporción de línea en túnel, y en consecuencia una de las que tiene mayor proporción de

kilómetros en vía sobre placa de hormigón, que como veremos más adelante será la tendencia en la mayoría de líneas europeas.

La línea Tokaido se diseñó para una velocidad de 220 km/h, con lo que tenía que trabajar con radios generosos que permitieran circular en curva de forma segura y confortable para los viajeros. Por ello se tomó como valor mínimo radios de 2500 m. Las pendientes máximas se limitaron a 1,5 % en casi todo el trazado, exceptuando tramos cortos de menos de 1 km que requirieran pendientes de hasta un 2 % por razones meramente constructivas. Si comparamos este valor con los recomendados por el profesor López Pita, observamos que con este valor podríamos alcanzar una velocidad de hasta 230 km/h. (Grafico curvas velocidad)

Finalmente podemos asegurar que la línea Tokaido fue un acierto, nuevas líneas fueron construidas hasta alcanzar la cifra de longitud total de 2176 km. En construcción se encuentran 634 km y en fase de planificación 533 km. En cuanto al número de pasajeros aproximadamente transporta un número de 336 millones de pasajeros por año (2007), una media de 820.000 por día.

El éxito de la línea Shinkansen llevó a un entusiasmo y orgullo que provocó un afán por construir más líneas en el país conocido como “Shinkansen fever” (Fiebre Shinkansen). Este ímpetu se vio culminado con la Ley Nacional de Desarrollo del Shinkansen (“Zenxoku Shinkansen Tetsudō Seibi Hō”). Ésta proponía una red de 7.000 km, que debería ser finalizada en 1985. Sin duda se trataba de un plan increíblemente ambicioso, que tuvo que ser replanteado y recortado debido a diferentes crisis económicas en el país. En ese momento en Japón existían 515 km en servicio y sólo se había comenzado con la extensión de la línea desde Osaka hasta Okayama.

2.1.2. Línea Osaka - Fukuoka

La primera línea en construirse después de la experiencia de Tokaido fue la Sanyō Shinkansen, entre Osaka y Fukuoka se ejecutó en dos tramos: primero entre Osaka y Okayama (inaugurado en 1972), y a continuación entre Okayama y Fukuoka (1975). Esta línea era una especie de extensión de la Tokaido Line, uniendo así Tokio con todo el litoral del sur de Honshū y que debía unir Osaka con el extremo septentrional de la isla de Kyūshū. Al construirse tras la Tokaido Line permitía corregir errores y seguir innovando. Así, por ejemplo, el radio mínimo se agrandó para conseguir mayores velocidades.

En este corredor ya era más complicado evitar túneles y viaductos. El motivo fue que esta línea se proyectó para 260 km/h por lo que el trazado era más rígido, siendo más complicado adaptarse a la topografía existente. Con la Tokaido Line se vio que para conseguir una mayor velocidad comercial se necesitan radios mayores. Por lo tanto para alcanzar velocidades de diseño de 260 km/h se tuvo que aumentar el radio mínimo hasta los 4000 m. Este es el valor en aproximadamente toda la Sanyo Line. Los resultados son claros: para una longitud similar a la del Tokaido Shinkansen, tenemos más del triple de kilómetros en túnel (281 km).

Este dato da una idea de la accidentada geometría del corredor. Hay que destacar también el incremento de las longitudes de los túneles. De los 129 túneles entre Osaka y Hakata, 40 son de más de 2 km de longitud. Con el túnel de Shin- Kanmon (18,7 km), se unían por primera vez las islas de Honshū y Kyūshū por ferrocarril. Los terraplenes, tan abundantes en la línea Tokaido perdían peso, dejando paso a túneles y viaductos, tendencia que aún hoy va aumentando progresivamente.

En este mismo periodo expansivo, también se inició la construcción de dos líneas más: Tōhoku y Joetsu Shinkansen en el norte de Honshū. La tendencia de eliminación de terraplenes se vio ratificada con su construcción. Se trata de una zona muy accidentada, que requiere múltiples túneles. Las líneas preexistentes circulaban de forma sinuosa por las zonas montañosas. Con

la construcción del túnel de Iwate – Hachinohe, por ejemplo, se consiguió reducir el tiempo de viaje entre Tokio y Hachinohe en 44 minutos. [53] Con las condiciones más restrictivas de trazado y gracias a las innovaciones tecnológicas, empezó una clara tendencia a evitar los túneles de cota, como los existentes en la línea Tokaido, para centrarse en los túneles de base, de mayor longitud y que se adaptan mejor a los elevados radios que exige la alta velocidad. Entre estas dos líneas se construyeron 8 túneles de más de 10 km, 3 de ellos de más de 20 (Hakoda, Iwate- Ichinohe y Dai-Shimizu).

2.1.3. Túnel Seikan

El túnel de Seikan situado en el estrecho de Tsugaru, merece una atención especial. En 1954 un tifón provocó el hundimiento de cinco ferries causando más de 1.000 muertos. El gobierno se vio obligado a buscar una manera más segura de cruzar este peligroso estrecho, entre las islas de Honshû y Hokkaido (*figura 2*). Inicialmente se planteó unir Honshu y Hokkaido por una sucesión de puentes, pero la tecnología del momento y las condiciones climáticas imprevisibles desaconsejaron esta opción. Se optó finalmente por un túnel que empezaría a construirse 10 años más tarde. Sin tuneladora, la obra se prolongó hasta 1989, convirtiéndose en el túnel ferroviario más largo del mundo con 53,85 km de longitud, con 24,5 km bajo el estrecho de Tsugaru. Se diseñó para poder albergar trenes Shinkansen en sección única de $74 m^2$, pero la gran inversión requerida para extender la red Shinkansen hasta Hokkaido frenó la llegada del tren bala hasta la isla. Actualmente circulan trenes de ancho métrico por el túnel, pero, se están llevando a cabo obras para adaptar la vía y los equipos a los trenes Shinkansen para que puedan circular por esta línea en un futuro próximo.



Figura 2: Situación del túnel Seikan en el estrecho de Tsugaru. Fuente: [V]

2.2. Europa

2.2.1. Francia

En el plano europeo, la era de la alta velocidad se desarrolla a partir de septiembre de 1981, con la apertura de la nueva línea París - Lyon, en donde se alcanzan inicialmente los 260 km/h de la velocidad máxima y, poco tiempo después, los 270km/h.

Francia antes de llevar a cabo su aventura en la alta velocidad, a diferencia de los japoneses, disponía de una considerable experiencia. La SNCF (Société Nationale des Chemins de Fer Français), en el período entre 1960 – 1967, realizó más de 240 circulaciones experimentales con velocidades punta entre 200 y 250km/h; e incluso un mayor número de pruebas entre 1967-1978 a velocidades iguales o superiores a 300km/h.

Francia estableció el precedente dentro de la UE, impulsando que la Comisión Europea dispusiera en 1986 la intención de establecer una red europea de alta velocidad, un año más tarde el Parlamento Europeo adoptó una resolución en el mismo sentido, de modo que a comienzos de los 90, la propia Comunidad Europea presentó el Esquema Director de la red europea con horizonte en el 2010.

Línea París- Lyon El ferrocarril siempre ha tenido el empeño y la voluntad de reducir los tiempos de viaje en los servicios interurbanos de viajeros para los trayectos de larga y media distancia. Sin embargo, pese a su éxito, perdían cuota de mercado respecto de las carreteras y el avión. En paralelo a esta situación, la capacidad de transporte de la línea París-Lyon se iba agotando. El tramo entre St. Florentin y Dijon, se alcanzaban circulaciones del orden de 250 trenes / día. Magnitud situada en el límite superior del número de trenes de viajeros y mercancías que una línea puede soportar una línea convencional equipada con los más modernos sistemas de señalización.

Para dar respuesta a esta falta de capacidad se barajaron dos opciones:

1. Cuadruplicar la línea en la sección St. Florentin – Dijon. (Hubiera mejorado la capacidad de la línea y su flexibilidad de operación).
2. Construir una nueva línea adaptada a circulaciones a alta velocidad.

La segunda opción era la que mejoraba mejor la oferta de los ferrocarriles franceses para ser más competitivos con los otros modos de transporte, que iban comiéndole terreno día a día. Construyendo la nueva línea con servicios de Alta velocidad, lograron recuperar más de un 25 % de la cuota de mercado que le habían ganado el avión y el automóvil al ferrocarril, durante los años 60.

Desde 1969, año en que la SNCF envió al gobierno francés el proyecto de la nueva línea París-Lyon en el corredor París Sudeste, hasta el inicio de las obras en 1976, hubo gran cantidad de opositores a la nueva línea, entre ellos, como era de esperar, una compañía aérea francesa. Finalmente, la Delegación de Planificación territorial (DATAR) vio la necesidad estratégica de la línea y las claras ventajas energéticas del medio ferroviario, en el contexto de la crisis del petróleo (1973-74). La mayor parte de los vuelos intraeuropeos se dan en distancias cortas cerca de los 600 km, donde el tren de alta velocidad tiene un mayor atractivo. Además los últimos estudios del UIC (2008) indican que los costes asociados externos (ruido, polución, cambio climático, etc.) al modo de transporte aéreo y ferroviario son de 22,9 millones/1000viaj. – km para el ferrocarril, frente los 52,5 millones/1000viaj – km del avión. [1]

La construcción de la nueva línea fue un acierto, todas las poblaciones afectadas por ésta entre París y Lyon se vieron beneficiadas, en conjunto a más de 30 millones de habitantes. Esto se puede ver en la gran cantidad de pasajeros que tuvo, llegando a duplicar su número en sólo 10 años (1980 – 1990) y en el aumento de los kilómetros de línea que pasó de 419 km en 1983 a 1872km en el 2009,

En cuanto al diseño de la línea cabe destacar que con el propósito de evitar la construcción de túneles se diseñó con pendientes máximas de hasta el 35 %. Ésto fue posible gracias a que el relieve que predomina en Francia es llano. Más de dos tercios de su territorio no alcanzan los 250 m de altura, sobretodo en el oeste, en el llamado corredor Atlántico. Con la adopción de esta magnitud de rampa máxima en lugar del 15%, como en el ferrocarril japonés, el estado francés consiguió una reducción cercana al 30 % en los costes de construcción de la línea. En la *figura 3*, bajo estas líneas, podemos ver la relación entre el porcentaje de túneles, viaductos y terraplén de las principales líneas de los últimos 50 años del siglo XX, donde se aprecia la inexistencia de viaductos y apenas túneles en las líneas francesas, lo que contrasta con la

necesidad de estas soluciones en el país nipón. El resto de parámetros geométricos de diseño, fueron adoptados según la experiencia en la línea Tokaido, excepto el radio mínimo de curva adoptado, entre 3250 y 4000 m. Éste fue mayor ya que se buscó conseguir velocidades punta mayores, de hasta 270 km/h.

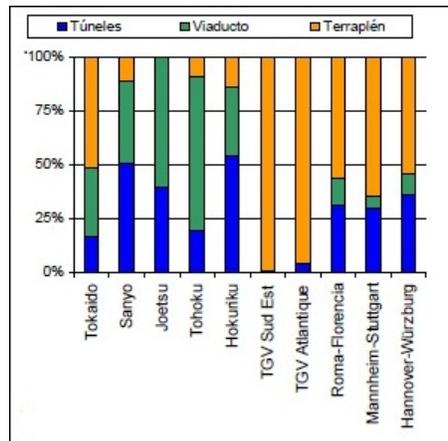


Figura 3: Comparación del peso relativo de túneles, viaductos y terraplén en varias líneas de Alta Velocidad. Fuente: [47]

Las últimas líneas abiertas a la explotación comercial en territorio francés, concretamente el TGV-Mediterráneo (2001) y el TGV-Este (2007), fueron proyectadas con radios mínimos de curva de 7000m, para permitir velocidades punta superiores a 300km/h.

Pero también existen importantes formaciones montañosas como los Pirineos en el sur haciendo frontera con España y los Alpes en el noreste haciendo frontera con Italia y Suiza. En estas dos formaciones montañosas Francia, en colaboración con otros países como España e Italia, ha construido importantes túneles como es el caso de Le Perthus en Pirineo Oriental (Figueres-Perpignan finalizado en 2009) que da continuidad al corredor del Mediterráneo y que tiene una longitud de 8,200m de los cuáles 7.400 son franceses y 800 españoles. El ya comentado Lyon-Turín, actualmente en construcción, formará parte del corredor transalpino que unirá Francia con Italia. Una de las líneas ferroviarias con más kilómetros en túnel es la continuación a Marsella, la línea TGV Mediterranee, de 250km, que se abrió el 7 de junio de 2001. Esta línea tiene 9 viaductos grandes, 16 corrientes y 8 túneles o falsos túneles, de los cuáles los más importantes son el de la Galaure (2,686m), Tartaignuille (2,340m) y el túnel y falso túnel de Marsella (7,834m, el más largo de la red francesa tras La Mancha) túneles de 100m de sección libre y 4,8m de entrevía para 300km/h y 63 m2 libres para 230km/h. Una fecha señalada para la alta velocidad fue el 17 de octubre del 2000 cuando circuló en fase de pruebas un TGV a 350km/h por el túnel de Tartaignuille.

2.2.2. Alemania

El avance de la red ferroviaria de alta velocidad Alemana comenzó en abril de 1991 y 1992 con los tramos de nuevas vías Hannover-Würzburg (327km, 60 túneles con 121,6km de longitud donde el túnel más importante es el Landrucken tunnel de 10,8km) y Mannheim-Stuttgart (92km), donde los trenes están autorizados para circular a 280km/h. Con ellos quedaban unidos por la alta velocidad Hamburgo, Hannover, Fulda, Frankfurt, Mannheim, Stuttgart y Munich. En 2002 se abrió la línea Colonia-Frankfurt, esta línea de Alta Velocidad fue la

primera en Alemania en tráfico exclusivo de pasajeros con los ICE-3, diferenciándose de las otras líneas alemanas que son de tráfico mixto. Esta línea tiene 30 túneles (6 falsos túneles y 23 de 150 m^2 de sección excavada de 13 m de altura y 12-15 m de ancho; 95 m^2 libres construidos con el NATM pero con pequeñas superficies de frente abierto, cuatro secciones, (método patentado por la empresa austriaca ILF como vier-stollen), con un total de 47 km en túnel de los que el mayor es el Schulwald de $4,5\text{ km}$ de longitud y 165 m^2 de sección.

2.2.3. España

España ha sido el último miembro de la unión europea en subirse al tren de la Alta Velocidad, y quizá por ello con un excesivo entusiasmo.

Los condicionantes orográficos de la geografía española han colocado, históricamente, al ferrocarril español al frente de las redes europeas con mayores dificultades de trazado, tanto en planta como en alzado. Más de un 30 % de sus líneas tienen pendiente superior al 1 % y alrededor de un 15 % tienen radios mínimos de curva menores a 500 m , con lo que la velocidad máxima de éstas líneas se sitúa próximo a 100 km/h .

También sabemos que para rampas con inclinación en torno al 10‰, se acepta, generalmente, que por encima del mismo se dificulta sensiblemente la carga remolcable de un tren, por lo tanto ambas variables, radio mínimo y rampas superior al 10‰, se usan como indicadores de las posibilidades comerciales de la línea.

Teniendo en cuenta, lo recientemente expuesto es lógico que las velocidades comerciales más rápidas del ferrocarril español al finalizar la década de los años 70 del siglo XX estuvieran situadas en torno a $75 - 95\text{ km/h}$ y sólo el 15 % de su longitud dispusiera de vía doble. En la segunda mitad de los años 70 empezó la preocupación por la necesidad de mejorar el sistema ferroviario, queda de manifiesto en el “Plan General de Ferrocarriles” de 1981, que exponía la falta de inversión que había tenido el sector y su necesidad de mejoras. Este plan preveía a 12 años vista alcanzar mayor frecuencia, confort y calidad de servicio; y velocidades comerciales de 110 km/h . El plan quedó en papel mojado, pero en 1987 se preparó el “Plan de Transporte Ferroviario”, que preveía nuevos accesos al sur (variante Brazatortas- Córdoba) y norte -noroeste (variante de Guadarrama) de España, para velocidades de $200 - 250\text{ km/h}$.

Línea Madrid-Sevilla En el año 1992 se inauguró la línea Madrid – Sevilla, haciendo coincidir el acontecimiento con la Expo '92 (celebrada en Sevilla), como muestra al mundo del poderío y resurgir de la economía española dentro del marco de la Unión Europea (inscrita en ella desde 1986). La línea fue un éxito, ya a partir de su primer año de explotación completa adquirió una cuota del 80 % del mercado y la ha seguido manteniendo.

Línea Madrid – Barcelona La conexión Madrid – Zaragoza – Barcelona se realizó en dos tramos, primero llegó hasta Zaragoza en el 2003 y finalmente a Barcelona en el 2008, después de grandes retrasos y a pesar de que una gran parte del sector profesional defendía la realización de este enlace ya a mediados de los años 80. Los opositores, sin embargo, argumentaban que el ferrocarril directo de Madrid a Barcelona a alta velocidad no era rentable, ni viable técnicamente, que su construcción en ancho internacional rompería la homogeneidad de la red ferroviaria nacional. Actualmente es la línea de alta velocidad más rentable de todo el territorio español. El enlace de la línea con las líneas francesas en Perpignan desde Barcelona, programada para el año 2012, actualmente se encuentra totalmente paralizado a causa de la crisis económica de 2008.

En la *figura 4*, a continuación tenemos un mapa con las líneas de alta velocidad existentes por el momento en España.



Figura 4: Red de Alta Velocidad española en el año 2011.

2.2.4. Italia

Al igual que el resto de países que adoptaron el sistema ferroviario de alta velocidad, Italia necesitaba mejorar la calidad de la oferta por ferrocarril a mediana y larga distancia. El tráfico por carretera le había ido ganando terreno desde la década de los años 50, hasta el punto que en los años 70 la cuota de mercado del tren era tan sólo del 18%. Las velocidades máximas en el 57% del recorrido de la línea Roma – Florencia eran de 90 – 105km/h, debido a los pequeños radios de sus curvas y la falta de capacidad de la línea obligaba a buscar una solución.

La FS (Ferrovie dello Stato), optó por la opción de desdoblarse la mayoría de las líneas, mejorando su capacidad y la velocidad del servicio; y limitó únicamente a la sección Bolonia-Milán y a la nueva línea entre Roma y Florencia, la construcción de nuevas líneas aptas para alta velocidad. Líneas aptas para velocidades de 250km/h y con radio mínimo en curva de 3000m, mucho menor que las líneas construidas en ese momento en el resto de Europa y Japón (década de los años 80). A partir de 1986, se llevaron a cabo estudios que concluían que era necesario construir cerca de 1200km de nuevas líneas, con el objetivo de formar un sistema de alta velocidad en T con las líneas entre Milán y Nápoles; y las líneas transversales entre Turín y Venecia.

Como país montañoso que es, Italia siempre ha requerido la construcción de gran número de túneles en sus trazados. El tramo más espectacular es el cruce de los Apeninos de la línea de alta velocidad Florencia-Bolonia, de 78,5km de los cuáles 73,3 son túneles (Vaglia de 18,4km, Firenzuola de 14,3km, Raticosa de 10,4km y Pianoro de 10,3km, entre otros, son algunos de los más destacados). Este tramo se encuentra abierto desde el 13 de diciembre de 2009. Todos los túneles se construyeron por el método ADECO-RS, del profesor Lunardi, que consiste básicamente en un NATM a plena sección con la estabilización del frente por medio de bulones de fibra de vidrio inyectados y que ha llevado a unos avances mensuales muy bajos, similares a los de los túneles alpinos del siglo XIX. [52]

2.3. Túneles transalpinos

El problema que hay en Suiza y en general en todos los países colindantes con los Alpes, es que hasta ahora se habían estado aprovechando los antiguos túneles y pasos montañosos ferroviarios y carreteros para el transporte de mercancías y viajeros, pero la gran cantidad de tráfico existente ha colapsado todas estas infraestructuras, aumentando significativamente el riesgo de accidentes, principalmente en los túneles carreteros (Túnel: Mont Blanc 39 muertos, Tauern 12 muertos, Gothard 12 muertos, Frejús 2 muertos). El paso del tráfico ferroviario internacional en los Alpes suizos se realiza mediante dos pasajes, el túnel de Saint-Gothard y el de Lötschberg-Simplon. En cuanto al transporte por carretera, los principales puntos de paso son el túnel San Bernardino y sobre todo el de Saint-Gothard. El paso del tráfico ferroviario en los Alpes franceses únicamente se puede realizar por dos sitios, el costero Vintimille y por los túneles Mont-Cenis y Frejus de la línea Maurienne. Con relación a los puntos de paso por carretera, el tráfico se concentra en tres grandes itinerarios: al sur el pasaje costero por Vintimille y al norte el túnel de Mont-Blanc y el de Frejús.

Más de un tercio del tráfico que se dirige o proviene de Italia, circula a través de los cuatro pasos alpinos austriacos (Brenner, Tauern, Schober y Semmering), en especial a través del Brenner, que constituye el eje norte-sur mayormente utilizado por el transporte de mercancías de largo recorrido sobre el arco alpino (ver figura 5).



Figura 5: Corredores transalpinos. Fuente: [51]

Para hacer frente a este problema y buscar soluciones se formó AlpTransit, también conocido como New Railway Link through the Alps NRLA (Nuevo Enlace Ferroviario a través de los Alpes), se trata de un proyecto federal suizo para construir un enlace ferroviario rápido de norte a sur a través de los Alpes suizos mediante la construcción de “túneles de base” a niveles de cota muy inferiores a los de los actuales túneles. Otros países como Austria y Francia también colaboran en el proyecto con la construcción de nuevos túneles de base.

2.3.1. Conexión Lyon- Turín

La idea de construir una nueva conexión ferroviaria transalpina entre Francia e Italia surgió a principios de los años 1990, y en 1994 el proyecto Lyon-Turín fue escogido entre los 14 proyectos prioritarios establecidos por el Consejo Europeo de Essen, formando parte del denominado corredor de Alta Velocidad/Transporte Combinado Francia-Italia, que se extiende de Lyon a Trieste, junto a la frontera eslovena

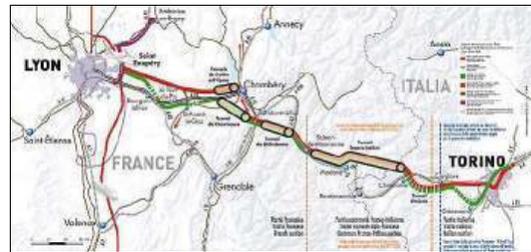
La nueva relación ferroviaria permitirá conectar las redes de alta velocidad francesas e italianas, situando Lyon a menos de 1 hora y 45 minutos de Turín y París a poco más de 4 horas de Milán. Esta conexión no seguirá un trazado único y directo, sino que estará compuesta por diversas infraestructuras, algunas de ellas mixtas y otras específicas para cada uno de los tráficos que serán puestas en servicio progresivamente. Como puede observarse en la *figura 6.b.*, el proyecto puede dividirse en dos secciones principales:

- Una sección entre Lyon y el Surco Alpino, a la altura de Montmelian, constituida por dos itinerarios paralelos, uno destinado al tráfico de mercancías y el otro al de viajeros.
- Una sección mixta entre el Surco Alpino y Bruzolo, que incluye la construcción de un túnel de base internacional de 53,1 km de longitud entre Saint-Jan-de-Maurienne y Venaus.

El proyecto se completará además con la construcción de una circunvalación ferroviaria en la ciudad de Turín que será utilizada exclusivamente por el tráfico de mercancías. Observamos en la *figura 6.a.* la diferencia de cota entre el viejo túnel de cota de la línea convencional y el nuevo túnel de base.



(a) Sección longitudinal del nuevo túnel base Lyon-Turín. Fuente: [51]



(b) Nueva conexión Lyon-Turín. Fuente: [51]

Figura 6: Línea Lyon-Turín.

2.3.2. Las nuevas líneas transalpinas suizas

Por su posición central en Europa, los ejes norte-sur suizos constituyen uno de los principales corredores de tráfico internacional en Europa, especialmente de tráfico de mercancías conectando los países del norte con Italia y el sureste del continente. El aumento espectacular del tráfico por carretera experimentado en los países alpinos en las últimas décadas ha provocado la puesta en marcha de los proyectos ferroviarios para mejorar la infraestructura existente. Entre ellos destaca la realización de las nuevas relaciones Zurich-Milán vía el Saint-Gothard y Berna-Milán vía Lotschberg (*figura 7*), ya que permitirán conectar la red de alta velocidad alemana con la italiana contribuyendo así a la creación de una auténtica red europea de altas prestaciones.

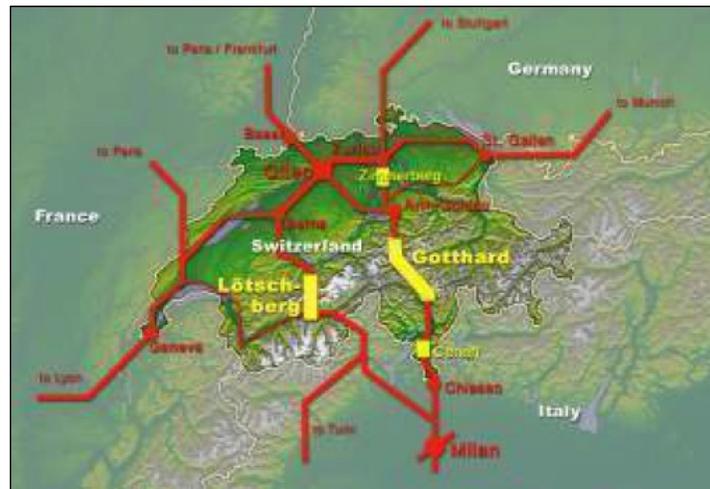


Figura 7: Corredores transalpinos suizos. Fuente: [M]

2.3.2.1. El eje del St. Gotthard La pieza maestra del nuevo eje ferroviario del Saint-Gothard, representado en la *figura 8*, será el nuevo túnel de base que enlazara Erstfeld con Biasca. Con sus 57 km de longitud constituirá el túnel ferroviario más largo del mundo, superando los $50,5\text{ km}$ del túnel del Canal de la Mancha y los $53,9\text{ km}$ del túnel de Seikan. Su entrada en servicio está prevista para el año 2017. En cuanto a su coste, este asciende aproximadamente a 7.500 millones de euros. A partir de Giustizia los trenes circularán por la línea actual hasta el sur de Bellinzona, donde una nueva sección de línea dará acceso a un nuevo túnel de base: el túnel del Ceneri (*figura 8*). Este túnel, de $15,4\text{ km}$ de longitud, unirá la zona de Vigana (boca norte) con Vezia (boca sur). Al sur de Vezia, el túnel de base enlazará con la línea actual por la que los trenes se dirigirán hacia Lugano. La apertura está prevista en 2019. Para mejorar las relaciones de la Suiza oriental con el eje del Saint-Gothard, el proyecto contempla la realización del túnel de base del Zimmerberg, con una longitud de 20 km y dividido en dos partes. El túnel de base del Zimmerberg unirá Zurich y la región de Littli. La primera parte de este túnel, que enlaza Zurich con la región de Thalwil, ha sido ya realizada dentro del proyecto Rail 2000 y está en servicio actualmente. En Nidelsbad/Thalwil se realizará una obra de bifurcación subterránea a partir de la cual empieza la segunda parte del túnel que desembocará en Littli, localidad situada al norte de Zug. Tanto estas obras como las del Ceneri empezaron en 2006. [27]

Una vez puestos en servicio los tres túneles de base (túnel del Zimmerberg, túnel del Saint-Gothard y túnel del Ceneri) se creará un eje ferroviario de altas prestaciones cuyo punto más elevado no superará los 550 metros de altitud y que será significativamente más corto que el recorrido por la línea clásica (*figura 8*).

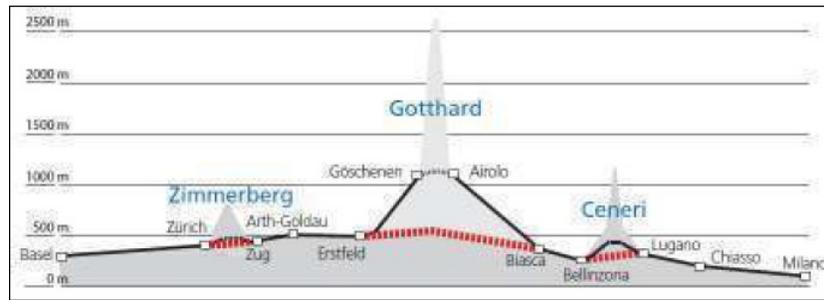


Figura 8: Perfil longitudinal de la línea, con los túneles de base del Zimmerberg, el Gotthard y Ceneri. Fuente: [50]

2.3.2.2. El eje del Lötschberg – Simplon El proyecto NLFA completó el eje ferroviario del Lötschberg en 2007, con un nuevo túnel de base de 34,6 km de longitud entre Frutigen, en el valle del Kander (cantón de Berna) y Rarogne, en el valle del Rhone (cantón del Valais). Con su puesta en servicio, la línea de base del Lötschberg-Simplon constituye el primer eje ferroviario transalpino de gran gálibo, mejorando el transporte de mercancías. El coste de construcción del túnel ascendió a unos 2.700 millones de euros.

Túnel del Brennero, la conexión Innsbruck – Verona El eje ferroviario Munich-Verona, conocido como el eje del Brenner, forma parte de uno de los corredores ferroviarios estratégicos de Europa que se extiende de Berlín a Verona, conectando Escandinavia, Alemania, Austria e Italia y siendo también de gran importancia para la conexión con Grecia.

Debido a su importancia crucial en el ámbito del transporte de personas y, sobre todo, de mercancías entre el norte y el sur del continente europeo, el corredor Berlín-Verona fue escogido por el Consejo Europeo de Essen en diciembre de 1994 entre los 14 proyectos prioritarios de infraestructura, constituyendo el denominado proyecto de Alta Velocidad/Transporte Combinado Norte-Sur. En 2001, el corredor fue extendido hasta Nápoles, conectando así el nuevo eje del Brenner con la red ferroviaria de alta velocidad italiana, como vemos en la *figura 9*.

El tránsito a través de esta ruta ha aumentado de manera exponencial generando un “cuello de botella”. Por esta causa, la pieza central del nuevo eje Munich-Verona será el nuevo túnel de base del Brenner que se extenderá entre Innsbruck y Fortezza. La construcción de esta obra singular de 56 km de longitud evitará, la circulación de los trenes por la línea de montaña actual. De esta manera, se incrementará considerablemente la velocidad del paso alpino y la capacidad de la línea para el transporte de mercancías.

Actualmente, debido a la gran pendiente del trazado ferroviario existente, los trenes de mercancías tienen limitada la velocidad a 50 km/h y el peso máximo a 1,600 t, debiendo usar dos o tres locomotoras. Una vez completado el nuevo túnel de Brenner los trenes de mercancías podrán atravesar el paso con pesos de hasta 3,000 t y sin la necesidad de tracción adicional. Asimismo los trenes de pasajeros podrán circular hasta 250 km/h reduciendo sensiblemente los tiempos de viaje de los recorridos transalpinos.

Por razones de seguridad todos estos nuevos túneles transalpinos consistirán en dos tubos de una sola vía cada uno, conectados cada 300 m aproximadamente mediante túneles transversales menores. Estas conexiones permitirán la evacuación desde un túnel hacia el otro.



Figura 9: Eje Berlín-Nápoles. Distinguimos la zona entre Innsbruck y Verona a través de los alpes. Fuente: [T]

2.3.3. Túnel Canal de la Mancha

El túnel del Canal de la Mancha o también llamado Eurotúnel, tiene una longitud de 50,50km, 39 de ellos submarinos, siendo así el segundo túnel submarino mas largo del mundo, por detrás del túnel de Seikan. Fue abierto el 6 de mayo de 1994 y atraviesa el Canal de la Mancha, uniendo Francia con Inglaterra.

Esencialmente se trata de una autopista rodante entre Inglaterra y Europa, ya que en los trenes que circulan hay mas del doble de automovilistas que pasajeros. El servicio ferroviario por eurotúnel tiene dos variantes: el Eurostar, para pasajeros y el Shuttle, que transporta camiones, automóviles y motos. Eurotunnel es una sociedad privada concesionaria del proyecto y gestiona el transporte ferroviario, cobrando peaje a las compañías ferroviarias que utilizan el túnel y explotando con sus propios medios el tráfico de camiones y pasajeros. El coste fue de 16.000 millones de euros. Las dificultades de coordinación entre empresas contratadas y subcontratadas y la dificultad técnica del proyecto elevaron considerablemente los costes.

3. Túnel convencional y de Alta Velocidad

Existen importantes diferencias entre los túneles de líneas convencionales y los de alta velocidad pero la más fundamental de todas se encuentra en la dimensión de la sección transversal, las plataformas y las exigencias de las rasantes para alcanzar velocidades elevadas. Hay que aclarar que se consideran túneles convencionales en los que se circula a una velocidad de entre 160 y 200km/h, los adaptados a velocidad alta 220-250km/h y los que consideramos túneles de Alta Velocidad en los que se circula a velocidades de entre 250 y 350km/h. En el siguiente *cuadro 1* podemos ver las principales diferencias.

PRINCIPALES DIFERENCIAS ENTRE TÚNELES DE GRAN LONGITUD Y CORTOS		
	Túnel de gran longitud > 10 km	Túnel corto < 1 km
Planificación y trazado	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor tiempo y dificultad de planificación: del trazado y la ejecución de obra. - Evitar terrenos geotécnicamente complicados. - Favorecer la construcción de accesos intermedios. 	<ul style="list-style-type: none"> - Menor tiempo y dificultad de planificación: del trazado y la ejecución de obra. - En general no será necesaria la construcción de accesos intermedios.
Estudios: geológicos, hidrogeológicos, geotécnicos y estructurales	<ul style="list-style-type: none"> - Pueden surgir problemas al tener grandes coberturas sobre el túnel. - Mayor volumen de estudios, más difíciles de realizar y requieren de un mayor grado de detalle, revisión y modificado. - Sistemas de drenaje de aguas más complejos. - Se atraviesan todo tipo de fallas, formaciones geológicas, acuíferos, distintos niveles freáticos, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - En general las zonas más complejas de realizar son los emboquilles. - Menor volumen de estudios y más sencillos de realizar. - Sistemas de drenaje de aguas sencillos.
Métodos Constructivos	<ul style="list-style-type: none"> - Para conseguir plazos y costes razonables utilización de tuneladoras en los tubos principales. También frecuente necesidad de accesos intermedios (galerías y pozos). - Utilización de métodos tradicionales en las galerías de seguridad, cavernas, etc. - Diferentes frentes de ataque simultáneamente, para poder cumplir plazos y costes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Utilización de métodos tradicionales. - En general un solo frente de ataque y condicionamiento del otro emboquille para el cale.
Seguridad	<ul style="list-style-type: none"> - Por razones de seguridad en general el túnel será bitubo con galerías perpendiculares cada cierta distancia, cavernas y nichos. - Complejos sistemas de seguridad: ventilación, iluminación, comunicación, señalización, puertas cortafuegos, hidrantes, etc. - Necesidad de galerías y pozos de evacuación en distintos puntos del trazado. - Estudios de seguridad durante la construcción y de forma especial durante la explotación. También de los servicios de emergencias (simulacros). 	<ul style="list-style-type: none"> - En general el túnel sera monotubo. - Sistemas de seguridad más sencillos sobre todo en la ventilación de hidrantes. - Cada cierta distancia construcción de nichos. - Estudios más sencillos de seguridad durante la construcción y durante la explotación.
Otras subterráneas adicionales	<ul style="list-style-type: none"> - Se requiere estudios y ensayos de funcionalidad y eficiencia del complejo subterráneo: refugios, galerías de evacuación, estaciones de ventilación, PAET, PIB, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - En general ninguna o muy pocas.
Sección del túnel	<ul style="list-style-type: none"> - En general sección circular. - Dimensionada con criterios aerodinámicos para la alta velocidad, y con espacio suficiente para alojar las rutas de evacuación, ubicación de instalaciones, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - En general sección en herradura. - Dimensionada con criterios aerodinámicos para la alta velocidad, y con espacio suficiente para alojar las rutas de evacuación, ubicación de instalaciones, etc.
Ventilación	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos y estaciones de ventilación necesarios en condiciones normales de explotación y especialmente en caso de incendio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Equipos de ventilación especialmente en caso de incendio. - Normalmente es suficiente con el efecto pistón en condiciones normales de explotación.
Equipamientos exteriores	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere equipamientos en el exterior como: estación ferroviaria próxima, accesos por carretera, centro de control, helipuerto, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> - Acceso por carretera, para el mantenimiento y evacuación y asistencia del pasaje en caso de accidente.
Afectación al Medio Ambiente	<ul style="list-style-type: none"> - Gran superficie necesaria para las instalaciones de obra y elevados costes de restauración de estas. - Gran volumen de vertederos. - Problemas con los lixiviados y requiere balsas decantación de lodos bentoníticos y espumas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Balsas de decantación de lodos bentoníticos. - Costes reducidos en la restauración de explanada de obras.
Plazos y Costes	<ul style="list-style-type: none"> - Mayor grado de dificultad para precisar los plazos con relativa exactitud. - Riesgo de que aumenten mucho los costes planificados, en caso de producirse algún problema imprevisto de cierta importancia. 	<ul style="list-style-type: none"> - En general resultan más sencillos de precisar los plazos y costes con relativa exactitud.

Cuadro 1: Diferencias entre túneles de gran longitud y cortos. Fuente: elaboración propia a partir [21, 43,44]

3.1. Tipos de túneles ferroviarios

Existen diversos tipos de túnel ferroviario. Una diferencia básica, es que podemos encontrar túneles artificiales o falsos túneles (excavados a cielo abierto “trinchera” o simplemente cubiertos), fundamentalmente por motivos económicos y/o ambientales, y túneles de mina, excavados directamente sobre el macizo rocoso.

Otra clasificación la encontramos en la localización de ambos tipos de túnel: túneles urbanos e interurbanos. Los túneles urbanos atraviesan el subsuelo de las ciudades y son necesarios para que las circulaciones ferroviarias tengan acceso a las terminales, que están normalmente situadas en lugares céntricos de las poblaciones. Estos túneles se caracterizan por tener que soportar un tráfico elevado (en especial el de pasajeros y en menor cuantía de mercancías), ya que gran número de líneas confluyen en ellos. También se caracterizan por los riesgos de subsidencia y por la posibilidad de afectar a las edificaciones en superficie en la fase de construcción. Respecto a los túneles interurbanos podemos encontrar los submarinos y los que atraviesan todo tipo de formaciones montañosas. A su vez, podemos encontrar dos tipos de túneles submarinos: los excavados en mina y los prefabricados. Estos últimos están divididos en piezas y se montan en una trinchera dragada en el lecho marino que posteriormente se cubre. Los principales problemas que presentan son la elevada presión que soportan y el peligro de inundación que existe, en especial, en la fase de construcción. También son característicos por la gran longitud que tienen que retranquear las bocas para poder alcanzar la cota necesaria para salvar el obstáculo sin recurrir a una pendiente excesiva, esto ocurre sobre todo en los túneles de mina. Finalmente tenemos los túneles que salvan formaciones montañosas y que podemos diferenciar tomando como elemento tipológico la situación relativa en que se halla el túnel respecto a la base de la montaña, (en la *figura 10* podemos ver las cotas de referencia en las que se suelen situar y apreciamos la diferencia de longitud entre ellos). Distinguimos entre:

- *Túneles de cota*: De corta longitud y característicos en los trazados de alta montaña.
- *Túneles de altitud media*: Tienen ya una montera importante, son de longitud media. A este tipo de túnel pertenecen la mayoría de los grandes túneles existentes en el siglo XIX y XX.
- *Túneles de base*: Son los de cota más baja y los de mayor montera, de ahí reciben el nombre ya que atraviesan la montaña por la base (por el valle). Son los que presentan mayores dificultades por su considerable longitud, por las fuertes descompresiones de las rocas y por las elevadas temperaturas. Éstos son los necesarios para el servicio en alta velocidad ahorrándose así la necesidad de viaductos y grandes terraplenes.

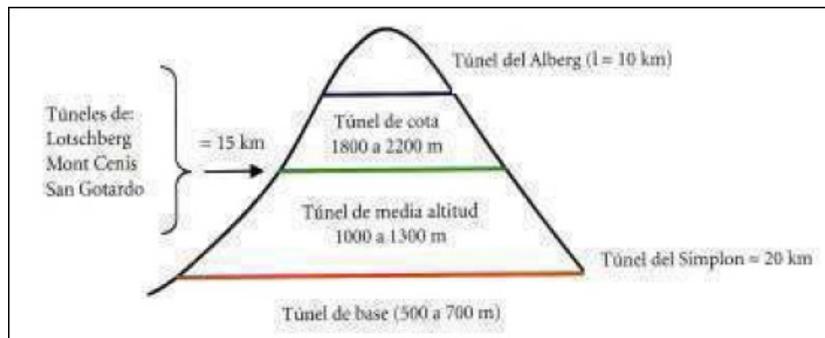


Figura 10: Clasificación de túneles respecto a la altitud. Fuente: [2]

Parte III

Planificación y proyecto

La construcción y puesta en explotación comercial de una nueva línea de ferrocarril apta para la circulación a alta velocidad es el resultado de un largo proceso que, en general, puede durar una o varias décadas.

Para proceder a la realización física de un nuevo trazado es preciso realizar una serie de estudios que requieren de un periodo temporal relevante. Una vez concluidos, e incluso durante su elaboración, se procede a consensuar con las entidades públicas y privadas, así como con la población directamente afectada, los resultados de aquéllos.

La laboriosidad de este proceso se inscribe en diversos ámbitos: decisiones políticas, dificultades medioambientales, montajes de financiación, etc. En general, puede señalarse que la fase de mayor duración corresponde al tiempo que discurre desde las ideas iniciales hasta el momento del comienzo de las obras. Una vez iniciadas éstas y salvo dificultades singulares, lo normal es acabar los trabajos en un plazo de 4 a 5 años.

4. Definición del trazado

4.1. Pre-estudios

El estudio de un enlace de ferrocarril a través de regiones que puedan requerir la construcción de túneles se determinará en relación con su utilidad potencial, comercial y social. Antes de todo, se debe estudiar el proyecto total en términos de costos de inversión, costos de operación, así como los beneficios en función de ingresos, las expectativas de crecimiento de las regiones afectadas y los beneficios sociales que pueda generar.

El desarrollo completo del proceso comienza con la realización de los denominados: **Pre-estudios funcionales**. Su objetivo es definir la finalidad del proyecto. En particular se trata de responder a cuestiones como las siguientes: línea para viajeros o para tráfico mixto; ciudades que serán servidas por ellas; enlaces entre la nueva línea y las existentes; impacto en la ordenación del territorio, etc.

La visión de la futura línea se puede enfocar de dos modos distintos; el modo japonés, priorizando la velocidad de la conexión entre los núcleos de población importantes o de interés estratégico; o el modo aplicado por Francia y España, alineando poblaciones de menor importancia en un intento de vertebrar el territorio o desarrollar aquellos puntos que reciban el servicio. Aumentando el número de puntos intermedios a conectar a la nueva línea, restringimos y limitamos la elección de la ruta, pero también se dan oportunidades para atraer un mayor tráfico, lo que puede justificar los costos de la obra y hacerla más rentable.

En el caso japonés la idea fue unir entre 10 y 23 ciudades intermedias entre Tokio (11 millones de hab.) y Osaka (2,5 millones hab.), finalmente se dio servicio a 11, todas ellas poblaciones alrededor de los 500.000 habitantes. Se establecieron pues dos servicios: trenes Hikari, los cuales paraban sólo en las estaciones de Nagoya (2,1 millones hab.) y Kyoto (1,5 millones hab.), priorizando así la velocidad del servicio; y los trenes Kodama, que se detenían en todas las estaciones.

Los casos francés y español dieron servicio a poblaciones más pequeñas mejorando la conectividad del territorio, con éxitos, como en el caso galo, que redujo la conexión de Aix-en-Provence con Marsella de 5h 20 min a 3h 10 min (teniendo en cuenta el trayecto en autobús hasta la

estación de TGV) o el caso de Picardie; con lo que se consigue dar acceso a la red a ciertas zonas geográficas que podrían quedar excluidas. Pero también fracasos, por gastos injustificados que además reducen la eficiencia y rentabilidad de la nueva línea, como en el caso de España, que decidió dar servicio a todas las capitales de provincia independientemente de su población (política de José M^a Aznar, seguida por el ejecutivo posterior de José Luis Rodríguez Zapatero). Así podemos encontrar poblaciones como Tardienta (Huesca) de menos de 1000 habitantes con conexión al servicio. Esta población sólo aportó 20000 usuarios en el año 2010, seguida en orden de menor utilización por las poblaciones de: Guadalajara-Yebes, Puente Genil-Herrera(Córdoba), Antequera-SantaAna (Málaga), Huesca y Calatayud (Zaragoza), consideradas estaciones fantasma dentro de la línea Madrid- Valencia [L]. En contraposición, encontramos los 15 millones de usuarios de Madrid-Puerta de Atocha o los 13 millones de Barcelona-Sants. Podemos ver a partir de éstos datos que es de vital importancia en el momento de la selección de la ruta la decisión de cuáles son los territorios a vertebrar en la línea y cómo.

En cuanto a los aspectos técnicos, es importante adoptar la alineación más directa entre los puntos, con una altura mínima de su punto más elevado, una pendiente que no exceda la máxima rampa seleccionada y cumpliendo las restricciones de radio mínimo de curva. Para conseguir estos fines, estará en buen uso la construcción de túneles y viaductos, por su independencia de la topografía. La economía de la línea dependerá del grado en el que se aproveche al máximo el terreno, incluyendo la adopción de túneles.

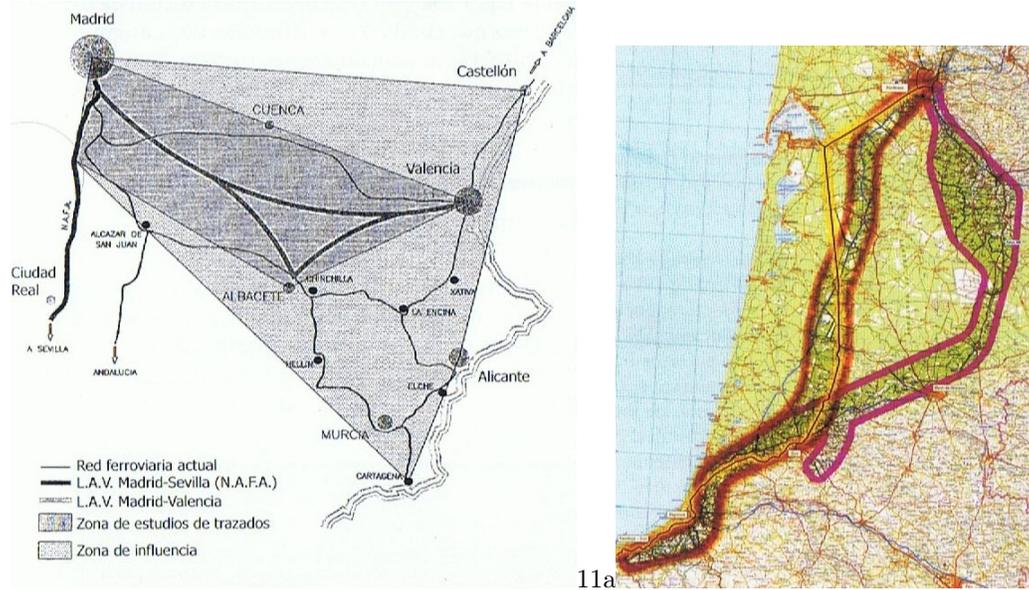
Un problema complejo, cuando se ha decidido construir un túnel, es la ubicación y el alineamiento para aprovechar al máximo el terreno. Normalmente, se consideraba la selección de un túnel más corto a un nivel más elevado (Túneles de cota o de media altitud), basándose simplemente en los costos de construcción comparados con las ganancias operacionales, aunque la tendencia en alta velocidad, por sus ventajas técnicas a la hora de llevar a cabo el restringido trazado, a construir túneles más largos a menor elevación (Túneles base). Podrá presentarse también el problema de los accesos intermedios para construcción, ventilación u otras razones de funcionamiento.

4.2. Estudio corredores

La primera etapa después de considerar los puntos principales por donde pasará la línea son los **Estudios de corredores**, también denominados Estudios preliminares en Francia. El objetivo de éstos es afinar las características del proyecto, sus impactos medioambientales y su interés socioeconómico. Se efectúan comparaciones entre los diversos corredores seleccionados de aproximadamente 1 km de ancho, desde la perspectiva técnica, funcional, económica y medioambiental. También es considerada la opción de mejora de las líneas existentes, como solución a la falta de capacidad o calidad del servicio. La *figura 11.a.* muestra el marco geográfico en el que se llevó a cabo el estudio de corredores con ocasión de la definición del trazado óptimo de la línea de alta velocidad Madrid-Valencia. Análogamente, en la *figura 11.b.* podemos ver las bandas analizadas para la línea Burdeos – Hendaya. [1]

Tanto esta fase inicial, como la anterior, se realizan sobre mapas topográficos a una escala de 1:50000 para abarcar un área lo más amplia posible, pero después se necesitarán mapas más detallados a medida que avanzan el diseño del proyecto y la alineación se defina con mayor precisión. Para considerar las ventajas de unos respecto de los otros, se debe prestar atención a las características geotécnicas de los terrenos por los que discurren los distintos corredores. También a partir de las consideraciones precedentes se puede estimar la inversión que necesitaría cada corredor. En función de los tiempos de viaje, que sin duda tienen una calificación de provisionales, se efectúan los análisis de demanda, y finalmente, se identifica

la rentabilidad de cada corredor. El parámetro, en este punto, puede ser evaluado por un indicador sencillo como sería el obtenido al dividir el número de viajeros que utilizaría la nueva línea por la inversión requerida para su construcción.



(a) Marco geográfico del estudio de corredores para la definición del trazado de la línea Madrid-Valencia. Fuente:[1] (b) Bandas de trazado de la nueva línea de alta velocidad Burdeos-Hendaya. Fuente:[1]

Figura 11: Ejemplos de Estudios de corredores sobre levantamientos topográficos.

El **Estudio de alternativas** consiste en efectuar un análisis de las posibles alternativas de trazado, a partir de un levantamiento topográfico a escala 1:25000 y estudios geológicos y geotécnicos de la zona.

4.3. Anteproyecto

El anteproyecto es la fase siguiente, en ésta se estudian los diferentes trazados y se selecciona una de las posibilidades. El análisis se realiza sobre un levantamiento topográfico a escala 1:5000. La alternativa seleccionada se presenta a información pública, de forma que tanto particulares como instituciones puedan efectuar y plantear alegaciones. En este punto también se presenta la denominada Declaración de Impacto Ambiental (DIA). Una vez resueltos los apartados anteriores el anteproyecto es aprobado definitivamente por el Ministerio de Fomento y se procede a la realización del proyecto constructivo, que permite precisar el proyecto (dimensionamiento de las obras de fábrica, impactos del proyecto, etc) y establecer el sistema de financiación. Es posible entonces convocar los concursos de adjudicación de realización de las obras y, por tanto, iniciar los trabajos de construcción de la nueva línea.

5. Proyecto

En el proyecto, se diferencia entre el Proyecto Básico de Plataforma y el Proyecto de Construcción, que son expuestas de manera esquemática en las **tablas** de la *figura 12*. Es en éste

último donde se llevarán a cabo los estudios cartográficos, geológicos y geotécnicos de mayor detalle, necesarios para la consecución de la obra.

En este punto del trabajo haremos referencia a los estudios necesarios mostrando principal interés en lo que atañe a túneles ferroviarios.

	PROYECTO BÁSICO	PROYECTO DE CONSTRUCCIÓN
OBJETO	<p>Análisis de las necesidades y alternativas concretas de las actuaciones</p> <p>Realizar el IEA</p> <p>Poner en marcha el procedimiento de expropiación, ocupación temporal y reposición o supresión de servidumbres</p> <p>Información pública a efectos de ocupación</p>	<p>Desarrollo completo de la solución óptima para hacer factible su construcción y posterior explotación</p>
CONTENIDO	<p>Definición geométrica de las obras, expropiaciones y aspectos que deban ser objeto de aprobación por otros organismos y su valoración</p>	<p>Definición con precisión dimensiones, cotas, plazos, precios, condiciones de materiales...</p>
VALORACIÓN ECONÓMICA	<p>Valoración compuesta por macroprecios y mediciones generales</p>	<p>Presupuesto detallado mediante unidades de obra. Contiene Cuadro de precios Nº 1, Cuadro de precios Nº 2, justificación de precios, presupuestos parciales generales</p>
PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARTICULARES	<p>No contiene</p>	<p>Contiene</p>
PLANOS	<p>Formas</p>	<p>Desarrollo completo</p>

Figura 12: Componentes del Proyecto Básico y del Proyecto de Construcción. Fuente: [1]

5.1. Planificación

Esta parte del proyecto como hemos visto en lo expuesto anteriormente, es necesaria ya en los estudios previos y de corredores, para poder así acotarse a las propuestas que ofrezcan mejores condiciones para la construcción de la obra. Por lo tanto, antes de que el túnel se pueda planear en líneas generales y diseñar en detalle, se deberá reunir información sobre aspectos físicos del proyecto, además de los estudios económicos, los cuales, claramente, tienen entre ellos una relación directa. La necesidad de una detallada y extensa investigación es en los túneles probablemente mayor que en la mayoría de construcciones civiles. Es por lo tanto, en la investigación para poder hacer la mejor selección de la línea, su nivel y los métodos a emplear, donde resulta contraproducente escatimar en costes.

Se deberá contar con la topografía del área en cuestión hasta el más amplio grado práctico, junto con los antecedentes de cualquier alteración importante en el terreno, así como los datos geológicos y geotécnicos. Como ya hemos comentado, durante el estudio de corredores usaremos levantamientos topográficos a escala 1:50000, en el estudio de alternativas 1:25000 y en el anteproyecto 1:5000. En cuanto a la cartografía geológica y geotécnica, usaremos escalas de 1:10000 a 1:5000 durante el anteproyecto, y escalas de mayor detalle en el proyecto, de 1:2000 a 1:500.

Las investigaciones para un túnel deberán ser una actividad continua durante su proyecto, diseño y construcción, debido a la frecuente variabilidad del terreno y a los nuevos problemas que aparecen durante el avance de la obra.

5.2. Topografía

En una primera aproximación, se usarán mapas ya existentes de la zona que incluyan curvas de nivel u otra información sobre niveles. Con el objetivo de apreciar mejor el significado de los mapas es muy recomendable ir al terreno en persona tanto al inicio, como durante la realización de la obra.

El levantamiento topográfico en detalle es de vital importancia para seleccionar la mejor ruta entre las alternativas que se pueden imaginar sobre el mapa. Los levantamientos se enlazan con la retícula nacional u otro sistema de referencia, e incluirán, una red de triangulación o una poligonal cerrada para establecer un sistema de coordenadas para el túnel. Es fundamental la selección de puntos permanentes en lugares que no se vean afectados durante la obra.

Ya sea la obra en un espacio abierto, montañoso o aluvial; en un centro urbano, en una área industrial, el levantamiento es necesario para tener la exacta localización de los túneles (de servicios, canalizaciones, mineros, parkings...) ya existentes.

En ningún momento se limitará la extensión del levantamiento al tramo del túnel, sino que debe ser adecuado a fin de incluir largos accesos y las áreas potenciales de uso para la construcción de las boquillas de entrada, almacenamiento de dovelas (en el caso de uso de escudos), plantas de hormigón, retirada escombros de la excavación, etc. En la *figura 13* podemos observar la amplia zona de construcción ocupada en frente de las bocas de entrada durante la construcción del túnel. En regiones montañosas accidentadas se debe analizar cada uno de los detalles del alineamiento como parte del todo. Los viaductos, los cortes laterales, los portales de entrada y el túnel interaccionan y no se pueden tratar en forma separada, pueden ser importantes algunos de estos puntos para los tiros de ventilación o los tiros de acceso, al igual que las corrientes de agua, manantiales, agua estancada o las características del drenaje. También será necesario situar con precisión cualquier edificio que se encuentre en los alrededores.

Pueden ser de gran utilidad para la etapa preliminar, al establecer las posibilidades técnicas e identificar las alternativas posibles para construir corredores de ferrocarril, los mapas de 1:50000. Se pueden identificar las áreas que requieren mapas más detallados y examinar las restricciones impuestas por las pendientes y las curvas



Figura 13: Túnel Pajares, boca norte Fuente: [31]

Para la siguiente etapa, los mapas de los corredores seleccionados a una escala de 1:10000 permiten confirmar los alineamientos posibles y eliminar los corredores que no sean adecuados,

comprobando nuevamente las pendientes y las curvas. De nuevo se pueden determinar las áreas que requieran mapas más detallados y se podrá identificar la ubicación y extensión de las principales estructuras.

Los mapas a una escala de 1:2000 permiten finalmente fijar el mejor alineamiento y especificar el diseño. Luego se podrán definir las estructuras principales y preparar las cantidades necesarias para estructuras y movimiento de tierras.

En los túneles subacuáticos se necesitan procedimientos similares, pero además hay aspectos adicionales de primordial importancia, en los que se incluye[31]:

- Nivelación precisa del piso.
- Determinación de la naturaleza y estabilidad del piso.
- Posibilidades de profundizar por socavación o dragado.
- Niveles de avenidas, pasadas, presentes y pronosticadas.
- Presencia de fisuras acuíferas y zonas de fallas.

5.3. Investigación

Es importante en las zonas mineras e industriales que se conozcan los antecedentes del lugar, nos podemos encontrar viejas minas o canteras abandonadas que fueran rellenas una vez fueron agotadas, con lo que durante el avance del túnel en una zona en roca dura podríamos encontrar repentinamente una zona de material blando. Pozos sobre acuíferos también pueden traer problemas.

Otro peligro en túneles de poca profundidad por zonas industriales es la contaminación del suelo por desechos industriales cuando los contaminantes se han filtrado hasta capas subyacentes. Estas situaciones pueden conllevar grandes riesgos para la salud de los operarios, debido a la inhalación de gases y de aire desoxigenado por los óxidos del substrato contaminado.

5.4. Geología y geotecnia

Los levantamientos geológicos y los estudios geotécnicos son fundamentales en el proyecto, diseño y construcción. La estratigrafía, petrología y tectónica son importantes, pero los detalles de las estructuras y las variaciones, dados por estudios de mecánica de suelos y rocas, son más necesarios en el caso de túneles que los amplios estudios geológicos.

La información geológica se puede obtener de los mapas, donde se muestran los depósitos aluviales, terrenos de acarreo y tipos de rocas que se encuentran en la zona y su interrelación, pero la localización exacta de las interfases y los cambios de textura y resistencia durante el avance son de gran importancia en túneles por lo que se deberá hacer exploraciones para determinar estos puntos.

Los registros de perforaciones anteriores son de gran utilidad; canteras, pozos, tiros y minas, y también de los acantilados y el lecho de las corrientes fluviales. Se deberán buscar los informes de túneles anteriores, pozos y cimentaciones profundas.

Información geológica y geotécnica importante:

- Descripción geológica con detalles de la litología y la variabilidad.
- Ubicación y orientación de las discontinuidades y los planos de debilitamiento relativos a la excavación del túnel; planos de estratificación, fallas, juntas, zonas de corte.

- Esfuerzos en el lugar.
- Propiedades geomecánicas.
- Aguas subterráneas.

Es aconsejable seguir el mismo proceso de estudiar progresivamente y con mayor detalle áreas cada vez más reducidas, al igual que para el estudio topográfico, pero tal vez no sea posible. Un estudio general de toda la información disponible que cubra las rutas posibles, que se complemente con una visita al área, será bastante útil al establecer los corredores preferidos; no obstante, mucho dependerá del detalle y precisión que se hayan elaborado los mapas en general y, también, de las rocas que afloran y que se puedan inspeccionar o del grado en que estén cubiertas por los depósitos superficiales.

En la etapa en que se realiza un mapa, una escala de 1:10000, es fundamental realizar un reconocimiento de campo para dar alternativas en cuanto a los corredores y así evaluar el carácter y estructura de las rocas, y preparar propuestas para una detallada exploración de la ruta preferida, con el auxilio de pozos de sondeo y un estudio geofísico. Cuando se elaboren los mapas a escala 1:2000 será evidente la necesidad de pozos de sondeo y pruebas adicionales, lo cual se deberá organizar, particularmente en los lugares de las estructuras importantes y de preferencia como una extensión del programa principal de perforación.

Los medios que se utilizan para obtener más conocimientos del túnel son las perforaciones, pozos de tiro de prueba y frentes exploratorios. El objetivo es identificar y localizar con exactitud cada estrato importante para el túnel y evaluar sus características, variaciones y su comportamiento durante la excavación. Ningún patrón de perforaciones podrá tener un espaciamiento tan pequeño como para identificar todas las anomalías, pero el número de perforaciones estará relacionado con la variabilidad que se esperaba o se halló.

Los estratos se identifican y se determinan sus características basándose en las muestras tomadas en la inspección y pruebas realizadas tanto *in situ* como en laboratorio. Es necesario planearlo de manera que no se realicen un número innecesario de pruebas, por lo que es muy ventajoso realizar un programa progresivo de investigación en el que se vayan aclarando las zonas de mayor incertidumbre. En una segunda etapa de sondeos se conseguirán secciones más completas a lo largo y a través del túnel. En otra tercera etapa de la investigación del lugar, se comprueban los puntos críticos al terminarse el diseño y la geometría del túnel para reunir la información faltante y resolver dudas. Un túnel piloto o un frente de exploración pueden auxiliar en dichas funciones: aún habiendo hecho todas estas investigaciones, la excavación de cualquier túnel será siempre para explorar y en muchos casos, se deberán hacer sondeos antes de la excavación como procedimiento normal. [43]

Es probable que las condiciones geológicas en o cerca de los portales, requieran un estudio especial cuando se corra el riesgo de deslizamientos de rocas y de la presencia de rocas bastante intemperizadas.

El agua subterránea puede ser perjudicial para el sistema de transmisión eléctrica, a menos que se tomen las precauciones correctas (drenaje, impermeabilización,...) y, también, puede reducir seriamente la fricción de los rieles, en especial al combinarse con arcillas, o si se congela, reduciendo en este caso la capacidad de arrastre de las locomotoras, particularmente en una pendiente. En ciertas condiciones climáticas, las gotas de agua se pueden congelar y cubrir los rieles con una capa de hielo.

Los túneles subacuáticos requieren una investigación todavía más detallada de los posibles efectos del agua subterránea tanto en la etapa de construcción como en las etapas posteriores. La porosidad de los estratos y la presencia de fisuras pueden resultar críticas para la posibilidad de aplicar diferentes métodos de construcción de túneles e influirá en la selección del revestimiento que reduzca la filtración y en las instalaciones de bombeo posteriores.

5.4.1. Tensiones in situ del macizo, recubrimiento y presiones sobre el túnel

En cuanto a los principales problemas geotécnicos, en lo que respecta al proyecto y la construcción de túneles y excavaciones subterráneas, son el conocimiento del estado tensional in situ del terreno o macizo rocoso, las propiedades mecánicas del macizo y en el caso de rocas, las juntas o discontinuidades y sus características.

Las cargas que actúan sobre el revestimiento del túnel dependen fundamentalmente de las tensiones “in situ” y de la variación que en ellas ha introducido la excavación, con lo que el conocimiento de su magnitud a lo largo de la construcción del túnel es fundamental. Fenómenos como el overburden (explicado en . . .), están relacionados con la convergencia en el túnel y con la deformación vertical en clave. Así como, el rendimiento de los cortadores de disco donde las tensiones in situ del macizo influyen en su rendimiento.

La tensión vertical que actúa sobre la clave de un túnel se debe al peso del terreno situado encima, pero existen dos escuelas de pensamiento sobre si debe considerarse toda la altura o debe reducirse por el efecto de silo o de reparto de tensiones ambas escuelas de pensamiento pueden ser correctas:

La primera, la que conocemos como de Terzaghi tiene 60 años de antigüedad e indica que se produce siempre un efecto de silo que reduce la tensión vertical geostática a unos valores que corresponden a una altura de terreno muy pequeña, que depende del ancho B y altura H_t del túnel, y que para suelos granulares supone ser tan baja como $0,31(B + H_t)$.

La segunda escuela de pensamiento, o escuela japonesa, supone que sobre el túnel actúa realmente el peso de todo el terreno que tiene encima, es decir, que la tensión vertical que actúa sobre el revestimiento del túnel, sea cual sea su profundidad, es la geostática.

La explicación que da Matsumoto es que los macizos rocosos japoneses, sometidos a enormes esfuerzos tectónicos por los movimientos de las placas de la corteza terrestre en esa zona, son muy diferentes a los macizos rocosos continentales estudiados por Terzaghi que en Europa y América dice que corresponden a montañas relativamente sanas donde puede tener lugar el fenómeno de arco que reduce la tensión vertical [35]. En el túnel de Ueno en el Tohoku Shinkansen las medidas hasta 10 años después de la construcción mostraron que la tensión vertical que actúa sobre el revestimiento es del orden del 45% de la geostática, que se había tomado completa para el diseño.

En 1974 en su Tesis Doctoral el Prof. Rodríguez Ortiz comprueba numéricamente la existencia del efecto silo y describe los trabajos de autores anteriores para la medida de tensiones en capas inferiores de medios granulares, que muestran la existencia de zonas casi sin tensión. [35]

En Alemania las cargas sobre el revestimiento se toman iguales a las tensiones in situ cuando se conocen, porque la redistribución sólo puede hacerse por medio de dudosas expresiones empíricas, y de aquí la importancia del conocimiento de las tensiones in situ, que en distintos países se trata de distintas formas. En Inglaterra también se toma el estado tensional in situ indicando que entre las hipótesis de carga que suelen considerarse figura la debida al recubrimiento total, pero lo más difícil es estimar la reducción de ese recubrimiento.

Como indica el Prof. Manuel Melis Maynar, mientras que se ha avanzado en el ámbito del diseño por ordenador con cada vez más potentes herramientas basadas en diferentes métodos numéricos, o mejores métodos de ensayos y de medidas de tensiones, no se ha movido ficha al mismo nivel en la comprensión de la interacción de los distintos componentes del macizo rocoso ni en su estado tensional, que en definitiva es lo que se usa como input para todos los análisis del proyecto.

Las tensiones sobre las paredes del túnel o su revestimiento tienden efectivamente a ser mayores cuanto mayor es su profundidad y de hecho tradicionalmente –salvo las reducciones

de Terzaghi— en el estudio y proyecto de los túneles las tensiones verticales se han considerado siempre proporcionales a la profundidad. En general en los estudios teóricos tanto de las presiones sobre el revestimiento de un túnel como para estimar el factor de competencia del macizo rocoso, la presión vertical suele tomarse como la geostática, y a profundidades grandes, sea cual sea el significado de esta palabra, el estado tensional se admite cercano al hidrostático, es decir, el coeficiente de empuje al reposo K_0 suele considerarse igual a 1. La vertical puede ser menor que la correspondiente al caso hidrostático por fenómenos tectónicos, y donde el K_0 puede ser mayor que la unidad [35].

Sin embargo, debido a las enormes dispersiones de las tensiones in situ con respecto a las geostáticas, deben hacerse siempre medidas tensionales in situ.

La práctica actual parece tomar como altura máxima de carga no el recubrimiento del túnel, sino del orden de 3 veces su ancho, y que en rocas muy buenas para un túnel ferroviario de 15 m de diámetro la carga vertical sobre el recubrimiento puede ser con estas teorías tan baja como menos de 1 metro, lo que evidentemente el ingeniero debe juzgar con su propio criterio. En cualquier caso, ya que parece demostrada la existencia de algún efecto silo o de relajación de tensiones, no se comprende cómo en importantes túneles actualmente en construcción se pretenda aplicar toda la carga del macizo (incluso la altura de picos topográficos muy puntuales) al túnel sin realizar las necesarias medidas del estado tensional in situ.

Podemos ver que la medida de tensiones in situ es imprescindible en el proyecto de un túnel, y su falta ha llevado a muy sorprendentes casos como el de un conocido túnel español donde en función del estado del macizo se habían estimado en su día dos zonas con distintos espesores del revestimiento: 30 y 60cm. La administración responsable tomó la curiosa decisión de adoptar para todo el túnel el valor medio, 45cm, y hoy con el túnel terminado es necesario reforzar varios centenares de metros del túnel hasta los 60cm de espesor [35]. Si no pueden medirse las tensiones in situ probablemente lo más seguro sea tomar siempre la carga vertical geostática, que puede reducirse bajo picos muy estrechos y localizados si la roca es sana.

5.5. Sondeos

En todo tipo de obras civiles es necesario conocer las características del terreno sobre el que se van a realizar los proyectos, con vistas al diseño y dimensionamiento de la obra. La realización de sondeos es la técnica más importante en la investigación geológica, porque nos da información tangible y directa de un punto del subsuelo. El sondeo complementa el conocimiento que tenemos de la geología del entorno, por lo que, es necesario realizar un estudio geológico detallado previo de la zona. Así podremos escoger los emplazamientos idóneos donde realizar los sondeos, para que los datos obtenidos sean de utilidad y que su realización se pueda llevar a cabo con facilidad.

El conocimiento del tipo de las rocas a perforar facilitará la elección del método de perforación, tipo de la máquina y accesorios con los que se debe trabajar, además de las características de los fluidos de circulación.

El estudio de la zona se comienza generalmente a partir de mapas geológicos, fotografías aéreas y mapas de la zona, que permiten ver la localización de grandes fracturas y la identificación de estructuras geológicas. En etapas más avanzadas se procede a aplicar procedimientos geofísicos en el terreno y toma de muestras por medio de catas, pozos o sondeos; para la caracterización geomecánica de los materiales de recubrimiento y del propio macizo rocoso, con ensayos de laboratorio y pruebas *in situ*.

5.5.1. Métodos de perforación

- Perforación manual con barrena helicoidal (Sólo llega a 5m de profundidad, de uso muy limitado en túneles).
- Percusión con cable ligero, adaptable a casi todos los terrenos menos para la excavación de sondeos profundos en roca dura.
- Perforación mecánica con barrena helicoidal en suelos compactos.
- Perforación rotatoria a cielo abierto y barrenado para obtener núcleos en roca.
- Perforación de sondeo con inyección de agua para arenas, limos o arcillas donde no sea importante el muestreo.

5.5.2. Sondeos para la consolidación de terrenos

Este tipo de sondeos, son llevados a cabo durante la construcción y no forman parte de la recogida de datos. Su función es impermeabilizar macizos fracturados o intemperizados y dar mejores condiciones al terreno para poder ser excavado por medios mecánicos o mediante explosivos.

5.5.2.1. Aplicación en túneles Los métodos de inyección o cementación empleados en la construcción de túneles son:

- El precementado.
- El cementado secundario.

El precementado proporciona una mejora del terreno y una disminución de la permeabilidad alrededor del túnel antes de que se produzca la excavación del mismo mediante voladura o medios mecánicos.

El sistema consiste en perforar sondeos, desde el frente del túnel, e inyectar el producto de consolidación a continuación. Las zonas cementadas se solapan al menos la longitud de un avance. La distancia de los sondeos en el fondo no debe sobrepasar los 2m.

La longitud de los sondeos depende de los siguientes factores:

- Equipo de perforación disponible.
- Interacción de la operación de inyección con el resto de las labores.
- Posibilidad de perforar sondeos largos en formaciones fracturadas.

En función de las características del terreno se emplean diversos tipos de materiales de consolidación. En la mayoría de los casos se emplean mezclas de cementos. Sin embargo, cuando se desea alcanzar una cierta permeabilidad se utilizan silicatos.

Cuando se disparan voladuras en la proximidad de las zonas inyectadas los efectos no son muy importantes, debido a que el gel de cemento no posee una dureza excesiva y la deformación que sufre es relativamente pequeña. En ocasiones se utiliza como aditivo la bentonita para mejorar la plasticidad de las mezclas de cemento.

La cementación secundaria se utiliza para eliminar o corregir las filtraciones de agua después de haber finalizado las labores de excavación. Para ello se perforan sondeos con diferentes

direcciones y una profundidad de unos $3m$, para dispersar la mezcla en una zona tan amplia como sea posible. Esto significa que cuando se perfora a 45° los barrenos deben tener una longitud superior a los $5m$.

La presión de inyección debe ser inferior a $1,5MPa$, para evitar roturas de la roca y escapes del fluido inyectado. En terrenos muy malos puede ser necesario un gunitado previo de las paredes, siempre que las condiciones admitan el tratamiento. Los materiales que se utilizan comúnmente son el cemento y las resinas acuarreactivas y, en ocasiones, los silicatos, cuando las pérdidas o escapes son pequeños.

5.6. Excavaciones exploratorias

Dentro de sus limitaciones de disponibilidad y de costo, las excavaciones exploratorias en pozos, tiros o frentes suministrarán mayor cantidad de información útil y detallada que cualquier otro método.

El frente es el sistema que da más información en la construcción de túneles. Puede ser un túnel piloto perforado en línea del túnel principal y ampliado posteriormente, o se puede excavar para que sirva como un túnel de drenaje o ventilación, o como túnel de servicio para el paso de cables y tuberías.

Otras funciones de abrir un frente son: el acceso para los tratamientos del terreno, reducción de las cargas en el frente y soporte adicional en el túnel maestro, mejor acceso, ventilación y drenaje.

La presencia de agua también se debe tener en cuenta:

- Puede inundar un túnel irrumpiendo por un frente expuesto, o como agua superficial que entra desde un tiro o una galería.
- La presencia del agua en el terreno añade presión hidráulica a la carga ejercida sobre un revestimiento impermeable.
- El agua de los poros modifica significativamente las propiedades plásticas y la resistencia de los suelos; el agua puede reducir la resistencia de la roca al lubricar las juntas.
- El agua que penetra en los lechos de anhídrita u otros minerales puede reaccionar químicamente con los mismo causando hinchazón y ruptura.

6. Diseño

Teniendo en consideración las medidas que fueron tomadas, en el ámbito de los parámetros geométricos, en la transición de líneas convencionales a líneas de alta velocidad en todo el mundo, realizaremos ahora un análisis más detallado de cuáles son y cómo dichos parámetros influyen en la infraestructura ferroviaria a muy alta velocidad.

6.1. Parámetros geométricos de diseño en líneas de alta velocidad

Hasta ahora hemos visto como con el desarrollo de las nuevas líneas ferroviarias de alta velocidad un gran número de parámetros considerados en el diseño (radio mínimo en curva, peralte máximo, rampas...) tuvieron que variar iniciando un cambio en el modo en que las infraestructuras eran entendidas hasta la época. Con la experiencia nuevos problemas surgieron a medida que la velocidad aumentaba como los efectos aerodinámicos en túneles

o el vuelo de balasto, que estudiaremos con más detalle en adelante. Por lo que realmente interesa conocer la influencia de la velocidad sobre los elementos que componen la vía, ya que ésta requiere la construcción de trazados cada vez más estrictos, tanto en el aspecto geométrico como en la calidad de sus infraestructuras. Ahora analizaremos los principales parámetros de diseño en un trazado de alta velocidad.

Las principales cuestiones a tener en cuenta al estudiar un trazado son:

- Seguridad.
- Rigidez del sistema.
- Posibilidades técnicas y medioambientales.
- Economía de la solución.
- Mantenimiento con coste aceptable.
- Confort.

6.2. Trazado en planta

El trazado en planta está formado por alineaciones rectas, curvas circulares de diferentes radios y acuerdos de curvatura variable que permiten la transición entre las distintas alineaciones, como en todo tipo de obra lineal.

Una vez definidos los puntos de entrada y salida del túnel, se debe considerar el estudio geotécnico de la zona que será atravesada y la afectación sobre obras existentes, que pueden ser superficiales (para evitar asientos de éstas) o subterráneas (el conocimiento de todas las obras y servicios ya existentes en el subsuelo de la zona afectada). También es de vital importancia, la definición del sistema constructivo que será empleado, ya que puede condicionar los radios de las alineaciones curvas.

6.2.1. Parámetros influyentes en el diseño del trazado en planta

Los principales parámetros de diseños de un trazado apto para la circulación a alta velocidad en planta son:

- El radio mínimo de las curvas.
- Peralte máximo.

6.2.1.1. Radio mínimo de curva El radio mínimo en curva viene determinado por la consideración de dos fenómenos físicos:

- Confort del viajero (más restrictivo que la propia seguridad).
- Ripado de la vía (resistencia transversal).

La expresión que relaciona la aceleración sin compensar (γ_{sc}) que se genera en el plano de la vía, cuando un vehículo circula por una curva de radio (R), y peralta (h) a una velocidad (V) viene dada por:

$$\gamma_{sc} = \frac{V^2}{R} - \frac{h}{S} \cdot g \quad (1)$$

donde:

s: distancia entre ejes de carriles

g: gravedad

En función de la flexibilidad de la suspensión del material, caracterizada por su coeficiente de souplesse (ϑ), el viajero sentado en el interior de la rama de alta velocidad experimentará una aceleración lateral (γ_v) de valor:

$$\gamma_v = (1 + \vartheta)\gamma_{sc} : \vartheta \approx 0,2 \text{ a } 0,3$$

La experiencia ha demostrado que existe una relación entre la aceleración lateral que percibe el viajero y la sensación de incomodidad que éste percibe, por tanto, para para garantizar un mínimo de calidad del servicio la aceleración transversal no debe jamás superar los $1,4m/seg^2$, y para que el nivel de confort sea muy bueno ésta debe rondar los $0,85 m/seg^2$.

En cuanto al fenómeno del ripado de la vía, la ecuación que tiene en cuenta la resistencia transversal máxima de una vía, es la siguiente:

$$\frac{PV}{1000} + \frac{P}{g}\gamma_{sc} \leq \left(1 + \frac{P}{3}\right)\alpha \quad (2)$$

siendo P el peso por eje del vehículo y α un coeficiente que tiene en cuenta el tipo de traviesa instalada en la vía (1,5 para traviesas de hormigón).

Mediante esta fórmula, fijando la aceleración lateral sobre el viajero aceptable (γ_v) y si se conoce ϑ , se obtiene el valor de γ_{sc} . Dado que el valor límite del peralte se establece en torno de 180 mm, la ecuación (1) nos permite deducir para cada velocidad (V), el radio mínimo (R) en planta que deberá tener la curva de proyecto. Así vemos la inequívoca relación entre velocidad y radio de curva en planta del trazado, la cual podemos observar en la *figura 14* del profesor A. López Pita. Naturalmente habrá que comprobar la expresión (2) para no sobrepasar la resistencia de la vía.

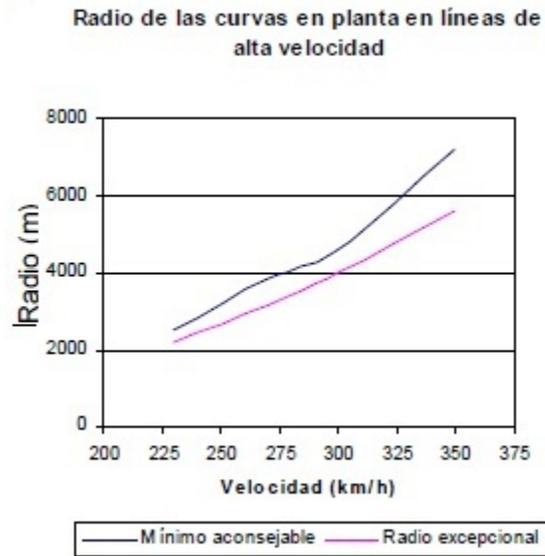


Figura 14: Relación entre radio mínimo de curva en planta y velocidad. Fuente: [3]

Radio mínimo en planta (m)	Velocidades de diseño (km/h)		
	270	300	350
<i>Aconsejado</i>	3846	4545	7143
<i>Normal</i>	3226	4000	6250
<i>Excepcional</i>	3125	4000	5556

Cuadro 2: Radios mínimos en planta para diferentes velocidades de diseño. Fuente: UIC.

No se observa una tendencia precisa en cuanto a radios mínimos en las diferentes líneas mundiales. Alemania comenzó apostando por radios generosos (7000 m en la líneas Hannover – Würzburg), pero los rebajó en su siguiente línea. Francia, empero, lo aumentó considerablemente, ya que se aumentó la velocidad de diseño en 50 km/h. Lo que es evidente es que la Tokaido Line es la línea de alta velocidad con radios mínimos más bajos.

Dentro del túnel se debe tener en cuenta la altura del peralte, para considerar el aumento necesario del gálibo, en caso de que la curva se de dentro del túnel. El pequeño aumento en el ancho del gálibo final de la estructura hace necesario un correspondiente aumento del ancho excavado y el trazo y el levantamiento son un poco más complejos que en un túnel recto.

6.2.1.2. Peralte máximo, Insuficiencia de peralte y Exceso de peralte. Otro parámetro importante en la construcción de una línea ferroviaria es el máximo peralte permitido en las curvas. El peralte se define como la diferencia de cota entre las superficies de rodadura de los dos carriles de una vía dentro de una misma sección normal a ella.

En recta, el valor del peralte es nulo; en curva, el valor del peralte es constante. La curva de transición, entre la recta y la curva circular, permite una variación lineal del peralte a lo largo de la misma hasta alcanzar el valor del peralte en la curva circular, de modo que el viajero no perciba un cambio brusco de la aceleración transversal.

Las funciones del peralte son varias:

- Compensación del efecto de la fuerza centrífuga en curva, proporcionar confort al viajero.
- Mejor distribución de las cargas en ambos carriles.
- Disminución del desgaste de los carriles y ruedas.

Asimismo, se exigen ciertas limitaciones de peralte. Las razones por las que ha de limitarse el peralte son las siguientes: los trenes lentos y, normalmente, pesados provocan desgastes importantes en el carril interior de la curva, si el peralte es excesivo, propiciando un indebido desgaste del carril y consecuente descarrilo; si un tren se detiene en una curva, el peralte podría provocar un desplazamiento de carga y un arranque dificultoso; y por último, el propio mantenimiento de un excesivo peralte es dificultoso.

Se definen así los siguientes parámetros:

- *Peralte teórico*: Es el obtenido por anulación de la fuerza centrífuga a la que se encuentra el vehículo al recorrer una curva a la velocidad de proyecto.
- *Peralte práctico*: Peralte que realmente tiene la vía.
- *Insuficiencia de peralte*: Diferencia entre el peralte teórico y el peralte práctico. Los trenes de viajeros, trenes rápidos, son los que circulan con insuficiencia de peralte, porque el peralte práctico solo compensa una parte de la fuerza centrífuga. Dicho valor también se limita. La insuficiencia también está relacionada con el confort del viajero. Ésta es otra de las razones por la cual se limita su valor.
- *Exceso de peralte*: Diferencia entre el peralte práctico y el peralte teórico. Los trenes de mercancías, trenes lentos, son los que circulan con exceso de peralte. Dicho valor también se limita por las razones expuestas anteriormente.

El máximo peralte permitido en las curvas en la línea Tokaido se estableció en $200mm$. En los primeros años de su explotación se observó un desgaste mayor al esperado en los carriles interiores de la curva. Para evitar operaciones de mantenimiento en las siguientes líneas de alta velocidad se optó por reducir el peralte máximo a $180mm$. Actualmente se limitan entre 160 y $200mm$ para velocidades entre 250 y $300km/h$. [Referencia bibliográfica 68 de la tesis de japon] Para líneas con tráfico exclusivo de alta velocidad ($v = 230-330km/h$), indicaciones del profesor López Pita (p 70) recomiendan limitar el exceso de peralte a $100mm$.

En el *cuadro 3* podemos observar como, para la velocidad de diseño, la línea Tokaido, sufría de exceso de peralte para las velocidades que desarrolló inicialmente y como las líneas posteriores optaron por peraltes de $180mm$ también, excepto la línea Hannover -Wurzburg con un peralte excepcionalmente bajo. Certeramente podemos afirmar que la velocidad de circulación a $220km/h$ fue la causante de que el contacto de la rueda y el carril interior de la curva fuese superior al usual.

	SNR			SNCF		DB	
	Tokaido	Sanyo	Tohoku-Joetsu	Paris-Sud Est	Atlantique	Hannover - Würzburg	Köln-Rhein/Main
Velocidades de diseño (km/h)	270	300	275	300	350	280	300
Radio mínimo (m)	2500	4000	4000	4000	6250	7000	3350
Pendiente máxima (%)	2,0	1,5	1,5	3,5	2,5	1,3	4,0
Peralte máximo (mm)	200	180	180	180	180	65	180

Cuadro 3: Características geométricas de diferentes líneas de alta velocidad en el mundo. Fuente: [67 y 68]

6.3. Trazado en alzado

Una vez definida la planta, se define el perfil longitudinal, si la traza se separa mucho del terreno, ésta requerirá movimientos de tierras, viaductos y túneles; lo que puede encarecer la obra hasta el punto de resultar antieconómica. Es por ello, que el relieve es el factor determinante a la hora de determinar el trazado y debe ser considerado en el momento de realizar el trazado en planta trabajando de manera bidimensional coordinando ambos trazados y encontrando la solución óptima.

6.3.1. Parámetros influyentes en el diseño del trazado en alzado

Los principales parámetros de diseños de un trazado apto para la circulación a alta velocidad en alzado son:

- El radio de los acuerdos verticales.
- La magnitud máxima de las rampas.
- La longitud de las rampas.

6.3.1.1. Radio de los acuerdos verticales Recordemos que las curvas de transición en alzado son las encargadas de cambiar la pendiente de la rasante de forma gradual. Éstas pueden ser circulares o parabólicas, siendo éstas últimas más usuales en carreteras que no en trazados ferroviarios. Así pues, se hablará de radios de acuerdos verticales. Estas curvas verticales introducen, también, una aceleración centrífuga en su plano molesta para el viajero, sobre todo cuando se trata de acuerdos convexos. Igual que ocurría en el trazado en planta, dichas curvas generan aceleraciones centrífugas sin compensar sobre el viajero.

La relación entre la aceleración sobre el viajero, la velocidad de circulación y el radio del acuerdo viene dada por la expresión:

$$\gamma_V = \frac{V^2}{R_V} \quad (3)$$

donde γ_V es la aceleración en el plano vertical, R , es el radio de curvatura de la curva vertical y V la velocidad de circulación.

Así pues, se deduce de esta expresión que para velocidades mayores serán necesarios radios de curvatura mucho mayores en los acuerdos verticales (*figura 15*). Radios mayores suponen, para una misma diferencia de pendientes, longitudes mayores en las curvas de transición. Las experiencias francesas permitieron establecer, como referencia, un valor máximo para γ_V de $0,05g$, y un valor aconsejable de la mitad de dicho número. Se deduce por lo tanto, γ_V que para $V = 300km/h$, el radio del acuerdo vertical se situaría en torno a 28000 metros.

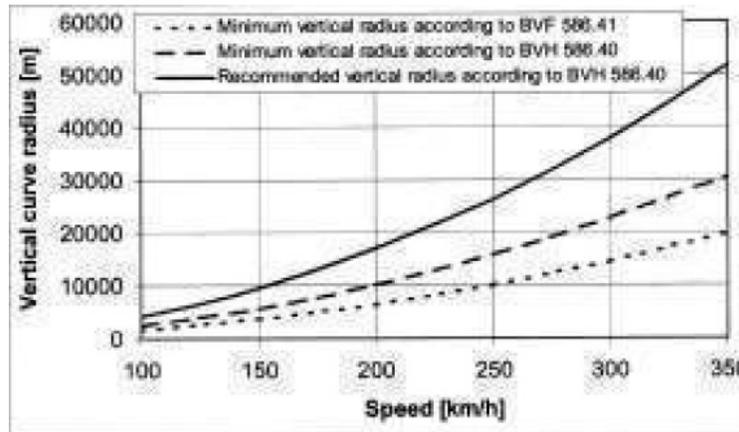


Figura 15: Radios curvas verticales normativa prRNV13803-1. Fuente: [2]

6.3.1.2. Rampa máxima y longitud de rampa La adopción de un valor máximo para las rampas de una línea es el resultado de un complejo proceso donde intervienen múltiples factores, de entre los que destacaremos los siguientes:

- La orografía por la que discurrirá la línea y la incidencia en el coste de la infraestructura de una u otra rampa máxima.
- Las características de potencia del material que circulará por la línea y la pérdida de velocidad que experimentará en cada rampa.
- Las prestaciones en materia de frenado de cada composición y su capacidad para poder detenerse en una pendiente dada en caso de emergencia o para no sobrepasar una velocidad preestablecida.

El coste y el uso que se quiera dar a la línea serían los condicionantes de mayor repercusión. Hemos podido ver como en el caso francés, aumentando el valor de sus rampas (3.5%), consiguieron evitar la construcción de pasos en túnel ahorrando hasta un 30% respecto del coste de la misma línea con rampas del 1.5%. Éste ahorro se debe ponderar muy bien, ya que rampas elevadas de larga longitud pueden limitar enormemente la velocidad del tráfico de mercancías. Como podemos ver en la *figura 16* se muestra la evolución de la velocidad de un tren de mercancías suponiendo que llegase al inicio de la rampa a una velocidad máxima de 120 km/h con cargas remolcables comprendidas entre 800 y 1600 toneladas. Considerando una rampa máxima de 17,5%, se comprueba como la velocidad de los trenes de mercancías bajaría de 50km/h, para la carga de mayor valor. Por el contrario, para mantener la velocidad de 90km/h, la carga remolcable no podría exceder de 1000 t, [Alta velocidad en el ferrocarril] aumentando el coste del viaje y reduciendo su eficiencia y competitividad. Éste razonamiento lo podemos trasladar directamente a una línea de alta velocidad, por tanto al considerar las rampas es de gran relevancia no sólo su valor absoluto, sino durante que longitud se mantienen.

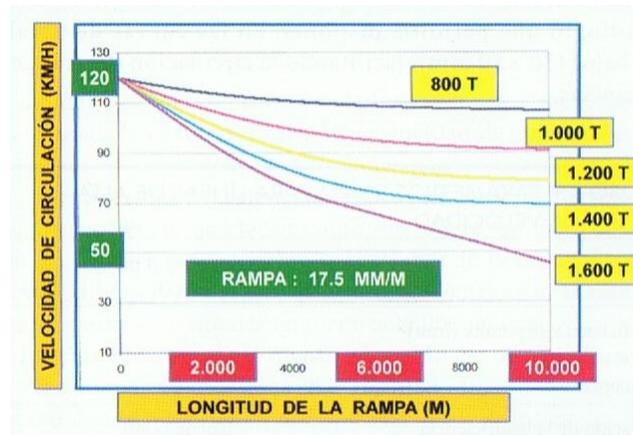


Figura 16: Evolución de la velocidad de un tren de mercancías circulando a 120km/h en presencias de rampas. Fuente:[1]

En lo que se refiere a las pendientes máximas, los valores dependerán de la topografía de la zona, si es posible salvar los desniveles con túneles o viaductos o hay que adaptarse más al terreno existente. En el caso de Alemania pasamos de valores muy bajos entre Hannover y Würzburg (1,25) a valores de 4% en la línea Köln - Rhein/Main. En todos los casos, como en el japonés, los valores podría decir que la línea Tokaido tiene un peralte máximo excesivo. En Japón y en los demás países se optó por rebajarlo en obras futuras.

No existe un límite bien definido para la pendiente, pero la adhesión del riel en relación con el peso de la locomotora y la potencia impone límites prácticos. Las pendientes mayores aproximadamente del 1% no se aplicarán sin tener una buena razón, aunque se utilizaron pendientes más pronunciadas, mayores de 2%, en el primer túnel de Sarnia; en el túnel del Appenine Pracchia la pendiente es de 2,5%.

Los factores que finalmente controlan la pendiente son la energía de la locomotora y la adhesión del riel. La energía requerida es proporcional al producto del peso del tren, velocidad y la pendiente, además de la resistencia a la fricción y la resistencia al viento.

Un túnel puede originar dos factores particularmente desfavorables: baja adhesión en los rieles por humedad constante y alta resistencia del aire a la velocidad hacia adelante debido al espacio restringido de la sección. Ésto trae como consecuencia que, en dichos túneles, se deberá suministrar más energía o más peso de la locomotora de lo que se necesitaría en una locomotora al aire libre, o la pendiente se tendrá que limitar a quizá dos tercios de la pendiente dominante en otros lugares. Será preciso considerar también la formación de hielo en los rieles, pero este riesgo es probablemente menor en un túnel que al aire libre, excepto en el caso se que gotee el agua cerca del portal.

Para mantener la velocidad de la línea, se debe tener también en cuenta la construcción de instalaciones complementarias a lo largo de la línea, debido a la interferencia que se producen en ramas de alta velocidad, donde trenes de viajeros circulan a 300 km/h y los trenes de mercancías a velocidades de $100/200\text{km/h}$ y excepcionalmente a $140/160\text{km/h}$. Así pues, la circulación de un tren de mercancías significaría anular 4 o 5 surcos para la circulación de ramas de alta velocidad, con la consiguiente reducción de capacidad en la línea. Para evitar estas situaciones se construyen Puestos de apartado y adelantamiento, de trenes, denominados PAET, en los cuales los trenes más lentos se paran y dejan pasar a los más rápidos. Su espaciamento y situación dependerá de la explotación que se haga de la línea.

6.4. Implicaciones técnicas de la circulación a alta velocidad

La llegada de la alta velocidad requirió una intensa investigación previa en todos los campos técnicos, para asegurar el correcto funcionamiento de este modo de transporte como sistema. De este modo se pudo diseñar una vía e instalaciones asociadas factibles técnicamente y aceptables económicamente.

De ahí que se hayan podido adoptar criterios de diseño en la vía, y en las instalaciones que hicieran que su coste de construcción y mantenimiento fueran el mínimo posible.

Muchos factores, evidentemente, no pudieron ser previstos y se fueron solucionando a medida que se ponían de manifiesto al aumentar las velocidades de circulación, como el vuelo de balasto.

6.5. Parámetros de diseño derivados del análisis de la dinámica vertical de una rama de alta velocidad

6.5.1. Defectos de vía y rigidez vertical

Las sollicitaciones verticales ejercidas por el material ferroviario durante su circulación por una vía pueden evaluarse mediante la fórmula de Prud'homme:

$$Q_T = Q_E + \Delta Q_D \quad (4)$$

donde:

Q_T = esfuerzo vertical total producido por una rueda sobre el carril.

Q_E = esfuerzo estático ejercido por una rueda.

ΔQ_D = esfuerzo dinámico ejercido por la rueda. Pudiéndose expresar ΔQ como:

$$\Delta Q = 2 \cdot \sqrt{\sigma^2 (\Delta Q_{NS}) + \sigma^2 (\Delta Q_S)} \quad (5)$$

donde:

$\sigma(\Delta Q_{NS})$ = desviación típica debida a las masas no suspendidas del vehículo, determinada por la relación matemática:

$$\sigma (\Delta Q_{NS}) = a \cdot b \cdot V \cdot \sqrt{m \cdot K} \quad (6)$$

donde:

a = parámetro que representa la amortiguación producida por el soporte de la vía

b = parámetro que caracteriza la amplitud de los defectos de la vía y del material

V = velocidad de circulación del vehículo ferroviario

m = masa no suspendida del vehículo

K = rigidez vertical de la vía Por tanto, nos interesa:

- Incrementar el amortiguamiento del soporte de la vía, lo que se traduce en:
 - Aumentar el espesor de las placas de asiento de $4,5\text{mm}$ (normalmente utilizadas si $V < 200\text{km/h}$) a 9mm (preferidas si $V > 200\text{km/h}$)
 - Aumentar el espesor de la capa de balasto por su capacidad amortiguadora de los 20 a 25cm en algunas líneas existentes hasta los 35cm en líneas de alta velocidad.
- Reducir el valor del parámetro b que caracteriza los defectos de la vía.

En líneas de alta velocidad, donde se circule a 300km/h , la amplitud de los defectos de los carriles está limitada a $0,3\text{mm}$, mucho menor que en líneas convencionales donde son de 1mm .

Cuadro 7,2 (Defectos de referencia alta velocidad a 200 km/h p 174)

Cuadro 7,3 (Variables introducidas por la SNCF para la línea París-Lyon)

- Disminuir la rigidez vertical (K) de la vía.

En el momento de la publicación de la fórmula de Prud'Homme (1970), la rigidez vertical de las vías de ferrocarril variaba entre límites muy amplios, valores de rigidez situados en el intervalo de $0,5$ a 16t/mm .

En los resultados de Fortin, analizando la influencia de la rigidez, se vio que al disminuirla aumentaba sensiblemente la potencia disipada, aumentando el consumo energético; pese a que la expresión de Prud'Homme aconsejaba disminuirla para disminuir las sobrecargas dinámicas sobre el carril.

Para establecer el óptimo de la rigidez vertical, se asociaron valores económicos a ambas variables: la potencia disipada (costes de tracción) y las sobrecargas dinámicas (costes de conservación de vía). El resultado situó el valor óptimo de la rigidez vertical, para velocidades de 200km/h , en torno a 5 o 6 t/mm , mientras que para velocidades de 300 km/h se elevaba hasta el intervalo comprendido entre 7 y 9t/mm . Más adelante en el año 2004, P. F. Teixeira, profundizando en el tema estableció el valor óptimo para alta velocidad en $7,8\text{t/mm}$.

Los elementos que nos permiten modificar la rigidez vertical de la vía son:

- Placa de asiento entre carril y traviesa.
- Suela elástica bajo las traviesas.
- Almohadilla elástica bajo el balasto.

En alta velocidad se trabaja sobretodo en la rigidez de las placas de asiento.

Para disminuir las solicitaciones verticales también se pueden reducir las cargas no suspendidas en el material ferroviario, como se deduce en la expresión de Prud'Homme.

La cuantificación de las solicitaciones que se dan en la superficie de la capa de balasto, se efectúa a partir de la fórmula de Zimmermann:

$$\sigma_t = \frac{Q \cdot d}{2F} \cdot \sqrt[4]{\frac{cF}{4EId}} \quad (7)$$

donde:

Q =carga vertical por rueda (kg) aplicada sobre la superficie del carril

d =distancia entre traviesas (cm)

c =coeficiente de balasto (kg/cm^3)

F =área de apoyo de las traviesas por hilo de carril (cm^2)

E =módulo de elasticidad del carril (kg/cm^2)

I =momento de inercia del carril respecto al eje horizontal (cm^4) He aquí que nos interesa:

1. Incrementar el momento de inercia (I) del carril: en las líneas de alta velocidad se emplea el carril de $60kg/ml$, en vez de los $54kg/ml$ usados tradicionalmente en líneas convencionales. Lo que reduce la tensión en la capa de balasto un 7%.
2. Incrementar el área de apoyo (F) de las traviesas: Con ello se consiguen reducciones de la tensión entre el 8 y el 26%.

6.6. Vía sobre plataforma de balasto y plataforma de hormigón

Tras lo publicado en el BOE num. 175 del 24 de julio de 2006, página 27.705, parece estar confirmado que para conseguir que los trenes de alta velocidad circulen a su velocidad actual de diseño (350 o $400km/h$), hay que sustituir la vía en balasto por vía hormigonada, ya que a determinada velocidad aparecen los problemas del schotterflug o vuelo del balasto. [34]

En muchísimos túneles se utilizan las vías con balastos, pero se presentan ciertas desventajas y es preciso considerar alternativas. El espesor requerido para una vía con balasto es de aproximadamente $300mm$, comparado con $200mm$ para una losa de concreto. La tendencia del balasto a desplazarse ligeramente bajo el impacto de las cargas del tren puede ocasionar que se invadan los espacios libres, con la consiguiente necesidad de realizar con mayor frecuencia ajustes y compactar el balasto en la vía. Se trata de una operación muy difícil y potencialmente peligrosa en el espacio limitado de un túnel, en particular si se utiliza un equipo mecánico, aún en el caso de que esté especialmente diseñado para trabajar dentro del gálibo final de la estructura. Es posible que se necesite renovar la vía en lapsos más frecuentes en los túneles a causa de la atmósfera generalmente húmeda y quizás corrosiva, y después de la renovación, la colocación y los reajustes necesariamente precisos en la vía resultarán difíciles en el período de asentamiento.

En un túnel corto no es aconsejable introducir la discontinuidades cambiando la tipología de la vía, pero en un túnel de gran longitud tiene grandes ventajas el uso de plataforma de hormigón utilizando máquinas modernas de encofrados deslizantes. La vía se mantiene segura dentro del alineamiento requerido y con un mantenimiento mínimo. Los rieles se pueden fijar

al concreto mediante un anclaje de pernos con resina; si se puede asegurar una mano de obra de alta calidad y pueden descansar sobre almohadillas elásticas para amortiguar las fuerzas de impacto.

6.6.1. Vía de balasto

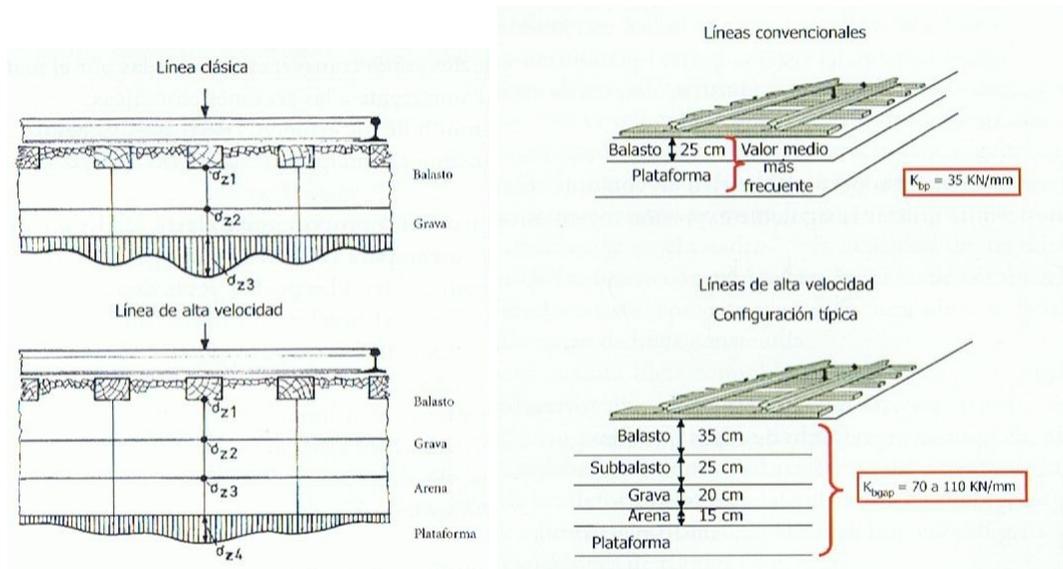
La vía en balasto es actualmente la más utilizada. El balasto es el conjunto formado por materiales granulares que conforman la capa de apoyo de las traviesas. Su principal misión es permitir la nivelación de la vía. Está compuesto por la banqueta de balasto y por una subbase formada, en general, por varias capas de diferentes materiales. Se disponen para asegurar el buen comportamiento de la vía frente a las acciones verticales, transversales y climáticas. El balasto por estar interpuesto entre el carril y el terreno debe ser resistente a las cargas aplicadas, y duradero a las cargas repetitivas, ya que uno de sus problemas es que con el paso del tiempo se rompe, por eso debe ser resistente al choque y a la abrasión.

Las capas que conforman la subbase contribuyen en conjunto a:

- Reducción y homogeneización de los esfuerzos sobre la plataforma.
- Proporcionar en parte estabilidad longitudinal y transversal a la vía.
- Proporcionar la manutención de las propiedades estructurales de la plataforma con el tiempo frente a eventuales factores externos.
- Amortiguar en parte las vibraciones originadas en el contacto rueda-carril.

Los espesores y propiedades mecánicas de las distintas capas vienen definidos en catálogos estructurales en función de la tipología del tráfico y de la calidad de la plataforma. Las exigencias de los materiales que conforman la capa de balasto son mucho más estrictas en líneas de alta velocidad que en convencionales, también requieren de mayor espesor ya que se mejora la distribución de presiones con ello.

Con la construcción de las nuevas líneas de alta velocidad se introdujo, desde el punto de vista de la infraestructura, un nuevo concepto: las capas de asiento y placas de asiento. La circulación a alta velocidad supuso disponer bajo la traviesa no solo el balasto, directamente sobre la plataforma, sino también un conjunto de capas intermedias que permitieran una mejor distribución de las presiones y una menor contaminación, tanto del balasto como de la plataforma ferroviaria.



(a) Configuración del sistema balasto-plataforma. Fuente: [1] (b) Valores característicos de la rigidez vertical del sistema balasto-plataforma. Fuente: [1]

Figura 17: Secciones de vía sobre balasto.

6.6.2. Vía en placa

La vía en placa consiste en una estructura de vía donde la banqueta de balasto ha sido sustituida por una losa de hormigón o capa asfáltica, y los elementos destinados a proporcionar el apoyo del carril y a mantener la estabilidad de la vía son bloques, que en mayor o menor medida, según el tipo de vía en placa, se colocan dentro de la losa.

La introducción de este nuevo concepto de superestructura surgió básicamente a partir de las siguientes ideas:

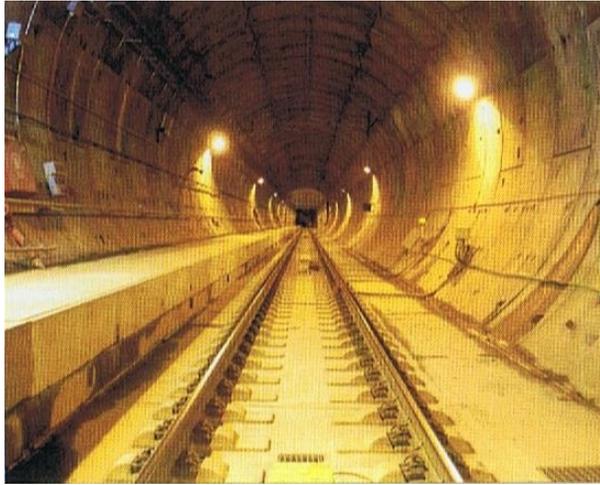
- Reducir los costes y operaciones de mantenimiento de la vía.
- Dificultad de poder mantener la calidad geométrica de la vía con balasto en los túneles y líneas de alta velocidad.
- Aumento del tráfico mixto experimentado en las últimas décadas.

Las situaciones que favorecen la implantación de la vía en placa son:

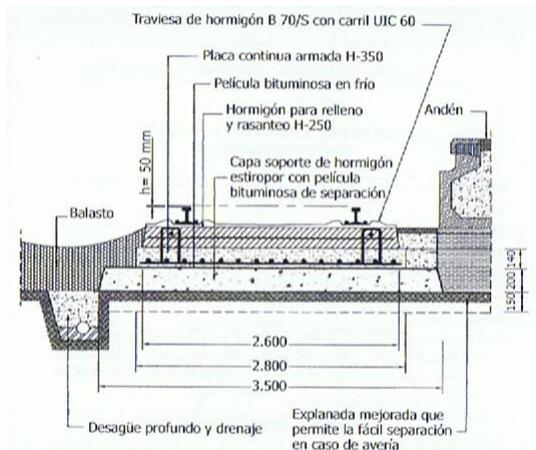
- Velocidades $\geq 250 \text{ km/h}$.
- Túneles de gran longitud (En Guadarrama y San Pedro se colocó el tipo RHEDA 2000).
- Líneas con gran cantidad de obras de fábrica, puentes y viaductos.
- Estaciones terminales y en las de parada obligada.
- Líneas que provocan un fuerte impacto ambiental y que, para evitarlo, la vía en placa permite la reducción de radios garantizando las mismas prestaciones.

- Líneas con mucha densidad de tráfico, a las que se les aplican valores límites a su trazado, aproximando el peralte de las curvas al límite de explotación admisible, y que están sometidas a tráficos pesados (tráfico no homogéneo).

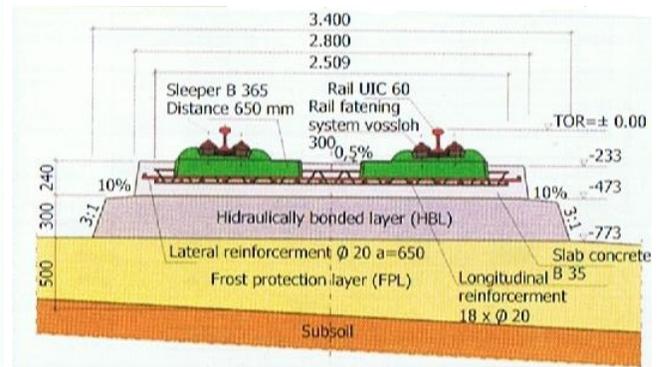
Países como Japón y Alemania, hace años que la utilizan obteniendo muy buenos resultados, debido básicamente por su mejora en las prestaciones de la vía y el reducido coste de mantenimiento. En general, los costes de mantenimiento de la vía en placa son del orden de una cuarta parte del coste de la vía en balasto.



(a) Vía en placa RHEDA 2000 en los túneles de Guadarrama.
Fuente:[1]



(b) Vía en placa tipo RHEDA Classic. Fuente: [1]



(c) Vía en placa tipo RHEDA 2000. Fuente: [1]

Figura 18: Secciones de vías en placa tipo RHEDA.

6.6.3. El problema del vuelo del balasto (schotterflug):

Un sencillo experimento con un ventilador muestra que a partir de los 180km/h de velocidad, del aire las piedras del balasto comienzan a rodar unas sobre otras y sobre la base y a volar las de $50 - 60$ gramos, y a los 210km/h vuelan la totalidad de ellas, incluida alguna de 395grs. de peso. Naturalmente el problema en vía es mucho más complejo, mayor cuanto más largo es el tren por las entradas y salidas del aire entre bajos y bogies, y los ensayos siguientes lo intentarán simular soplando contra los bajos y el bogie, pero teniendo en cuenta la enorme complejidad del problema y la enorme dificultad de la formulación matemática del fenómeno aerodinámico, esta prueba demuestra que el balasto vuela, y con una enorme velocidad, incluso a velocidades muy bajas del viento comparadas con los 350km/h del tren. Los remolinos de eje horizontal formados tras bogies y ruedas levantan las piedras, el viento generado las empuja, y la enorme velocidad de avance hace que se generen golpes violentos contra ejes, discos de freno y llantas, también destruye la banqueteta, perdiendo de esta forma la sujeción que requieren las traviesas.

Igual que una manguera que lanzara aire a 350km/h , el tren a Alta Velocidad levanta el balasto, que vuela y golpea entre carril y llanta y golpea en los bajos del tren. El peligro que esto supone, los reducidos costes de mantenimiento y otros factores han hecho que países como Japón (desde 1980) o Alemania (desde 1994) decidieran que todas sus nuevas vías de Alta Velocidad fueran en placa. Pero los grandes descensos de los terraplenes impiden poner vía en placa sobre ellos. Estos dos países limitan también los asientos post-constructivos de los terraplenes a 30mm .

La vía en balasto impide, por el vuelo de las piedras y el daño a llantas, carril y trenes, la circulación a velocidades superiores a unos 325km/h , y en numerosas ocasiones y pruebas los golpes comienzan a menores velocidades. Pero los grandes descensos post-constructivos de los terraplenes y pedraplenes impiden colocar vía en placa sobre ellos, porque rompería, y obligan a poner la vía en balasto. Por todo ello se están estudiando soluciones como por ejemplo, rejillas de metal sobre la capa de balasto, resinas inyectadas en el balasto o la vía en placa.

6.6.4. El problema de los asientos excesivos de terraplenes y pedraplenes

A diferencia de la carretera y los automóviles, la vía ferroviaria no permite prácticamente deformaciones en el plano vertical, porque los enormes esfuerzos en el punto de contacto entre llanta y carril hacen que una deformación vertical o deflexión del carril, por pequeña que sea, produzca unos esfuerzos dinámicos tan elevados que el coste de mantenimiento de la vía resulta inabordable.

En España, el uso de este tipo de superestructura no está todavía muy extendido ya que en nuestros trazados existen gran cantidad de terraplenes y rellenos de grandes dimensiones. La vía en placa exige asientos postconstructivos muy pequeños, ya que en caso contrario rompe. Por lo tanto los terraplenes y los rellenos se convierten en los principales enemigos si sus asientos son elevados. Generalmente a mayor altura de terraplén mayores asientos se producen, aunque depende de otros muchos factores como: tipo de terreno, compactación, método constructivo, etc. En Japón los asientos están limitados a 30mm y se considera que la altura máxima que han de tener estos terraplenes ha de estar entre 5 y 10m para poder garantizar el buen funcionamiento de la vía en placa.

Además de los descensos de los terraplenes, otro problema importante para los ferrocarriles de alta velocidad en lo que se refiere a los terraplenes es la llamada “velocidad crítica del tren”. En terrenos muy blandos y a velocidades elevadas del tren, se produce una “ondulación”

del terreno en el terraplén, fenómeno que consiste en la amplificación de los movimientos verticales de las partículas del terreno bajo el paso del tren. La colocación de la vía en placa mitiga este efecto.

6.6.5. Tendencias actuales en la plataforma ferroviaria

Tras lo publicado en el BOE del 24 de Julio, pag. 27705, hoy parece estar confirmado que para que los trenes de Alta Velocidad circulen a su velocidad actual de diseño de 350 o 400 km/h hay que sustituir la vía en balasto por vía hormigonada (vía en placa), porque los problemas del vuelo del balasto y el golpeo de las piedras a los frenos, ejes y bajos del tren no dejan otra alternativa ya que naturalmente no puede meterse a los pasajeros en un tren en semejantes condiciones. Pero la vía en placa no puede montarse en nuestros trazados porque rompería por los grandes descensos que sufren los altísimos terraplenes y pedraplenes que estamos construyendo. Se llega así a un tipo de trazado que países con orografía similar a la nuestra utilizan desde 1982. Bajada de la rasante de los túneles, gran aumento de su longitud, largos viaductos baratos y robustos que permitan utilizar agrícolamente el terreno que cruzan y eliminación de los terraplenes de altura mayor de 5 o 10 m [32].

El Ministerio de Fomento en Julio 2006 confirmó que la vía en balasto no permite circular al tren por encima de 280-290 km/h por el problema de su vuelo y el peligroso golpeo a llantas, bajos, frenos, bogies y ejes del tren. Y en consecuencia para que los trenes circulen sin peligro a los 350 km/h para que se diseñaron los nuevos tramos de Alta Velocidad instalar vía en placa, vía hormigonada sin balasto. Y ello a su vez exige, como hemos visto también, eliminar los terraplenes y cuñas de transición o bloques técnicos de los trazados ferroviarios, ya que sus grandes descensos impiden instalar la vía en placa, que rompería.

Ello puede llevar, a la necesidad de bajar las rasantes que se están proponiendo en la actualidad en los Estudios Informativos para la Alta Velocidad, a alargar los túneles reduciendo su número y a eliminar los altísimos viaductos y terraplenes, o al menos limitar su altura a menos de unos 9 m, como hemos visto que ya hace Japón.

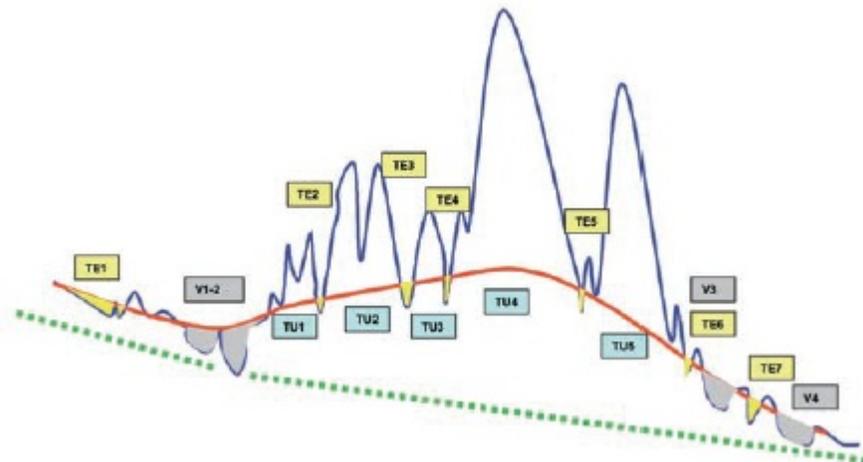


Figura 19: Esquema de un trazado de Alta Velocidad con numerosos túneles de pico y de una alternativa con túnel base más largo y profundo. Fuente: [33]

En la *figura 19* vemos el trazado de AVE en línea continua roja tiene 5 túneles cortos y muy próximos, con las boquillas a escasos metros una de otra. Necesita además 7 terraplenes, algunos de apreciable altura y exige además cuatro viaductos. Por el contrario, el trazado alternativo en línea de puntos verde elimina todos esos problemas y permite mecanizar y abaratar los trabajos, acortando además enormemente los plazos de puesta en servicio. El viaducto, con una entrevía generosa que permita la circulación de los futuros trenes anchos (hasta 3.5 m o más de ancho de caja) es tan caro o más que el túnel, pero el metro lineal de terraplén es más barato que el túnel, y probablemente ese es un factor clave a la hora de decidir el trazado, pero según los estudios del profesor Manuel Melis Maynar ello no es así, puesto que si se diseña el terraplén de forma que sus asientos postconstructivos sean muy pequeños, se trata adecuadamente el cimientado y el núcleo, su coste probablemente superará al del túnel largo dibujado en línea azul discontinua .

Además la vía en balasto exige un constante mantenimiento de la alineación en planta y alzado de la vía, con un constante levante por añadido de más espesor de balasto, y en unos 14 o 15 años el balasto queda inútil y hay que renovarlo, como hemos que ya ha ocurrido en el Paris-Lyon en Francia y en el Tokio-Osaka en Japón, y con mucho menor tráfico está ya próximo a ocurrir también en el Madrid-Sevilla. El túnel largo y profundo elimina de raíz esos problemas, y si tiene un diámetro suficiente (unos 11.5 m interiores libres) permitirá circular a los trenes –si tienen también potencia suficiente para vencer el rozamiento del aire, unos 10 MW –en su interior a velocidades de 350 km/h o superiores.

6.7. Sección transversal

La sección tipo de un túnel se define dimensionalmente por el gálibo y por su luz, y estructuralmente comprende tres partes: bóveda, hastiales o muros laterales y la contrabóveda o solera.

La sección de los túneles ferroviarios deben tener en cuenta la plataforma de la vía, el sistema de corriente, ventilación, etc; en galerías de pequeña sección ($10 - 12m^2$) se considera también el gálibo mínimo de construcción para permitir la entrada de equipos. En experiencias en trazados de alta velocidad se ha percatado de la importancia de otros efectos causados por la relación entre el tamaño de la sección y el del material ferroviario, con lo que los efectos aerodinámicos han sido ampliamente estudiados.

La geometría de la sección de un túnel se define mediante tres superficies:

- La línea de excavación total.
- La línea de sostenimiento (o cara exterior).
- La línea de revestimiento (cara interior).

Estos arcos de circunferencia, se definen analíticamente mediante los valores de los radios interior y exterior, y de sus respectivos centros de circunferencia, asociados a la bóveda y a ambos arcos laterales (a los cuales se les da valor nulo, $R = 0$, en el caso de ser hastiales verticales). Finalmente, se define la contrabóveda con el valor de su espesor mínimo y su radio.

6.7.1. Forma del túnel

La elección entre un túnel de dos vías y túneles gemelos de una sola vía dependerá de las consideraciones de construcción del túnel y de los costos, y también de los requisitos de operación. Entre los factores considerados están:

1. Construcción

- a) Volumen excavado.
- b) Longitud del túnel.
- c) Interacción de los esfuerzos en el túnel gemelo.
- d) Separación de los accesos y problemas de alineamiento.
- e) Secuencia de construcción y problemas de acceso, ventilación y drenaje.

2. Operación

- a) Aerodinámica y ventilación.
- b) Seguridad: colisiones e incendios.

La diferencia en el ancho se debe a que un túnel de doble vía requiere un ancho mínimo de unos $8,5m$ y uno de una sola vía aproximadamente de $5m$ después de tener en cuenta las tolerancias de seguridad. La altura mínima sobre los vagones es obviamente la misma, pero la diferencia en la altura máxima en la corona depende de la curvatura del arco del techo y, por consiguiente, de las características de la roca y del revestimiento seleccionado. Con la sección normal de herradura, es probable que el área del túnel de dos vías sea algo menor que el doble de la de un túnel de una sola vía, pero con una sección completamente circular, que es cada día más común debido al creciente uso de máquinas TBM o también en túneles subacuáticos, el aumento proporcional de la altura hace que el área del túnel más grande sea de más del doble. El área de la sección transversal no es, de ninguna manera, la única medida del costo, ya que los problemas de excavación y soporte en la construcción de túneles pueden aumentar en forma desproporcionada.

La construcción de un túnel similar y paralelo a otro ya abierto implica excavar un túnel a través de un terreno en el cual ya ha sido distorsionado el patrón de esfuerzos, ocasionando a su vez un cambio de esfuerzos en el túnel ya construido. Mientras mayor sea la separación, menos graves serán los efectos, y en este aspecto se deberá buscar la separación más amplia posible; se puede considerar un diámetro de túnel como un mínimo en un suelo moderadamente sólido. Tal vez sea necesario que los dos túneles converjan en los portales, si las dos vías se van a colocar en el exterior de la misma formación; pero esto puede dificultar más los problemas de la construcción del portal, porque pueden ser estratos superficiales, intemperizados y alterados. Por supuesto que, en un túnel largo, es relativamente fácil dejar durante la excavación una separación tan amplia como sea necesaria, según aumente la distancia desde el portal.

La seguridad operacional también puede influir en la selección. Por supuesto, no habrá temor de choques de frente en un túnel de una sola dirección; los descarrilamientos en una sola vía están limitados al tren de que se trata, mientras que en las vías dobles ambas líneas podrán quedar bloqueadas. Del mismo modo, un incendio parece ser un riesgo menor en túneles gemelos. En el caso de cualquier emergencia, se cuenta con una ventaja adicional; es posible usar el segundo túnel para que los viajeros evacúen el tren y para dar paso al equipo de rescate, siempre que haya conexiones transversales disponibles. Otra ventaja es que la mayor parte de las operaciones de mantenimiento y reparación se pueden llevar a cabo con mayor eficiencia ocupando un solo túnel, cuando se pueda desviar el tráfico a su gemelo.

6.7.2. Parámetros de diseño derivados de fenómenos aerodinámicos en túneles

Con el comienzo de la alta velocidad en Japón, el Shinkansen topó con la aparición de fenómenos aerodinámicos a la entrada de los túneles y durante la circulación a través de ellos.

Éstos se comenzaron a estudiar con ocasión de la construcción de la línea de alta velocidad entre Tokio y Osaka, a mediados del siglo XX, donde se vio la influencia del diámetro de la sección del túnel en dichos fenómenos y en el aumento de presión sobre el material ferroviario, y en consecuencia, sobre el pasajero.

Los fenómenos aerodinámicos se dan cuando la parte anterior del tren entra en el túnel, comprimiendo el aire a la entrada. La compresión se propaga como una onda a velocidad del sonido. Otra parte del aire comprimido se desplaza hacia los lados del ten, entre el convoy y el revestimiento del túnel. Así pues, a medida que avanza el tren en el túnel, la presión a la que se ve sometida la parte frontal y la superficie de rozamiento entre el lateral del tren y el aire aumentan. Tenemos por lo tanto dos inconvenientes claros: una variación de presión en el interior del tren que afecta al confort de los viajeros y un incremento de la resistencia al avance que dificulta la explotación a la velocidad requerida.

En cuanto al primer aspecto, se realizaron unos estudios en los túneles de la red Shinkansen en la línea Tokaido en los primeros años de explotación. Los primeros túneles tenían una sección transversal de $60m^2$. Los resultados quedan reflejados en la *figura 20* que representa los aumentos de presión medidos en el primer coche de una rama de la Serie 0 (primeros trenes de la Tokaido Line) circulando a $250km/h$. El incremento de presión producido en el interior del tren al penetrar un túnel puede causar molestias en los oídos de los viajeros. Se midieron valores de hasta $3kPa$. Para la red Shinkansen se determinaron unos límites de confort de unas diferencias de presión de $1kPa$ y de variaciones máximas de $200Pa/seg$. Los resultados del gráfico anterior superan estos límites. Estos límites son incluso más restrictivos que los publicados en la ficha 778-11 por la UIC. Ésto indica la sensibilización japonesa por el confort del viajero ya desde el inicio de la explotación de la alta velocidad.

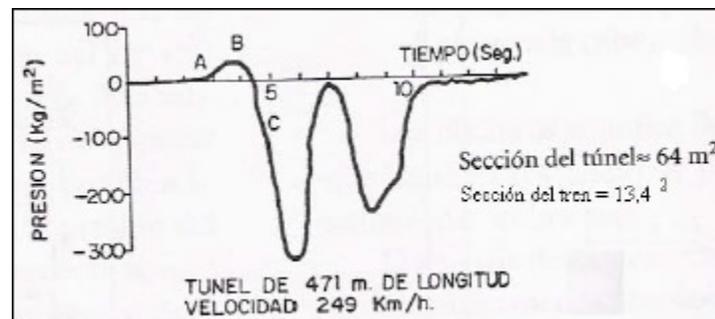


Figura 20: Variaciones de presión en el interior de un tren en la línea Tokaido. Fuente [2]

La generación de las ondas de presión depende de varios factores relacionados tanto con el tren como con el propio túnel. Analizaremos ahora los más representativos, como son las secciones transversales de los túneles y de los trenes.

Al cociente entre la sección del tren y la del túnel se le denomina coeficiente de bloqueo. Intuitivamente se puede entender que cuánto menor sea este valor, mayor será el espacio entre el material ferroviario y las paredes del túnel y menor será el efecto de las ondas de presión. Por lo tanto reduciendo la sección de los trenes o aumentando la de los túneles descendería este valor. En la *figura 21.a.* vemos como fue evolucionando la sección y la geometría de los trenes de la red Shinkansen para aumentar la velocidad de explotación de $210km/h$ a $260km/h$ (actualmente circulan a $270km/h$), reduciendo su sección desde los $13,43m^2$ de la Serie 0 hasta los $12,10m^2$ de los N 700 y adquiriendo a su vez un perfil cada vez más aerodinámico, permitiendo mayores velocidades en un mismo túnel. Estos cambios de diseño

tienen una gran importancia ya que el aumento de presión más significativo se da en el momento que el tren entra en el túnel. Rebajando el área transversal de los trenes, se rebaja también el coeficiente de bloqueo. En Japón también, al aumentar la velocidad de diseño de las nuevas líneas proyectadas Sanyo, Tōhoku y Joētsu se aumentó la sección de los túneles a unos $65m^2$, con algunos túneles de aún mayor sección. Es el caso por ejemplo de los túneles Shin- Kanmon (Sanyo) o el más reciente en Iwate – Ichinohe (Tōhoku), ambos de $80m^2$ [53]. La tendencia de incrementar la sección ha continuado con las líneas más recientes, es el caso del Kyūshū Shinkansen, donde todos los túneles han sido diseñados para una sección libre de $74m^2$. En el caso francés para velocidades de $270km/h$, J. Phillipe y A. Jourdan (1990) aconsejaban una sección mínima de $71m^2$.

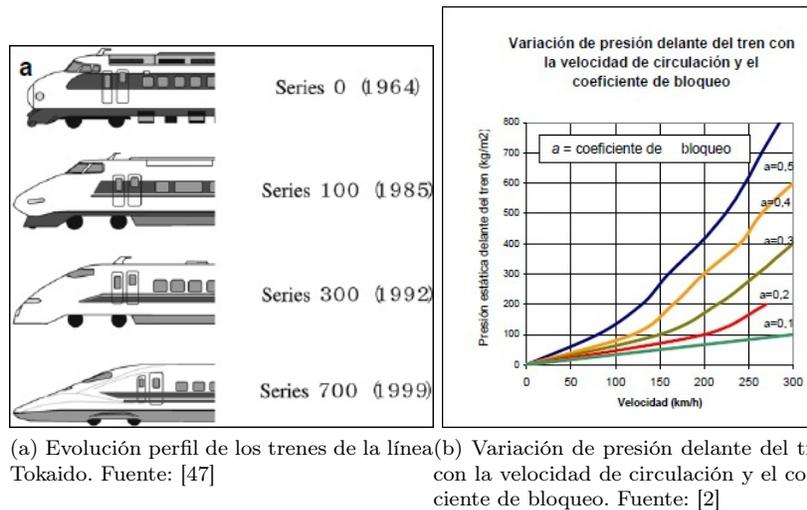


Figura 21

En la *figura 21.b*. vemos como aumenta el incremento de presión en el momento de entrar en el túnel. Nótese la acusada repercusión de la magnitud del coeficiente de bloqueo a medida que se incrementa la velocidad de circulación, sobre todo a a partir de 150 km/h. Hay que anotar aquí que tanto estudios técnicos como experiencias prácticas confirman que el incremento de presión es proporcional al cuadrado de la velocidad.

Otro factor importante para reducir los problemas derivados del incremento de la presión en los túneles es conseguir la estanqueidad de las ramas de alta velocidad. Sin embargo, en el momento actual se establece el criterio de que la sección de un túnel ha de ser tal que, para la máxima velocidad de circulación programada y en previsión de que los sistemas de estanqueidad no funcionen, el viajero no experimente variaciones de presión mayores a $10kPa$. La aplicación práctica de este criterio ha conducido al establecimiento de gráficos y estudios considerando la presión para distintas velocidades y secciones.

La longitud de los túneles también juega un papel importante en la propagación de ondas de presión en su interior. En los resultados representados en la *figura 22.b.*, vemos como ha medida que aumenta la longitud del túnel también lo hace la resistencia al avance. De forma análoga (*figura 22.a.*), también se considera el caso de un túnel de $100m^2$ de sección, la relación que debería existir entre el coeficiente de bloqueo (la relación entre la sección del tren y del túnel) y la longitud del túnel, para diferentes velocidades de circulación, de manera que no se supere el criterio de salud ($10kPa$).

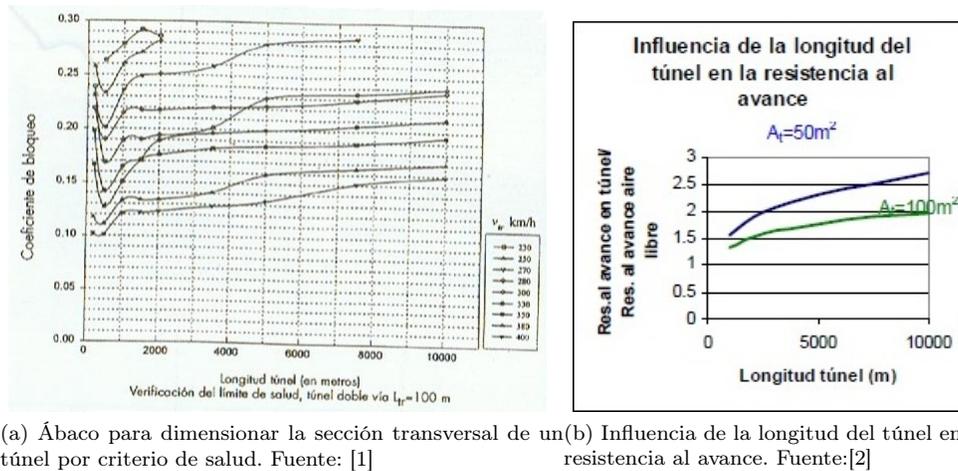


Figura 22: Relaciones coeficiente bloqueo, longitud túnel, resistencia al avance.

Vuelve a quedar clara aquí la necesidad de aumentar la sección libre del túnel, cuanto mayor es ésta, menor es el ratio entre resistencia al avance en túnel y al aire libre, para una misma longitud de túnel. Así pues, nuestra primera conclusión respecto a este último aspecto es la necesidad de aumentar la sección de los túneles para poder circular a grandes velocidades.

Existen otros condicionantes que intervienen en los fenómenos aerodinámicos. Se intenta reducir al máximo la rugosidad de las paredes del túnel. Es por ello que todas las paredes en las redes de alta velocidad están revestidas de hormigón, aunque las condiciones no requirieran el revestimiento. Además, en cuanto al tren, una elevada longitud conlleva un aumento del rozamiento del aire sobre las paredes del tren. Las ramas japonesas se caracterizan por longitudes elevadas de aproximadamente 400m en las líneas Sanyo y Tokaido frente a los 200m que pueden tener las alemanas y francesas.

La salida (o llegada) de las líneas de alta velocidad a las grandes ciudades no permite disponer de trazados en los que desde el primer momento sea posible circular a ese nivel de prestaciones. En consecuencia, es evidente que los túneles que sea necesario efectuar en esos primeros (o últimos) kilómetros se construirán con secciones transversales inferiores y acordes con la velocidad máxima practicable, en general, no superior a 160 – 200km/h.

La experiencia francesa en la explotación de líneas de alta velocidad ha conducido a disponer de los órdenes de magnitud de la sección transversal de los túneles en función de la velocidad máxima de circulación (*figura 23.a.*), así confirmamos como para las velocidades de circulación actuales se requieren secciones el doble de grandes que las que pudo alcanzar la línea Shinkansen, que como hemos ondocado con 60 m² no podían superar los 220km/h. El problema de la fricción aerodinámica y del diámetro necesario en el túnel se niega por algunos responsables, que han sugerido para los túneles de una vía el pequeño diámetro interior libre de 8.5 m, pero como vemos, para que el tren circule en el túnel a 300 km/h el diámetro interior necesario es del orden de 11.5 m. La solución dada en España ha sido prohibir la compra de AVE de 2 pisos [32] como los de Paris- Lyon o Tokio-Niigata, pese a que pueden transportar un 50 % más de pasajeros con sólo un 30 % de aumento de coste, pero el autor cree que los nuevos explotadores que entrarán con la liberalización pondrá sobre el tapete este grave problema, ya de difícil corrección.

También es un parámetro de importancia la entrevista, debido a los efectos aerodinámicos que tienen lugar en el cruce de trenes de viajeros y mercancías. En este ámbito, cabe señalar que

la tendencia en el ferrocarril de alta velocidad fue la de construir túneles de doble vía, salvo cuando las características del terreno aconsejaron recurrir a la solución basada en dos túneles de vía única, como en el túnel bajo el Canal de la Mancha y en el túnel de Villejust en la línea TGV-Atlántico, de 4,8km de longitud.

Sin embargo, en los últimos años y por razones de seguridad operacional se tiende a que, cuando los túneles alcanzan una cierta longitud, en torno a 10km, se construyan bajo la forma de dos tubos únicos, conectados entre sí por galerías de paso cada cierta distancia (≈ 200 a 300m). Como referencia, en la *figura 23.b.*, podemos ver el túnel de Le Perthus, bajo los Pirineos, perteneciente a la línea de alta velocidad Barcelona – Perpignan consta de 2 tubos de 8,3km de longitud con una sección transversal cada uno de 52m² para permitir la autopista ferroviaria (transporte de camiones sobre vagones y trenes comerciales de dos pisos), estando separados entre sí del orden de 20m.

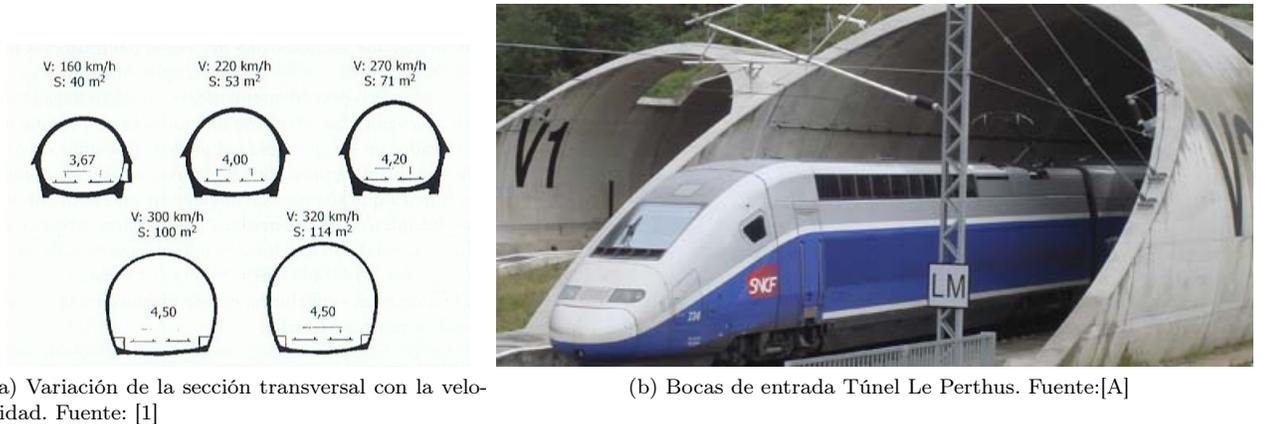


Figura 23

Parte IV

Construcción

Los métodos de excavación de túneles en roca son básicamente dos: la excavación mediante explosivos y la excavación mecánica mediante Topos, en macizos de roca dura, o TBM (Tunnelling Boring Machines), en roca blanda. La limitación de la excavación mecánica está en la dureza, tenacidad y abrasividad de las rocas, que pueden hacer el procedimiento antieconómico e inviable, en estos casos se hace necesario el empleo de explosivos.

En el caso de que la longitud del túnel no permita sacar rendimiento a la compra de una tuneladora (TBM) o escudos, en roca blanda o suelos, se usan métodos tradicionales mediante excavación mecánica con máquinas puntuales como rozadoras, martillos hidráulicos y excavadoras.

Los métodos de excavación subterránea son:

1. Excavación con explosivos.
2. Excavación mecánica con máquinas de ataque puntual.
 - a) Rozadoras o minadores.
 - b) Excavadoras con martillo hidráulico y fresadoras.
3. Excavación mecánica con tuneladoras no presurizadas (TBM convencionales).
 - a) Topos (TBM para rocas).
 - b) Escudos (TBM para suelos).
4. Excavación mecánica con tuneladoras presurizadas (TBM presurizados).
 - a) Los Hidroescudos (Hydroshields).
 - b) Los Escudos de Presión de Tierras (Herat Pressure Balance ó EPB).
 - c) El Doble Escudo (Double Shield).
 - d) El Escudo Mixto (Mixshield).

La variabilidad de los terrenos y de sus propiedades geomecánicas a lo largo del túnel, así como de las condiciones impuestas por el entorno (presencia de agua, construcciones próximas, etc.), plantea problemas con frecuencia constructivos por falta de adaptación de la maquinaria utilizada a situaciones muy distintas y dispares. La versatilidad de las máquinas debe, por tanto, tenerse muy en cuenta en el momento de hacer su elección.

7. Excavación mediante voladura de explosivos

La excavación con explosivos es un método muy utilizado en túneles de roca de resistencia elevada y alta abrasividad, y debido a que su sistema de trabajo es de gran flexibilidad, es en situaciones en que el trazado es de gran variedad litológica y geológica el que mejor se adapta a las condiciones del terreno.

El sistema consiste en la perforación de barrenos cargarlos con explosivos y detonarlos. Éste método se empezó a usar popularmente a partir del siglo XIX con el desarrollo industrial y

el inicio de la utilización del aire comprimido como fuente de energía gracias a la máquina de perforación a rotoperCUSión del ingeniero Sommelier en la construcción del túnel de Mont Cenis en 1861.

La explosión es, según Berthelot, «la repentina expansión de los gases en un volumen mucho más grande que el inicial, acompañada de ruidos y efectos mecánicos violentos» [13]. El objetivo esencial de la utilización de un explosivo en el arranque de rocas consiste en disponer de una energía concentrada químicamente, situada en el lugar apropiado y en cantidad suficiente, de forma que liberada de un modo controlado, en tiempo y espacio, pueda lograr la fragmentación del material rocoso.

La explosión consta de dos fases durante la detonación, un fuerte impacto debido a la onda de choque en un corto espacio de tiempo y una segunda fase de expansión de los gases a alta presión y temperaturas. Los gases producidos acumulan el calor generado, dilatándose hasta un volumen que puede ser unas 10.000 veces mayor que el del barreno donde se aloja el explosivo. La energía potencial liberada a través del proceso de detonación se transforma en energía cinética o mecánica [13].

7.1. Sistema de avance

El ciclo básico consta de las siguientes operaciones por este orden:

1. Perforación de barrenos
2. Disparo de las voladuras
3. Evacuación de los humos y ventilación
4. Saneamiento de los hastiales
5. Carga y transporte del escombro
6. Replanteo de la nueva pega

El sistema por voladuras permite la excavación a sección completa en secciones inferiores a $100m^2$ para un terreno formado por roca competente; o por fases en galerías de avance, método usado para la apertura de grandes secciones o cuando las características geomecánicas no permiten la excavación a sección completa.

La excavación por fases consiste en dividir el túnel en dos partes, una superior o bóveda y otra inferior en banco o de destroza. La bóveda se excava como si se tratara de una galería y la destroza, que irá retrasada con respecto al avance de la bóveda, se lleva a cabo por banqueo, el cual puede ser vertical u horizontal dependiendo de nuestras necesidades. En el método de banqueo hay un frente libre para la salida y proyección de material y permite una esquematización de las labores de perforación, lo que permite un mayor rendimiento en la obra. En la *figura 24*, podemos observar diferentes esquemas del sistema de avance, y del procedimiento de banqueo (*figura 25*).

Cuando la calidad de la roca es mala, es preciso, por lo general, dividir el túnel en varias secciones más pequeñas. Una técnica bastante común es la de abrir en la bóveda una galería piloto con una o dos destrozas laterales. Esa galería piloto, que sirve principalmente de reconocimiento, va adelantada con respecto a las destrozas, e incluso puede calarse antes de iniciar la perforación lateral permitiendo una mejor ventilación de las labores. La excavación de la bóveda se completa por lo general antes de iniciar el arranque de la sección inferior, aunque

en túneles anchos puede llevarse a cabo simultáneamente estableciendo un acceso entre el piso del túnel y la bóveda mediante una rampa lateral.

El problema en las voladuras en túneles es que la única superficie libre de salida es el mismo frente de ataque, por lo que se debe crear un hueco libre con los barrenos del cuele y contracuele los cuales explotan microsegundos antes que las cargas del resto de zonas y permiten la salida de la roca fragmentada del resto de zonas. El hueco ocupado generalmente es de una superficie de 1 a $4m^2$. La destroza requiere cantidades de explosivos entre 4 y 10 veces superiores a las voladuras de banco, puesto que hay errores de perforación, menor hueco de esponjamiento. En la *figura 26* observamos el esquema básico de las diferentes partes de la pega en la voladura.

Cueles de barrenos pueden ser paralelos o en ángulo, siendo usados principalmente los primeros ya que son mucho más fáciles de perforar mediante el uso de jumbos hidráulicos, con uno o varios brazos automatizados.

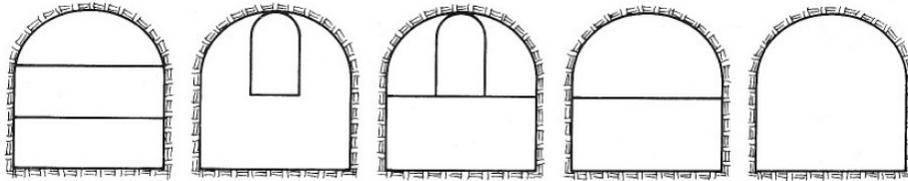


Figura 24: Sistemas de avance en la excavación de túneles y galerías. Fuente:[13]

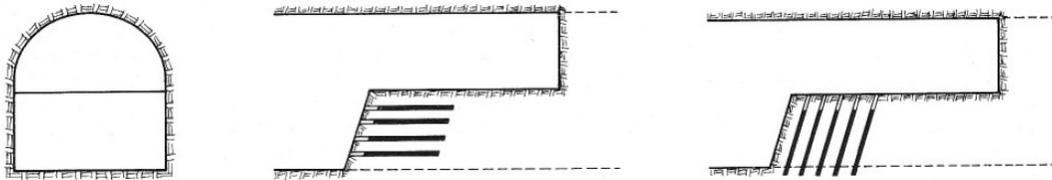


Figura 25: Banqueo vertical u horizontal en un túnel con avance en dos secciones. Fuente:[13]



Figura 26: Esquema de voladura. Fuente:[13]

7.2. Tipos de explosivos

Los tipos de explosivos son mecánicos, eléctricos, nucleares y químicos; siendo éstos últimos los de interés en la construcción. Las propiedades de los diferentes explosivos químicos nos permiten escoger el más adecuado a las diferentes condiciones del terreno: la presencia o no de agua, de gases inflamables en el ambiente, la existencia de líneas eléctricas próximas, etc. En el *cuadro 27* tenemos una relación entre los tipos de explosivos y sus condiciones de aplicación. La mezcla de los diferentes explosivos confieren diferentes propiedades en lo que confiere a su sensibilidad, potencia, resistencia al agua, etc.

Tipos de Explosivos:

1. Agentes explosivos secos
 - ANFO
 - ALANFO
 - Nitrato Amónico
2. Hidrogeles
3. Emulsiones
4. ANFOS pesados
5. Explosivos gelatinosos
6. Explosivos pulverulentos
7. Explosivos de seguridad

Los podemos clasificar en deflagrantes, como las pólvoras de muy poca utilización en ingeniería civil y minería; o detonantes, los cuales se dividen en Primarios y Secundarios. Los Primarios por su alta energía y sensibilidad se emplean como detonadores y multiplicadores de los Secundarios, los cuales son usados debido a mayor trabajo útil para el arranque de rocas y abaratar el coste de fabricación.

TIPO DE EXPLOSIVO	NOMBRE COMERCIAL	POTENCIA RELATIVA (%)	DENSIDAD (g/cm ³)	VELOCIDAD DE DETONACION (m/s)	CALOR DE EXPLOSION (cal/g)	RESISTENCIA AL AGUA	PRINCIPALES APLICACIONES
ANFOS	Nagolita	> 70	0,80	2.000	925	Mala	Voladura de rocas blandas y como carga de columna de barrenos
	Alnafo	>80	0,80	2.000	1.175	Mala	Voladura de rocas blandas y semiduras
	Naurita	> 70	0,80	2.000	1.108	Mala	Para barrenos con temperaturas elevadas
HIDROGELES	Riogel2	> 72	1,15	3.500	860	Excelente	Carga de fondo de barrenos Para trabajos subterráneos
	Riogur R/Riogur F	> 72	1,10	3.500/7.000	860	Excelente	Voladuras de contorno
EMULSIONES	Riomex E 20/24	> 65/> 70	1,15	5.000	713/863	Excelente	Carga de fondo de barrenos Para trabajos subterráneos
	Riomex V 20/24	> 67/> 72	1,25	5.000	694/869	Excelente	Carga de barrenos de mediano y gran calibre a cielo abierto
	Riomex V 150/154	> 67/> 72	1,25	5.000	655/852	Excelente	Carga de barrenos de mediano y gran calibre a cielo abierto
ANFOS PESADOS	Emunex 3.000	> 75	1,10	3.300	833	Mala	Voladura de rocas blandas y semiduras, y, carga de columna de barrenos
	Emunex 6.000/8.000	> 65/> 70	1,20/1,25	4.500	795/744	Buena-Excelente	Carga de barrenos de mediano y gran calibre a cielo abierto
GELATINOSOS	Goma 1-ED	> 90	1,45	6.000	1.205	Muy buena	Voladura de rocas muy duras a cielo abierto y en interior
	Goma 2E-C	> 85	1,40	5.200	1.114	Buena	Carga de fondo de barrenos Voladura de rocas duras a cielo abierto y en interior
PULVERULENTOS	Amonita 2-I	> 70	1,00	3.000	802	Débil	Voladura de rocas semiduras y blandas
	Ligamita 1	> 77	1,10	3.500	998	Mala	Voladura de rocas semiduras y blandas
	Permigel	> 54	1,10	2.800	705	Excelente	Explosivo Tipo II. Voladura en minas de carbón
EXPLOSIVOS DE SEGURIDAD	Explosivo de seguridad n.º 9	> 45	1,60	4.000	767	Excelente	Explosivo Tipo II. Voladuras en minas de carbón
	Explosivo de seguridad n.º 20 SR	> 37	1,15	1.800	537	Mala	Explosivo Tipo III. Voladuras en minas de carbón
	Explosivo de seguridad n.º 30 SR	> 35	1,10	1.700	358	Mala	Explosivo Tipo IV. Voladuras en minas de carbón

Figura 27: Características de los explosivos y principales aplicaciones. Fuente: [49]

7.3. Detonadores

Es de vital importancia la disposición de los detonadores de retardo o microretardo (hablamos de milisegundos), ya sean del tipo eléctrico o no eléctrico. Estos detonadores permiten secuenciar los tiempos de salida de cada barreno. Esto nos beneficia de formas distintas:

- Al secuenciar los tiempos de las explosiones, disminuyen las vibraciones enormemente ya que no se suman las unas con las otras.
- Permite disparar las diferentes zonas de la pega en distintos tiempos y de esta forma obtenemos nuevas caras de salida para los barrenos que todavía no han explotado y así evitamos el confinamiento.
- Voladura controlada y por lo tanto mucho más segura.

La secuenciación de una pega típica en sección completa sería: Primero detonan los barrenos del cuele (normalmente se dejan los del centro vacíos para obtener una cara libre), posteriormente detonan los barrenos del contracuele, después los de la destroza. Acto seguido los del recorte y finalmente los de las zapatas con los de las esquinas como últimos barrenos a detonar. En la *figura 28* podemos distinguir la numeración que indica el orden de detonación en la pega, vemos como los barrenos del radio exterior son los últimos en detonar, mientras que en el centro es donde ésta tiene lugar en su inicio.

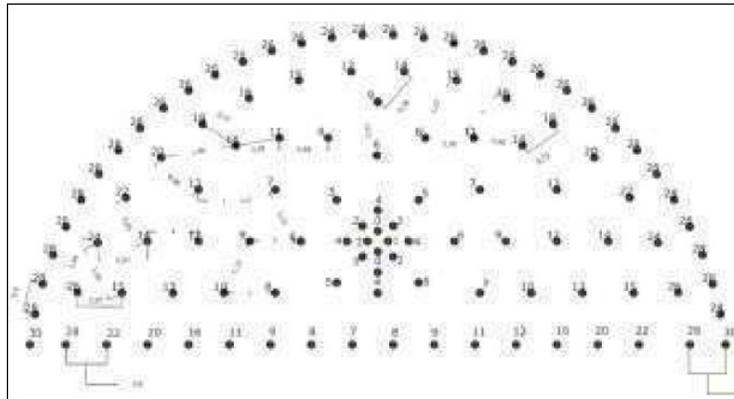


Figura 28: Pega en sección de avance de un túnel. Fuente: [13]

7.3.1. Detonadores eléctricos:

No es aconsejable utilizarlos en zonas próximas a líneas eléctricas. (Detonadores eléctricos de la UEE “Riodet”)

- Clasificación por su sensibilidad eléctrica: Sensibles (S), Insensibles (I), Altamente insensibles (AI).
- Clasificación por el tiempo de explosión: Instantáneos, Retardos 0.5 seg., Microretardos 30 ms., de 20 ms., Sísmicos <1ms.
- En función del uso: cápsula de aluminio (uso general), cápsula de cobre (uso en ambientes grisusos o inflamables).

7.3.2. Detonadores no eléctricos:

Son muy seguros y pueden utilizarse en cualquier lugar. Se detonan por onda de choque (utilizan pistola detonante o un detonador eléctrico), no por corriente eléctrica. (Detonadores no eléctricos de la UEE “Primadet”).

- Primadet MS: Microretardo (ms.)
- Primadet LP: Largo periodo (seg.)

7.3.3. Conectores (para no eléctricos):

Conectan líneas de detonadores no eléctricos y también disponen de retardos, por lo tanto los tiempos de retardo del conector se suman al del detonador.

- Primadet EZ Det
- Primadet EZ TL
 - Primadet NTD

8. Excavación mecánica

Los trabajos de construcción de túneles plantean una problemática específica como consecuencia de las limitadas dimensiones y accesibilidad del frente de trabajo, por una parte, y de las desfavorables consecuencias que puede acarrear en el medio circundante (roturas, deformaciones, filtraciones) la apertura de un hueco continuo en su interior, por otra parte.

La construcción de un túnel exige la aplicación de unos métodos y una sistemática de trabajo que permita la obtención de unos rendimientos adecuados, manteniendo, por otra parte, la estabilidad general del entorno afectado.

La variabilidad de los terrenos y de sus propiedades geomecánicas a lo largo del túnel, así como la de las condiciones impuestas por el entorno (presencia de agua, construcciones próximas...), plantea con frecuencia problemas constructivos por la falta de adaptación de la maquinaria utilizada a situaciones muy distintas y dispares [39].

Dureza, tenacidad y abrasividad de las rocas, es otra limitación de la excavación que encarece el proceso de construcción. En estos casos se usarían explosivos que hacen más económica la excavación.

Útiles de corte:

- Picas de fricción
- Cortadores de disco
- Cortadores de rodillo dentado
- Cortadores de botones
- Impactadores
- Cortadores vibrantes

Aplican la fuerza de la máquina en un punto provocando la progresiva indentación del terreno y su posterior rotura. Todas estas herramientas son usadas eficazmente cuando son combinadas en el sistema de producción.

8.1. Máquinas de ataque puntual

En el ataque puntual la potencia total del motor de corte y el peso de la máquina (fuerza de reacción) se concentran en una única punta cortadora lo que permite deteriorar rocas bastante duras. Hay dos tipos de sistemas de corte: el ataque frontal o ripping y el ataque lateral o milling (*figura 29.a.*). En la *figura 29.b.* podemos apreciar los diferentes cabezales usados para cada sistema de corte.

Ataque frontal: El cabezal de corte gira perpendicularmente al brazo soporte y las picas golpean la roca usando todo el peso de la máquina, aplicándolo de modo frontal. La máquina es capaz de deshacer rocas más duras y obtienes un mejor rendimiento.

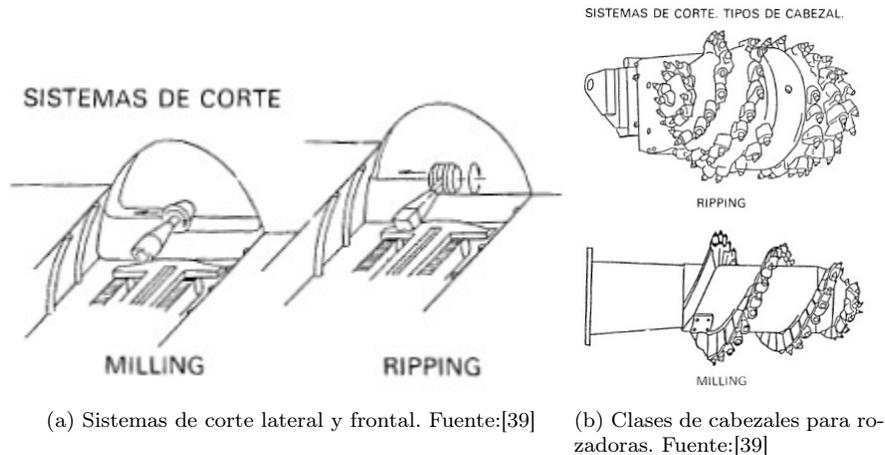


Figura 29: Características de los cortes tipo milling y ripping.

Ataque lateral: usa un cabezal de corte de forma cilíndrica o cónica, su eje de giro es paralelo al brazo soporte y el corte se aplica de modo lateral. La máquina al no aplicar toda la fuerza de la excavadora obtiene peores rendimientos, pero es muy útil cuando se quiera evitar la sobreexcavación debido a su mayor precisión al atacar las capas.

8.1.1. Rozadoras

Una rozadora es una máquina excavadora con un sistema de cabezal rotatorio con herramientas de corte sobre un brazo articulado, y un sistema de recogida y transporte de los escombros producidos del frente hacia la parte trasera.

El desarrollo de este tipo de máquinas comienza en la década de los 60 con las PK-3 rusas capaces de atacar rocas de hasta 35MPa [39]. Actualmente, gracias a la utilización de “water jets”, chorros de agua a presión sobre las picas, y el desarrollo de este tipo de máquinas; son capaces de atacar rocas de dureza comprendida entre 100 y 140MPa . No obstante, sólo son usadas en la construcción de túneles en terrenos poco abrasivos y de resistencias menores a 100MPa (en los que la longitud hace prohibitivo el uso de TBM).

La elección de la maquinaria depende de la resistencia del terreno, las condiciones geométricas, geomecánicas, la pendiente de trabajo superables por las máquinas y la presión que transmiten al terreno debido a su peso. Podemos observar en la *figura 30* dos rozadoras, que encontramos actualmente en el mercado, para ataque lateral (*figura 30.a.*) y ataque frontal (*figura 30.b.*), hay máquinas de menores dimensiones, pero a menor peso menor rendimiento, por lo que el gálbo junto con las condiciones del macizo toman peso al escoger la maquinaria.

El gálbo del túnel y el número de fases en las que se quiera excavar nos determinarán qué máquinas pueden emplearse, su geometría y altura.

La resistencia a compresión de la roca no depende únicamente de su naturaleza, el grado de facturación y la orientación de la estratificación influyen de gran manera en la resistencia del macizo.

El desgaste de las picas depende de:

1. La resistencia a compresión de la roca.

2. La resistencia a tracción.
3. La abrasividad.
4. La calidad y diseño de la pica.
5. El número de revoluciones de la cabeza.



(a) Rozadora de ataque lateral. Fuente: [R]



(b) Rozadora de ataque frontal. Fuente: [R]

Figura 30: Tipos de rozadoras en el mercado.

8.1.2. Excavadoras con martillo hidráulico y fresadoras

Estas máquinas son retroexcavadoras a las que se ha colocado en el brazo móvil un martillo hidráulico (Puntero), como la de la *figura 31*, o una fresadora (útil de corte similar al de la rozadora). Este tipo de máquinas también se usan en excavaciones de frente abierto y son apropiadas para macizos de rocas de dureza media y baja. Las máquinas, como todas las de ataque puntual son muy pesadas, para aplicar la fuerza sobre la roca. Será necesaria la utilización de una pala cargadora para extraer el escombros.



Figura 31: Máquina excavadora con martillo hidráulico. Fuente[R]

8.2. Métodos tradicionales de construcción de túneles

Los métodos se dividen entre los que realizan la excavación a sección completa, también llamados métodos de gran frente abierto; y los métodos de sección partida, que se diferencian básicamente entre ellos por el orden de ejecución y el modo de aplicación del sostenimiento en algún caso. En la *figura 32* podemos observar esquemáticamente cual es el proceso seguido en cada uno de los métodos, que a continuación describiremos.

8.2.1. Método Inglés:

Recibe su nombre por haber sido aplicado en túneles en un tipo de terreno que usualmente se localiza en Inglaterra, como son las arcillas y areniscas. Se aplico en la construcción del primer túnel bajo el Támesis, el cual se llevo a cabo gracias a un escudo de frente abierto. Consiste en excavar primero el avance mediante una galería central y después ensancharla lateralmente; a continuación se excava la parte inferior en tongadas horizontales.

8.2.2. Método Belga:

Basado en los principios de la construcción del túnel del Charleroi en el canal que enlaza Bruselas y Charleroi en 1828. Consiste en la excavación del avance de forma similar al método inglés, pero excavando la destroza en secciones verticales, a modo de zanjas, lo cual mejora el rendimiento de las máquinas a la hora de excavar la contrabóveda.

8.2.3. Método Alemán:

Desarrollado por Wiebeking en 1814, sigue el sistema de núcleo central. Empleado en la construcción de las amplias bodegas de cerveza de Baviera. Se utiliza para túneles de grandes luces, para construir estaciones, o cuando el terreno es inestable y no se puede descalzar parte de la bóveda para ejecutar los hastiales.

El sistema Alemán, como se puede apreciar en la *figura 32*, consiste en excavar en primer lugar los hastiales mediante dos galerías paralelas. A continuación se excava una galería central superior en la zona de la clave, y posteriormente se hormigona la galería inferior de los hastiales. Desde los hastiales se excava la bóveda con el sistema de “costillas”, esto es, mediante pequeños túneles que unen los hastiales con la galería de clave de forma alternante en forma de costilla. Se hormigona cada una de las semi-costillas desde la galería de clave, y posteriormente se hormigona ésta por tramos. De esta forma, quedan construidos la bóveda y los hastiales, para comenzar a excavar el núcleo central, que es el túnel propiamente dicho. Concluida la excavación de la caverna, se hormigona la contrabóveda.

8.2.4. Método Italiano:

La secuencia aplicada en el método Italiano fue aplicada en el primer túnel de San Gotardo en 1882. Consiste en una excavación por fases que empieza excavando en el centro de la bóveda y ensanchándose hacia los laterales. Posteriormente se empieza a descender por la parte central hacia la solera y finalmente se excavan los hastiales.

8.2.5. Método Austriaco:

Desarrolla un plan de trabajo basado en la utilización de puntales de madera formando un sistema de entibación.

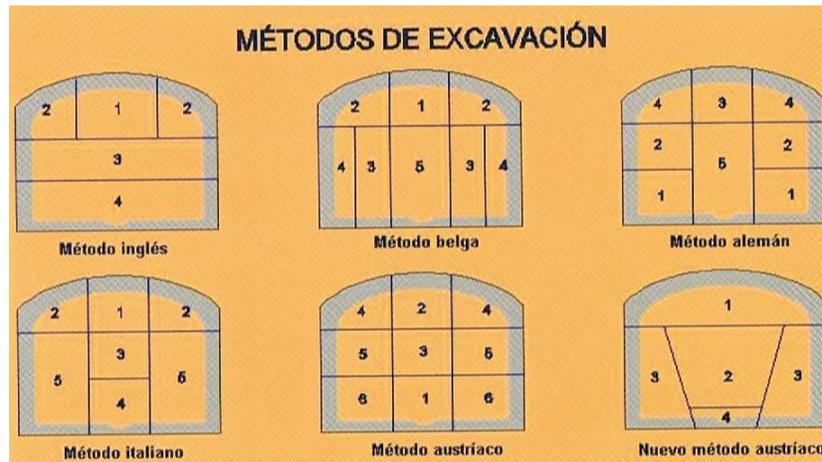


Figura 32: Secuencias de distintos métodos de excavación. Fuente:[44]

8.2.6. EL NATM (New Austrian Tunnelling Method):

El NATM ha sido uno de los métodos más utilizados. Consiste en excavar grandes secciones de túnel (en algunos casos, la sección completa) permitiendo que el terreno se auto-sustente, es decir, que el terreno forme un anillo de descarga en el perímetro de la excavación, permitiendo su deformación hasta un punto de equilibrio. Inmediatamente después, se coloca un revestimiento con el objeto de proteger la superficie excavada y controlar dicha deformación. Este método exige una detallada auscultación de las tensiones y de las deformaciones del terreno, a partir de las cuales, se aplica el revestimiento más adecuado.

El Prof. Ladislao Von Rabcewicz, inventor y pionero del Nuevo Método Austriaco (NATM) en Salzburgo, publicó en 1964 en la revista *Water Power* sus famosos primeros 3 artículos en que hacía público el método que ya llevaba aplicando muchos años. Éste no basa el diseño del sostenimiento provisional en las clasificaciones geomecánicas, sino en el empirismo y la experiencia [35].

En la ejecución el procedimiento se comienza por la excavación de la bóveda (más aproximadamente un metro de altura de hastiales), avanzando entre 1 y 3 metros de longitud. A continuación se coloca un sostenimiento provisional, habitualmente cerchas de acero unidas por tresillones metálicos, que en ocasiones se sellan mediante una capa de hormigón proyectado. Detrás, con un desfase de unos 18 m, se hormigona la bóveda con el revestimiento definitivo. Posteriormente, se excava la destroza en forma de caja central, dejando algo más de un metro de terreno próximo a los hastiales, para que sirva de apoyo a la bóveda y los empujes que ésta transmite no originen roturas. A continuación se excavan los hastiales por bataches al tresbolillo, y se hormigonan en una longitud similar a la de un anillo (aproximadamente 2,5m); y por último, se excava y hormigona la solera o contrabóveda.

La aportación de Von Rabcewicz fue extraordinaria, porque terminó con los enormes sostenimientos de hierro y madera utilizados con el Antiguo Método Austriaco y otros similares con los que se habían construido todos los grandes túneles alpinos y el resto de túneles hasta esa fecha. La noción del anillo de roca resistente circundante al túnel introducida por Kastner en 1962 posiblemente le llevó a esa extraordinaria idea y a la valiente innovación de sustituir esas enormes estructuras de sostenimiento (que a veces aseguraban llenaban de madera hasta un

tercio del volumen excavado del túnel) por una delgada capa de hormigón proyectado y a la creación del anillo de Kastner por medio de bulones [35]. Von Rabcewicz realmente cambió la forma de proyectar y construir los túneles desde entonces.

Para Von Rabcewicz la importancia de la contrabóveda y de cerrar el anillo en el sostenimiento provisional es fundamental. Indica también que el método sólo lo deben utilizar “engineers who have not only practical tunnelling experience, but also an extensive knowledge of rock mechanics” y que los trabajos sólo pueden hacerlos “experienced foremen especially trained in the method” [33].

El método fue ideado para proporcionar soporte seguro y económico en túneles excavados en materiales incapaces de soportarse por sí mismos, como roca muy rota e incluso suelos. Este método, que comenzó a utilizarse en los túneles en roca alpinos en 1962 progresivamente se ha ido aplicando poco a poco a suelos blandos, incrementando los riesgos asumidos en algunos casos. Tras los importantes colapsos sufridos en España (Túnel urbano de Silesio Delgado en Madrid y el colapso del Carmel en el Metro de Barcelona), o el hundimiento de los túneles de Heathrow en Londres y los del Metro de Munich y los problemas de estabilidad de alguna gran caverna bajo ciudades habitadas, se están comenzando a exigir en sus proyectos el estudio de la estabilidad del frente y el cierre inmediato de la contrabóveda.

8.3. TBM

Las máquinas TBM excavan el frente de roca a plena sección mediante la acción combinada de rotación y el empuje continuados de una cabeza provista de herramientas de corte convenientemente distribuidas en su superficie frontal.

Los topes actualmente son muy utilizados en la excavación de túneles en roca dura, sin embargo la idea no es nueva. En 1856 John Wilson fabricó la primera máquina, la cual fue probada sin éxito en el túnel ferroviario de Hoosac en Estados Unidos. No obstante, no mucho más tarde, en 1880, la máquina construida por Beaumont (*figura 33*), la cual funcionaba por el novísimo sistema de energía de aire comprimido, fue capaz de excavar un pequeño túnel piloto en Abbot's Cliff en el canal de la Mancha. El proyecto, secundado por Napoleón, en ese entonces era intentar unir Francia con Inglaterra mediante un túnel ferroviario, pero finalmente fue anulado por causas políticas, ya que eran épocas de intensos conflictos internacionales dentro de Europa.

Pero no fue hasta 1950 que hubo verdaderos resultados en torno de este tipo de máquinas. La firma Robbins de Seattle, diseñó una tuneladora de 7,72 metros de diámetro con la que consiguió avances diarios de perforación de 190 metros semanales. Más adelante, incluyó los cortadores de disco consiguiendo mejores resultados.

Todas las máquinas TBM tienen un funcionamiento parecido, disponen de herramientas de corte en la cabeza que permiten la fractura del material en trozos cuya retirada se pueda hacer con facilidad, detrás de la cabeza va el cuerpo de la máquina, el cual permanece fijo mientras la cabeza gira y empuja contra la roca mediante diferentes tipos de mecanismos. El escombros, en la mayoría de casos, es cargado en unos cangilones situados sobre la cabeza y evacuados mediante cinta transportadora hacia la parte trasera de la máquina donde son transferidos a otro medio para ser llevados hasta el exterior.

Todos estos elementos son comunes en los diferentes tipos de tuneladoras, pero dependiendo de si excavamos en roca dura o en suelos y de la variabilidad del terreno, las características de cada uno de estos sistemas varían.

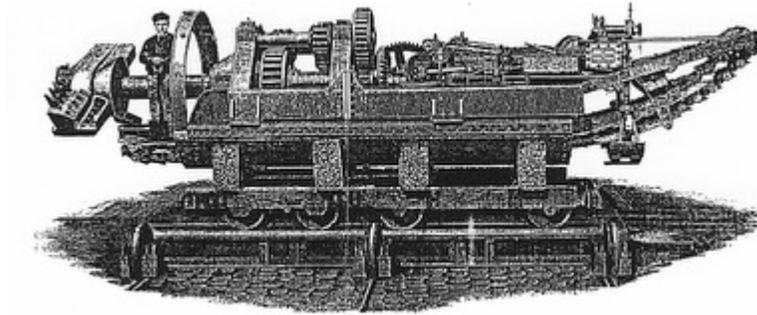


Figura 33: Máquina excavadora creada por Beaumont. Fuente: [P]

Para que el proceso resulte lo más económico posible se debe realizar un corte adecuado de la roca, fracturando ésta en lascas (“chips”) de un volumen y tamaño medio grande. Si el corte no es el óptimo se producen mayores desgastes de los cortadores (*figura 33*) y una disminución de la penetración y, por tanto, de la producción. El principio de corte óptimo es el “Kerf cutting”, éste consiste en:

- Una fracturación primaria, en la que las presiones del filo del cortador sobre la roca produce su trituración e indentación.
- Una fracturación secundaria realizada por roturas de tracción y cizallamiento entre dos cortadores contiguos. Esta fracturación es la que produce lascas en la roca y la que hace que el proceso de excavación resulte económico.



Figura 34: Detalle de un disco cortador. Fuente: [W]

Factores que influyen en el rendimiento de las máquinas:

- Efecto de la fuerza por cortador : para que se produzca la rotura en la que empiezan a producirse lascas, es necesario superar una fuerza umbral, que depende de la naturaleza de cada roca, y normalmente el empuje requerido por cortador debe ser dos veces la resistencia a compresión simple de éstas.
- Efecto de la separación entre surcos: reduciendo la separación entre cortadores se disminuyen los empujes necesarios para producir el efecto “kerf cutting” en la roca, sin embargo aumentar la reducción excesivamente puede aumentar el costo al aumentar la energía requerida por la máquina y el número de cortadores.
- Efecto del desafilado de los cortadores: el desgaste del cortador reduce su penetración y necesita, por tanto, mayores empujes para fracturar la roca, debido a que su superficie de contacto es entonces mayor.
- Efecto del número de revoluciones de la cabeza: a mayor número de revoluciones, mayor es el desgaste de los cortadores.

8.3.1. Tuneladoras para roca dura: Topos

El topo, generalmente, es una máquina abierta (no está protegido completamente con escudo) que avanza mediante los esfuerzos combinados del par de giro de su cabeza y el empuje longitudinal conseguido gracias a unas zapatas extensibles llamados codales hidráulicos o “grippers” que aplica contra la roca del hastial del túnel, con las que se fija la parte estática de la máquina. Podemos distinguir en las *figuras 35.a.* y *35.b.* como la tuneladora carece de ninguna protección contra desprendimientos y distinguimos en rojo en la *imagen 35.b.* los “grippers” laterales.

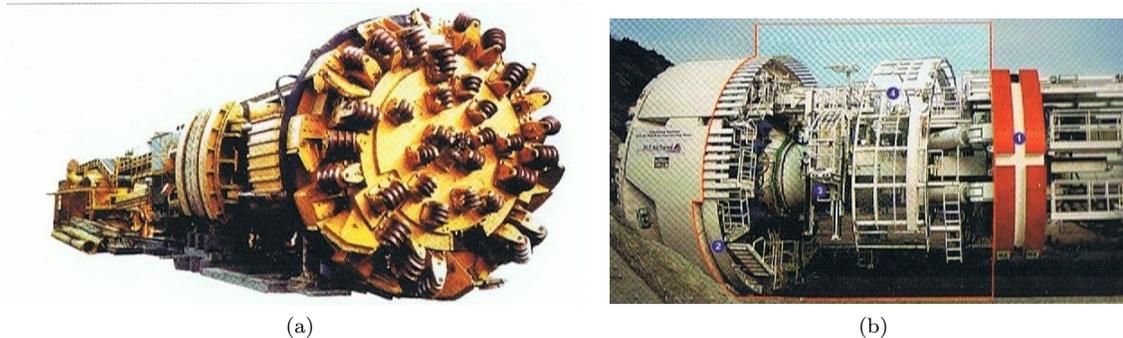


Figura 35: Tuneladoras tipo Topo. Fuente: [24]

La cabeza cortadora está dotada de discos de corte de aleaciones resistentes a la abrasividad de la roca, que giran libremente sobre su eje, éstos están colocados de manera que describen círculos concéntricos sobre la cabeza de ligera forma cónica para favorecer la indentación de la roca y el avance.

La rueda de corte se acciona mediante motores eléctricos con variadores de frecuencia y dos velocidades de giro, una larga de 8 – 10 r.p.m., y otra corta de (usualmente la mitad). En la rueda de corte también encontramos rastrillos y cangilones de desescombro. La máquina está diseñada para excavar en rocas duras y medias, por lo que no requiere la colocación del sostenimiento inmediatamente.

El proceso de rotura se produce por la presión inicial que el cortador produce en la roca, penetrando la parte central de la rueda y provocando las primeras fisuras, que de manera progresiva aumentan y gracias al movimiento conjunto de todos los discos provocan la indentación y fractura de la roca en lajas.

El anclaje mediante grippers fijan la tuneladora en la roca de los laterales de la excavación durante el avance del topo. Una vez fijada cuatro cilindros de empuje aplican la fuerza sobre el frente para que la rueda fracture la roca. El recorrido de los cilindros (1,5 – 2m) marca la longitud de cada ciclo de avance.

El back -up es el conjunto de plataformas e instalaciones de la parte posterior de la tuneladora, donde se encuentran los transformadores, los captadores de polvo, el sistema de ventilación, y principalmente el sistema de desescombro.

La parte superior del cuerpo delantero de la TBM que soporta la cabeza de corte y la zona de trabajo de los operarios de trabajos de sostenimiento está protegida por un escudo de acero contra caídas de bloques y piedras de la bóveda.

Para el sostenimiento en los casos de fracturación ligera o media del macizo, se utiliza la aplicación de bulones como primer tratamiento, incorporando a la máquina bulonadoras hi-

dráulicas y colocadores de cerchas, con dispositivos que buscan la mecanización del proceso. En terrenos con rocas meteorizadas o fracturadas el mejor sistema de sostenimiento es el hormigón proyectado o gunita.

En la *figura 36* podemos ver el esquema básico de una tuneladora tipo topo:

1. Rueda de corte
2. Rodamiento principal
3. Escudo de la rueda de corte
4. Kelly interior
5. Kelly exterior
6. Cinta transportadora
7. Accionamiento de rueda de corte
8. Soporte delantero
9. Soporte trasero
10. Motor eléctrico

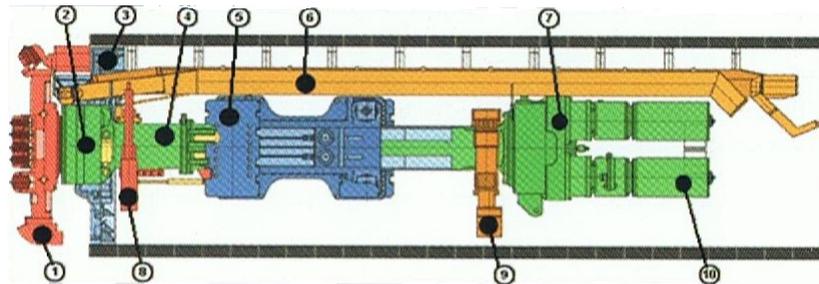


Figura 36: Esquema tuneladora tipo Topo. Fuente: [21]

8.3.2. Escudos

Un escudo originariamente, y en su idea más simple, es una estructura rígida y resistente que, introducida dentro del túnel, proporciona un área estable y segura en la zona del frente de trabajo, protegiendo éste contra el colapso de la bóveda y hastiales e incluso contra el colapso del propio frente de excavación. Ésta idea ya fue concebida por Marc Isamboard Brunel en 1818 (*figura 37*), y ya lo empleó con éxito en el primer túnel bajo el río Támesis.

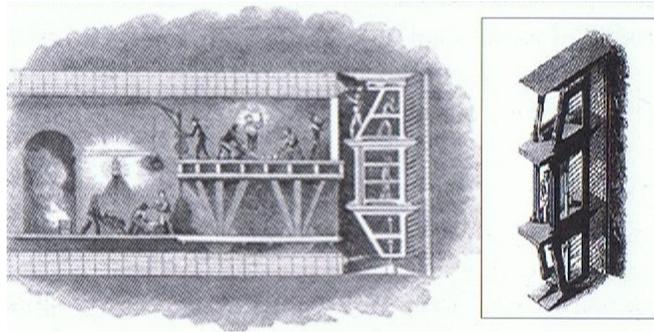
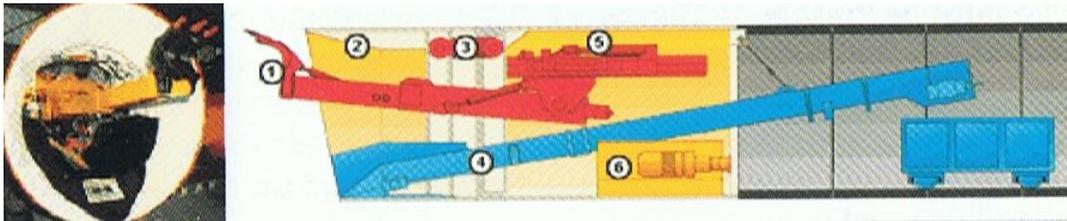


Figura 37: Escudo abierto Brunel empleado en el Túnel del Támesis. Fuente: [29]

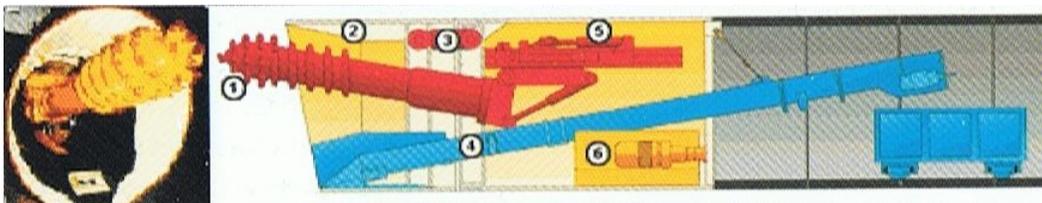
En 1869, en América, se introdujeron por primera vez gatos hidráulicos que se apoyaban contra un revestimiento de mampostería colocado detrás. Desde entonces se ha ido avanzando en su diseño. En 1901 apareció una máquina con cabeza de corte giratoria que soportaba seis brazos con cortadores y cinceles, en 1955 un escudo excavador que consiguió la notable cifra de avance de $110m/semana$, y demás innovaciones hasta 1967. cuando Robert L. Priestly desarrolló lo que fue el principio de los escudos tal y como los conocemos hoy en día, la máquina, llamada “Shielded Tunneling Machine”, consiguió un récord mundial bajo el río Essex (Massachusetts) con un avance de 434 metros en una semana. Ésta nueva máquina era empujada por once arietes mecánicos que se apoyaban en el revestimiento prefabricado que se colocaba detrás de la máquina. En su cabeza tenía cuatro brazos radiales provistos de picas de fricción, que luego serían sustituidas por cortadores de disco, la cual giraba sobre un soporte circular estanco que permitía el fácil acceso al frente. Con este nuevo tipo de máquina se consiguió un récord mundial de avance en terreno blando durante la perforación del túnel acueducto en el río Essex, en el que se consiguió un avance de $434m$ en una semana, con revestimiento incluido.

8.3.2.1. Tuneladoras para rocas blandas y suelos : Escudos El Escudo debe su nombre a que incorpora un sistema integral de protección, una carcasa metálica exterior, que le permite trabajar en terrenos inestables. Este elemento sostiene provisionalmente el terreno del frente de avance hasta el punto en el que se coloca el sostenimiento definitivo. El elemento de sostenimiento utilizado son anillos prefabricados de hormigón armado, formados por piezas llamadas dovelas.

Los primeros escudos, como recordábamos anteriormente, nacen al añadir una simple coraza metálica para sostener el terreno en el frente de excavación, ésta se usaba con todo tipo de equipos de excavación puntual, tales como excavadoras o rozadoras (*figuras 38.a. y 38.b.* respectivamente), éstos eran los denominados *escudos abiertos*, usados cuando el frente es estable y se trabaja sobre el nivel freático o terrenos impermeables. Los escudos con excavadora aún son utilizados principalmente en túneles con diámetros menores a $4 m^2$, como obras de colectores, oleoductos, etc, en suelos no cohesivos como arenas o gravas. Los escudos con rozadora, en cambio, tienen mayor rendimiento en rocas blandas y suelos compactos.



(a) Imagen frontal y esquema de un escudo abierto con excavadora. Fuente: [21]



(b) Imagen frontal y esquema de un escudo abierto con rozadora. Fuente: [21]

Figura 38: Tipos de escudo abierto.

El sistema de avance es similar al de los Topos, pero debido a que en éstos casos el terreno circundante es inestable se hace imposible la aplicación de los grippers en la zona de hastiales, por lo que la máquina avanza mediante el empuje longitudinal de una serie de gatos perimetrales que se apoyan sobre el sostenimiento de anillos colocado previamente. Éstos en cada ciclo, una vez realizado el avance, se retraen permitiendo la colocación de un nuevo anillo.

La cabeza consiste en una rueda que perfora el terreno accionada por motores que permiten una variación constante de velocidad entre 0 y 10 r.p.m. Para fracturar el terreno la rueda de corte utiliza las picas fijadas para terrenos blandos y los cortadores, rascadores o cinceles oscilantes para terrenos duros. Esta rueda de corte dispone además de una serie de aberturas, por las que el escombros arrancado pasa a una cámara donde es evacuado mediante una cinta transportadora.

En el segundo cuerpo de la coraza se encuentran los motores y los sistemas de mando y controles.

En un tercer cuerpo o cola del escudo están situados los cilindros de empuje distribuidos por toda la periferia de la máquina y equipados con zapatas articuladas que permiten un apoyo uniforme sobre las dovelas de revestimiento. La longitud de los cilindros marcan la distancia del avance de cada ciclo. También encontramos en la cola el erector de dovelas, el cual las coloca una a una hasta completar el anillo mediante un sistema hidráulico, de gran precisión y sensibilidad.

El back-up contiene las plataformas con transformadores, ventilación, depósitos para mortero de inyección, sistema de evacuación de escombros, la cabina de guiado donde están los mandos de pilotaje de la máquina, etc.

8.3.2.2. Escudos de frente cerrado

Hidroescudos Tuneladoras de tipo cerrado, en las que se inyectan lodos bentoníticos (propiedades tixotrópicas) en la cámara de la cabeza, que junto con el escombros producto de la excavación forman una mezcla viscosa, que se mantiene a presión para estabilizar el terreno

del frente. Se utiliza en terrenos poco cohesivos, rocas arenosas o terrenos granulares. En la *figura 39*, detalle de la cabeza del escudo con sus inyectores en funcionamiento.



Figura 39: Hidroescudo. Fuente: [21]

8.3.3. EPB (Earth Pressure Balance)

Los EPB o Escudos de Presión de Tierras son tuneladoras donde el sostenimiento del frente se realiza mediante un equilibrio entre la presión del terreno más el agua del propio terreno y la presión que se mantiene en la cámara de extracción de la cabeza del escudo. Éste sistema es válido para todo tipo de terreno inestable.

La evacuación del escombro en los escudos EPB se realiza inyectando una serie de productos que en forma de espumas o polímeros, se mezclan con el terreno y el agua que contiene, mejorando la plasticidad de la mezcla, y haciendo que su consistencia sea adecuada para el transporte, que se realiza mediante un tornillo sinfín. Para controlar el sistema de presión de tierra hay que vigilar el volumen de escombro desalojado por el tornillo equilibrándolo con el volumen excavado. Por lo que se realizan mediciones continuas de los detectores de presión localizados en la cabeza, cámara y tornillo.

Observamos en la *figura 40* el esquema básico de una EPB:

1. Rueda de corte.
2. Accionamiento de la rueda de corte , donde se pueden apreciar los motores eléctricos en la fotografía de la izquierda.
3. Cámara de excavación.
4. Sensor de presión.
5. Exclusa de aire comprimido.
6. Erector de dovelas.
7. Dovelas.

8. Cilindros de empuje.
9. Cinta transportadora.
10. Tornillo sinfín de extracción.

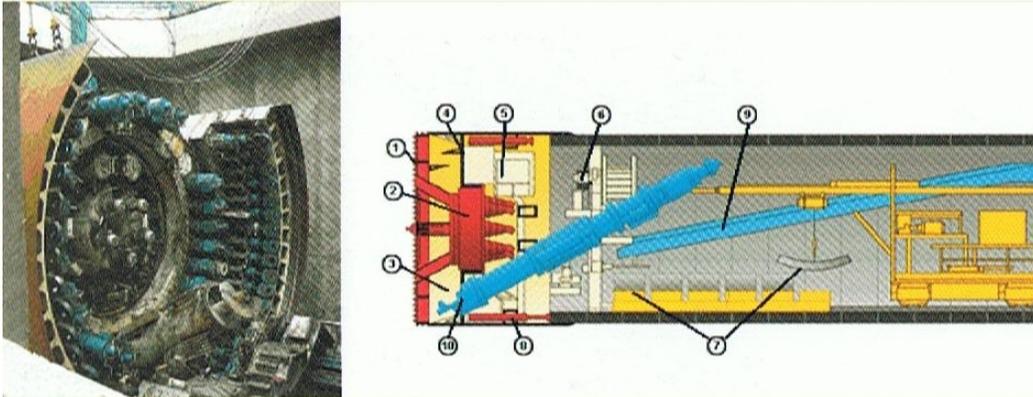


Figura 40: Esquema básico de un escudo de presión de tierras (EPB). Fuente: [21]

8.3.4. Doble escudo

Tiene características mixtas entre el topo y el escudo, concebido para avanzar mediante el apoyo de grippers en la zona de hastiales del túnel, en el caso de terrenos de roca dura, o mediante cilindros de empuje contra los anillos de dovelas, en zonas de menor calidad; esta dicotomía permite un mayor rendimiento. En roca de competencia media e incluso medio baja la excavación y la colocación del sostenimiento se realizan de manera simultánea. La excavación se ejecuta con el escudo delantero cuyo empuje se realiza por la reacción de los grippers contra las paredes de la roca y al mismo tiempo con el escudo trasero, se coloca el revestimiento.

En roca de baja competencia, la tuneladora de doble escudo trabaja como un escudo simple, el empuje se realiza por presión con los cilindros perimetrales contra el revestimiento colocado, mientras que los grippers se mantienen recogidos puesto que no se puede realizar el empuje contra los hastiales. El ciclo de avance se hace en dos fases independientes, primero se excava y después se coloca el anillo de revestimiento, reduciendo el rendimiento.

En muchos casos, el terreno presenta cambios notables de características, con rocas de naturaleza y estructura geológica totalmente distintas, por lo que estas máquinas están preparadas para trabajar en terrenos de geología cambiante e inestable.

En la *figura 41.b.* podemos apreciar la estructura soporte de la cabeza de corte, el rodamiento principal y la corona de cilindros de accionamiento en el escudo delantero, mientras que el escudo trasero contiene los grippers, el erector de dovelas y los cilindros de empuje. En la *figura 41.a.*, aparece el doble escudo al completo con la zona de back-up en la parte trasera.

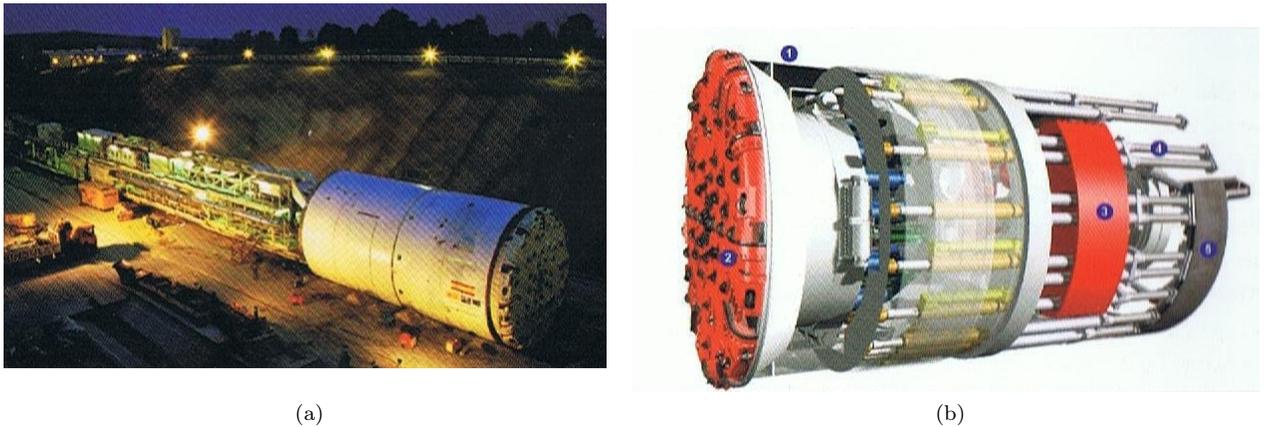


Figura 41: Tuneladora de doble escudo. Fuente: [21]

8.3.5. Escudo mixto. Mixshield

Máquina polivalente para excavar en diferentes tipos de geología, hoy en día es el método más utilizado para la construcción de túneles en zonas urbanas. Está dotada de las funciones básicas propias de un hidroescudo y de un escudo de presión de tierras (E.P.B.), además de poder trabajar como escudo abierto, e incluso con aire comprimido. Se suelen utilizar fluidos para sostener el frente de excavación y una suspensión de bentonita para transportar el material excavado. La suspensión de bentonita se trata en una planta separadora y se vuelve a incorporar al circuito

En la *figura 42* podemos ver el esquema básico de un escudo mixto:

1. Rueda de corte
2. Accionamiento de la rueda de corte
3. Suspensión de bentonita
4. Sensor de presión
5. Esclusa de aire comprimido
6. Erector de dovelas
7. Dovelas
8. Cilindros de empuje
9. Burbuja de aire comprimido
10. Mamparo sumergible
11. Machacadora
12. Tubería de extracción

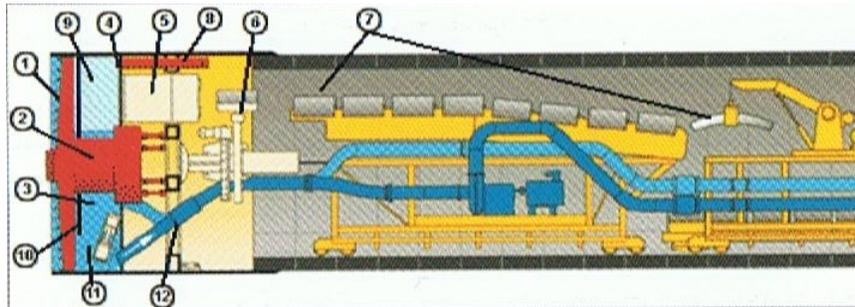


Figura 42: Esquema escudo mixto. Fuente: [21]

9. Sostenimiento

9.1. Tipos de revestimiento

1. Revestimientos flexibles (hormigón proyectado, pernos de anclaje, malla metálica, cerchas metálicas)
 - a) Una vez terminado el ciclo de excavación se procede a la instalación de malla metálica, pernos de anclaje y cerchas metálicas, que seguidamente son cubiertas por una capa de hormigón proyectado. Revestimiento bueno en situaciones con rocas meteorizadas y suelos cohesivos con gran contenido de arcilla o limo, ya que es necesario que el terreno donde se aplica permanezca estable sin sostenimiento durante al menos 90 min. En suelos no cohesivos sería necesario aplicar un tratamiento auxiliar previo de inyección o congelación. Este tratamiento no evita ciertos asentamientos.
2. Hormigón encofrado
3. Segmentos prefabricados
 - a) Anillos hechos con elementos prefabricados colocados inmediatamente detrás de la máquina. Pueden ser de material de fundición, de hormigón en masa (para diámetros menores a 4 metros) y de hormigón, los cuales son los más usados y económicos.
4. Hormigón extruido
 - a) Hormigón reforzado con fibras de acero bombeado de manera continua en el trasdós sobre un encofrado de forma anular que se desliza a medida que avanza la excavación. EL hormigón aguanta el terreno, minimizando los asientos. El avance es continuo, lo que aumenta el rendimiento.

Revestimientos permanentes

Son necesarios en la mayor parte de túneles, siempre en terrenos blandos, y frecuentemente en las rocas. Se colocan con dos fines: estructuralmente para contener y soportar el terreno expuesto, y operacionalmente para proporcionar una superficie interna que sea adecuada a las funciones del túnel.

Requisitos principales

- Proporcionar el apoyo estructural necesario.
- Controlar o eliminar la entrada o escape de agua.
- Ajustar las sección transversal de operación.

9.2. Dovelas de revestimiento

Elementos prefabricados de hormigón armado que se atornillan entre sí formando un anillo cilíndrico. En algunos casos tienen forma troncocónica, de forma que colocando las caras convergentes contiguas permiten el trazado de alineaciones curvas (tanto en planta como alzado).

Estos anillos de dovelas, que como elemento de revestimiento están perfectamente adecuados, una vez colocados se completan con la inyección en su trasdós de mortero, así se evitan desplazamientos, asentamientos y roturas de dovelas.

En cada uno de los anillos existen diferentes tipos de dovelas:

1. *La dovela de solera*: colocada siempre en la misma posición, en la parte inferior del túne, y que se suele llevar incorporada la plataforma de vías y una canaleta de desagüe.
2. *Dovelas adyacentes*: de distintos tamaños para evitar juntas en forma de cruz, y que predominen las juntas en forma de T, más seguras ante posibles filtraciones.
3. *Dovelas de contrallave*: simétricas y con un borde inclinado, colocadas de forma adyacente a la llave.
4. *Dovelas de clave o llave*: la última pieza en ser colocada, completa el anillo, colocada por encima del eje horizontal y en muchas ocasiones situadas en forma alternativa al ejevertical.

En la *figura 43.a.* podemos ver la diferente geometría de cada dovela que forma el anillo. El número de dovelas que forma un anillo depende del diámetro de éste, por ejemplo, en el caso de los túneles del Guadarrama (Madrid – Segovia), con un diámetro interior de 8,50 metros, lo componen siete dovelas. En los túneles de la M-30 en Madrid, cuya sección interior es de 13,50 metros de diámetro, se han utilizado diez dovelas en sus anillos.

Existen dovelas de forma hexagonal, usado en túneles de gran longitud y trazados rectos.

Hay dos tipos de encaje:

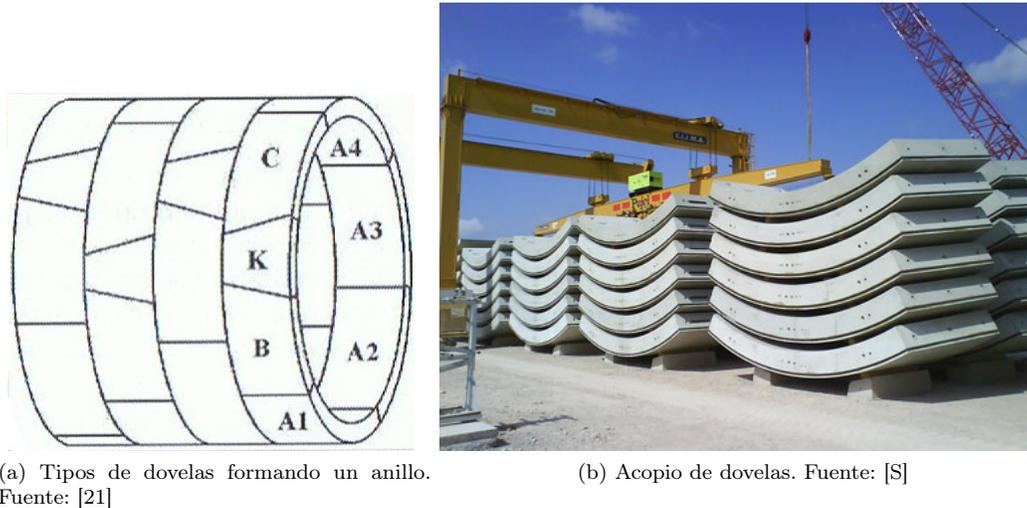
Radial: por juntas lisas con rebaje para su banda de impermeabilización o estanqueidad, juntas machiembradas y juntas concavo-convexas. Unidas mediante tornillos de acero cuya presión encaja las dovelas.

Circunferencial: formado por la junta entre dos anillos consecutivos, cuyas caras e dovelas suelen ser planas. Se encajan por la presión que hacen los gatos hidráulicos de la tuneladora al apoyarse en el último anillo colocado.

Las dovelas se almacenan (*figura 43.b.*) en zonas lo más próximas a las bocas de entrada de la galería o zonas de acceso, desde donde son transportadas desde el exterior mediante trenes y vagonetas hasta el back-up, y llegan hasta la cabeza mediante el alimentador de dovelas que se desliza por la solera hasta el erector que las va colocando.

El erector de dovelas es un brazo mecánico con una gran ventosa que mediante vacío, recoge las dovelas y las coloca cada una en su posición de forma rápida, precisa y con total seguridad.

Una vez colocadas se rellena el hueco entre la excavación y el trasdós con inyección de morteros, hormigones finos o lechadas, dependiendo del espacio existente. Este relleno además de dar mayor resistencia y estabilidad, previene de posibles filtraciones.



(a) Tipos de dovelas formando un anillo. Fuente: [21]

(b) Acopio de dovelas. Fuente: [S]

Figura 43: Esquema y detalle de dovelas de hormigón armado.

10. Esquema del proceso constructivo de túneles

■ EJECUCIÓN DE LA BOQUILLA

Consiste en perforar y reforzar el frente del túnel denominado boquilla, mediante bulones de sostenimiento y su posterior atado a base de mallazo y gunitado.

- Replanteo de la boquilla.
 - Marcar y trazar en la superficie frontal (pared) el arco que será la boca del túnel. Para ello es necesario efectuar unos taladros en el frente de la excavación para colocar posteriormente las vainas donde se alojarán los bulones. Los bulones son barras de acero que tienen la misión de unir los estratos alrededor de la sección excavada para formar una bóveda natural. Los bulones quedan anclados por adherencia al mortero o resina que se introduce en el fondo y a lo largo del taladro. El extremo en el exterior del taladro dispone de rosca para tuerca y arandela plana que se ajusta contra la superficie de la roca.
- Perforación de un anillo de sostenimiento.
- Colocar bulones en el anillo de sostenimiento.
- Colocación de mallazo en el frente.
- Gunitado del perímetro de la boquilla.
- Perforación del frente.
- Voladura del frente.
- Retirada de material.

- Sostenimiento de la bóveda.
- Gunitado de la bóveda.
 - La gunita se define como “ un mortero u hormigón transportado a través de manguera y proyectado neumáticamente sobre un soporte” . En la actualidad existen tres procesos diferentes de proyección, que son: Sistema de proyección por Vía Seca, Vía Semihúmeda y Vía Húmeda.
- AVANCE (proceso que se repite por tramos hasta terminar la perforación)
 - Perforación del frente de la bóveda.
 - Voladura del frente.
 - Retirada del material de voladura.
 - Sostenimiento de la bóveda.
 - Gunitado de la bóveda.
- DESTROZA
 - Perforación del suelo de la bóveda.
 - Voladura del suelo.
 - Retirada del material de voladura.
 - Sostenimiento de los hastiales.
 - Gunitado de los hastiales
- CONSTRUCCIÓN DE LA CONTRABÓVEDA

Esta fase de obra se realiza cuando las condiciones geológicas del terreno hacen necesario un refuerzo de la sección del túnel en la zona contraria a la bóveda. Las secciones varían de unos proyectos a otros pueden ser soleras hormigonadas de cierto grosor y planas, o secciones ovoidadas de la contrabóveda.

 - Excavación de la contrabóveda y transporte de material.
 - Colocación de armadura en la contrabóveda.
 - Hormigonado.
 - Consiste en verter y vibrar el hormigón contenido en la cuba del camión hormigonera en toda la superficie de la contrabóveda. Para realizar esta tarea se emplearán camión hormigonera, retroexcavadora para verter el hormigón en zonas concretas y vibro para realizar un vibrado de la losa.
 - Relleno con zahorras.
- IMPERMEABILIZACIÓN DE LA BÓVEDA

La tarea consiste en la colocación de manta geotextil sobre toda la superficie de la bóveda y posteriormente la colocación de láminas plásticas soldadas mediante calor y sujetas a la bóveda mediante elementos de unión. Este proceso se repite de forma cíclica.

- Traslado a obra y desplazamientos interiores.
- Traslado de materiales hasta el lugar de trabajo.
- Montaje de andamios y plataformas de trabajo.
- Impermeabilización de túneles
- Impermeabilización de falsos túneles.

■ HORMIGONADO DE LA BÓVEDA MEDIANTE CARRO DE ENCOFRADO

Esta fase se realiza de una forma cíclica colocando un carro de encofrado metálico en la bóveda del túnel, en su interior se inyecta hormigón por medio de una bomba de impulsión, una vez fraguado este, se realiza el desencofrado del carro y su posterior limpieza para en cada puesta y hormigonando cada una de ellas mediante hormigón inyectado en dicho molde.

- Montaje de carro de encofrado.
- Colocación del carro en la puesta.
- Hormigonado de la puesta.
- Desencofrado y limpieza del carro.

■ COLOCACIÓN DE INSTALACIONES (tubería de incendios, tubería de saneamiento)

Parte V

Seguridad

11. SEGURIDAD

La seguridad en el interior del túnel es un asunto capital, que influye principalmente en el diseño de partida de éste, en la primera fase de planificación. Se toman decisiones en ese punto como diseñar la galería con vía única o doble, qué intervalo tomar entre cada punto o pozo de acceso o cada cuantos metros construir una conexión entre ambos túneles (en el caso de túneles de doble tubo). También las instalaciones y circuitos de seguridad necesarios se deben tener en cuenta en el diseño, para optimizar su uso cuando el túnel esté en servicio.

11.1. Rutas de evacuación

Estos túneles deben tener un plan de autoprotección, que permita la evacuación de los pasajeros de un tren en situación de máxima emergencia: este puede ser el caso del incendio de un tren, con emisión de abundante humo. En estas circunstancias, el túnel tiene que estar proyectado de manera que la evacuación a una “zona segura” se pueda realizar en pocos minutos (no más de 6-10 minutos).

Esta evacuación debe realizarse de forma segura, lo que exige como mínimo cumplir con las siguientes condiciones:

- Tener unas rutas de evacuación paralelas a la vía, que permitan descender del tren y alejarse del mismo hasta acceder a una zona segura. Pueden ser aceras o andenes de anchura no inferior a 1 m situadas a una altura de entre 20 y 40 cm, sobre cabeza de carril.
- Estar señalizadas e iluminadas convenientemente, así como libres de obstáculos.
- Estar dotadas de elementos como: suelo antideslizante, pasamanos a un lado, etc.
- Mantener unas condiciones medioambientales aceptables. Para ello debe poder ejercerse un control sobre el humo generado, lo que puede obligar a la ventilación forzada del túnel.

11.1.1. Zonas seguras

Se considera “zona segura” aquella en la que, por un tiempo indefinido, las personas pueden permanecer sin riesgo por las consecuencias del accidente. Estas zonas deben tener siempre:

- Una salida segura al exterior.
- Control sobre las condiciones ambientales: temperatura, visibilidad, toxicidad, etc.
- Condiciones para permitir la estancia de un gran número de personas, mientras llegan los medios de rescate.
- Sistema de comunicación con el Centro de Control, así como equipos de primeros auxilios.

Si es posible será bueno que el túnel tenga salidas intermedias al exterior, mediante la utilización de pozos o galerías con longitudes razonables (no superiores a unos 2 km), y preferiblemente situadas en el punto medio del túnel ya que es el más peligroso. Aunque en muchos casos esto no será posible.

Generalmente se construye en mitad del túnel refugios con zonas de Parada Preferente para los trenes, ya que son lugares habilitados para realizar una evacuación más segura del tren.

Los refugios no pueden considerarse zonas seguras si no tienen una salida independiente del túnel en el que se ha producido el accidente. Por la misma razón que lo anterior, esta solución no es posible muchas veces si el túnel es de sección única.

11.1.2. El túnel paralelo

Una solución buena es considerar como zona segura el túnel paralelo al del accidente, en los casos de sección con doble tubo. Para ello, debe poder asegurarse:

- La posibilidad de acceder al mismo en pocos minutos: esto exige galerías de conexión entre túneles, separadas a menos de 500 m.
- Mantenerlo limpio de humos: esto exige la colocación de puertas estancas resistentes al fuego, y la necesidad de mantener una sobre-presión en este túnel mediante sistemas de ventilación para evitar que entre humo.
- Comunicación con las personas evacuadas desde el Centro de Control; desde donde se darán las instrucciones a seguir en la asistencia médica y evacuación.
- Control de la circulación de trenes: de forma que se asegure, en caso de accidente, la parada inmediata de los trenes en circulación, en ambos tubos.
- Rescate del personal evacuado mediante un tren enviado y controlado desde el Centro de Control. Este tren circularía por el túnel paralelo al del accidente “zona segura”.

Esta solución, y con estos criterios de seguridad, son los actualmente aceptados en diversos grandes túneles: Lötschberg, Guadarrama, Pajares, etc.

11.1.3. Galerías de conexión

A raíz de dos accidentes ocurridos en agosto de 2003 en las obras de dos túneles paralelos, se exige por parte del promotor el llevar la excavación de ambos tubos de forma simultanea. De esta manera se pueden ir construyendo a medida que avanzan los túneles principales, algunas de las galerías de conexión transversal, y así se reduce significativamente el riesgo para los trabajadores en caso de accidente, ya que se dispone de una vía de escape por el túnel paralelo. No conviene superar los 1.000 m del frente de excavación sin tener una galería de conexión transversal habilitada, esto supone una relación de ejecutar una galería de cada tres. En la construcción de los túneles de Abdalajís, Guadarrama y Pajares ya se utilizó esta técnica.

11.2. Seguridad frente a incendios

Los terribles incendios en los túneles de Mont Blanc y Tauern en 1999 pusieron de manifiesto la existencia de un problema potencial en las infraestructuras de transporte, a las que se sumaron en agosto de 2001 las muertes de ocho personas en el túnel de Gleinalm, y en octubre la de otras 11 en el de San Gotardo.

Las infraestructuras son generalmente soluciones a problemas sociales y económicos que se traducen en el desarrollo y bienestar de la comunidad., es por ello que se hacen imprescindibles hasta el punto de provocar la exasperación de los usuarios en casos de mal funcionamiento. Precisamente que el accidente sea insoportable es una característica que muestra la doble faceta del quehacer ingenieril: por un lado el éxito es claro ya que su falta produce el sentimiento de sorpresa , pero por otro muestra los fallos de previsión y por tanto, la limitación de nuestros conocimientos.

Como en otras ramas de la ingeniería, las infraestructuras se construyen mediante la toma de decisiones sobre datos incompletos. El riesgo es natural, está en las raíces del saber, de nuestros valores y de nuestras emociones. Es decir, en las base de nuestra existencia.

Sin embargo, en las infraestructuras la percepción del riesgo por parte del usuario es distinta de la del ingeniero. Éste, intentando actuar de forma objetiva, pondera los beneficios frente a la peligrosidad y cuando juzga que el balance es positivo, acepta el invite.

El usuario por su lado, sólo ve que el número de afectados es generalmente grande y que , de ninguna forma él esperaba un fallo: el carácter habitual del uso le ha conducido a una percepción equivocada de seguridad absoluta.

Estos factores psicológicos ponen de manifiesto lo difícil de la objetividad en la fijación de lo que pueda ser considerado como riesgo admisible.

Hay diferencias sustanciales entre los variados tipos de túneles de tráfico. Así en los de carretera la circulación es generalmente aleatoria con muchos vehículos y pocos usuarios lo que hace que en situaciones de servicio imperen las condiciones de confort relativas a iluminación y ventilación mientras que en el caso de accidente con fuego sea fundamental el tipo de vehículos para fijar la potencia de cálculo del incendio.

Por contra en los túneles de ferrocarril el tráfico es regular pero a cambio, la salida masiva de viajeros en caso de accidente crea una problemática especial en cuanto a la evacuación. Si se trata de ferrocarriles metropolitanos ella se ve incrementada por la interconexión entre túneles y la posible extensión de humos.

11.3. Consideraciones exclusivamente respecto a los túneles

Generalmente, en todos se observa la acumulación de circunstancias erróneas típicas de los accidentes graves: en proyecto, en construcción y en explotación, pero también fallos achacables a la normativa o a factores sociales.

En cuanto a proyecto probablemente el error más grave ha sido la subestimación del crecimiento del tráfico, que con la internacionalización del mercado, ha sufrido un desarrollo imparable. Se observa así la existencia de túneles estrechos con circulación en doble sentido sometidos a tráfico desahorados. Por ejemplo Mont Blanc tiene una calzada con anchura de tan sólo 7 m incluyendo los dos carriles.

El tráfico en San Gotardo era del orden de los 20000 vehículos diarios con un porcentaje de camiones de alrededor del 40 % circulando por una calzada. De 7,8m.

Cabe decir que el 70 % de las víctimas mortales que se han producido en túneles de doble sentido de circulación.

La falta de rutas de escape podía estar debida a un exceso de confianza del proyectista en el habitualmente limitado alcance de los accidentes. Sin embargo, el salvamento de la gran mayoría de los afectados en el incendio de San Gotardo del pasado octubre gracias a la existencia de galerías de evacuación del túnel de emergencia, frente a la fallida teoría de los refugios presurizados pero sin salida del Mont Blanc.

Esta última solución que fue paradigmática en la ingeniería francesa de túneles ha quedado completamente arrumbada y lo mismo cabe decir del respeto reverencial a los sistemas de ventilación transversal o semitransversal puros.

En Tauern el sistema transversal puro con pequeñas boquillas de aspiración repartidas a distancias cortas de humos durante 15 minutos (y en circunstancias muy favorables). En su reconstrucción se han sustituido aquéllas por tiros de unos $5m^2$ colocados aproximadamente a $50m$ de distancia.

Por otro lado el control del tiro natural, fundamental en la lucha contra el incendio, sólo es posible en estos sistemas mediante programas de soplado y aspiración alternada en diferentes cantones, lo que a veces no se puede conseguir.

Por ello en el Mont Blanc la ventilación semitransversal se ha completado con un sistema de aceleradores longitudinales con los que se intentará reducir el movimiento del aire en situaciones extremas.

Finalmente, por lo que se refiere a proyecto, se han observado daños importantes a las estructuras resistentes que no han sido, generalmente, protegidas frente al incendio. (En San Gotardo, por ejemplo, el espesor del falso techo era inferior a $10cm$.)

El fallo más importante que se suele producir en la etapa de construcción se refiere a la falta de ensayos globales in situ que permitan medir e interpretar la estanqueidad y el comportamiento aerodinámico del conjunto con simulaciones que no han de ser llevadas a cabo con fuego real. Ésto sucedía en toda Europa y en los últimos años se está implementando un control continuo, como siempre se había realizado en los suministros y la obra en la ingeniería de túneles.

Se trata de ensayos caros y largos por lo que este punto debería ser tenido en cuenta en las estimaciones de costes y plazos de las obras.

También a veces se observan errores llamativos en la fase de explotación, debido a que un uso habitual produce un estado de confianza excesiva y una relajación del cumplimiento de las normas y procedimientos establecidos.

Ajustarse a los procedimientos establecidos, eliminar duplicidades en el control (aunque se trate de túneles internacionales) y rebajar la responsabilidad del operario son factores importantísimos. Por ello es fundamental el análisis de escenarios que permitan preprogramar las pautas de actuación según las condiciones de contrapresión atmosférica, tráfico, estado previo de los ventiladores.

Aunque ya se ha hablado de los fallos de coordinación cuando existen controles múltiples cabe indicar también los relacionados con la colaboración de los equipos de extinción de incendios de las localidades cercanas. Las experiencias habidas indican que la llegada no se produce antes de 20 minutos.

Es decir, son fundamentales los dispositivos de autodefensa del túnel para la etapa de salvamento de las personas que sólo es efectiva en los primeros 15 minutos.

Es necesario también el desarrollo de modelos que permitan estudiar el comportamiento de las soluciones que hayan podido idearse para subsanar las deficiencias observadas.

De cara al sistema de ventilación tiene una especial tradición el uso de modelos físicos a escala reducida en los que se intenta mantener las leyes de la semejanza. A efectos de proyecto es notable la evolución habida con los métodos numéricos en computadora que han permitido utilizar de forma rutinaria los procedimientos monodimensionales de régimen transitorio en redes de tuberías y desarrollar nuevos modelos zonales o tridimensionales que con apoyo en el método de los volúmenes finitos permiten estudiar con un cierto grado de finura fenómenos locales mediante acoplamiento con leyes de combustión muy precisas.

Los modelos numéricos juegan un importante papel no sólo en el proceso de dimensionamiento aerodinámico sino en el análisis paramétrico de las soluciones y en el establecimiento de las pautas de actuación en caso de accidente acoplando modelos de tráfico con los de fluidos, combustión, ventiladores, etc.

Como modelos físicos a escala real cabría interpretar también los ensayos realizados en obras existentes o los que han tenido lugar en túneles abandonados.

Aunque los ensos con fuego real en condiciones controladas son imprescindibles para el progreo del conocimiento, su utilización de forma rutinaria en obras normales es discutible debido a la dificultades de control de parámetros que, como el tiro natural, son definitivos a la hora de establecer el régimen de ventilación.

Es mucho más importante garantizar mediante ensayos que el funcionamiento conjunto del sistema detectores – control – obra civil – instalaciones es el previsto aunque sea innegable el efecto motivador y educativo que los fuegos simulados tienen sobre los equipos de extinción de incendios de las poblaciones vecinas y sobre el público en general a través de la relevancia que le suelen otorgar los medios de comunicación.

11.3.1. Equipos de seguridad de túneles:

- Pasivos:
 - Obra civil:
 - Apartados y galerías de cambio de sentido.
 - Nichos de seguridad y nichos de incendio.
 - Refugios.
 - Galerías de evacuación.
 - Depósitos y red contraincendios.
 - Instalaciones:
 - BIES
 - Redes de agua y caces de recogida.
 - Alimentación eléctrica múltiple y equipos de reserva.
 - Iluminación.
 - Señalización con paneles fijos y variables.
 - Semáforos y semibarreras.
 - Redes de comunicación.
- Informativos:
 - Detectores de CO, Nox y opacímetros.
 - Anenómetros.
 - Teléfonos.
 - Cámaras de video.
 - Radio.
 - Localización termométrica.
- Activos:

- Ventilación.
 - Exutorios motorizados.
 - Rociadores.
 - Vehículos de evacuación.
 - Vehículos de lucha contra el fuego.
- Control:
- Plataforma informática.
 - Autómatas en túnel.

Los sistemas de comunicación por fibra óptica han permitido el establecimiento de redes muy fiables y los progresos en la velocidad de tratamiento y en la capacidad de las computadoras han llevado a la multiplicación de las señales de control y a la posibilidad de su tratamiento armónico para la detección del incendio y la consiguiente selección de una pauta de actuación que se aplica automáticamente si en un intervalo de pocos minutos el operario no ha contestado a las alarmas y propuestas que ha transmitido el sistema.

La seguridad es un problema ingenieril pero también es un tema de seguridad ciudadana por la que no bastan las grandes inversiones en ingeniería, sino que la educación ciudadana es clave para preservar la vida.

11.3.2. Cómo afecta el fuego al hormigón estructural:

Concretamente en el caso del hormigón estructural en túneles, se observan los efectos siguientes:

1. Desconchamiento por efecto *spalling*. La extraordinaria rapidez con que se calienta el hormigón genera el paso a vapor del agua contenida en la masa con velocidad explosiva. Como generalmente los hormigones usados tienen el poro pequeño, este vapor no puede liberarse adecuadamente, lo que genera una presión capaz de destruir las capas más externas de hormigón, dejando expuestas las armaduras, y aumentando el riesgo de colapso del túnel. Este efecto ha sido estudiado en laboratorios, como el realizado por el SINTEF noruego en diciembre de 1988, en el que se comprueba este efecto con acciones térmicas de fuego de hidrocarburos, y se observa una disminución casi total cuando el hormigón recibe una protección adecuada.
2. Destrucción de la unión entre el hormigón y el refuerzo metálico, con pérdidas de resistencia cuando el hormigón se calienta por encima de los 300 °C.
3. Deformación por acciones de dilatación térmica.
4. Pérdida de resistencia en el propio hormigón a temperaturas de unos 500 °C.
5. Destrucción de las juntas de dilatación.

Estos efectos dañan irremediablemente la estructura de un túnel, lo que origina reparaciones muy costosas y difíciles de realizar. Sin embargo, si se prevé una protección adecuada, estos efectos se reducen al mínimo, con importantes ahorros en reparaciones que compensan sin ninguna duda las inversiones iniciales en dicha protección.

Las protecciones previstas (y sus sistemas de fijación) deben de tener características demostradas de comportamiento en caso de incendio, así como otras que le permitan resistir las

acciones propias de su situación y normal uso del túnel, como las variaciones de presión debido al paso de vehículos a alta velocidad, que pueden llegar a $800Pa$ en túneles de carretera, a $1,100Pa$ en túneles de ferrocarriles de transporte y hasta $5,000Pa$ en túneles de ferrocarriles de alta velocidad.

Estas características demostradas deben probarse mediante los correspondientes informes de ensayo. En el caso de la Resistencia al Fuego, este tipo de ensayos consiste en preparar una muestra de hormigón y su protección lo más parecida a como se instalará realmente, con tamaños de $4 \times 3m$. y someterla en una instalación (horno) adecuada a la acción de un programa térmico normalizado como los anteriormente expuestos, midiendo durante todo el proceso las deformaciones del hormigón, la aparición del fenómeno spalling, y los gradientes de temperatura en la cara inferior del hormigón y en la armadura de refuerzo, controlado por un determinado número de termopares de control adecuadamente situados en la masa del hormigón.

Los requisitos que debe cumplir el sistema de protección dependen del tipo de túnel, del uso y de la legislación al respecto de cada país. A continuación se exponen algunos de los más frecuentes:

Requisitos ZTV alemanes:

- Máxima temperatura en la cara inferior del hormigón $< 300^{\circ}C$ cuando se somete a la curva RABT.
- Permanencia de la protección durante el periodo de ensayo .
- Efecto spalling mínimo y poco profundo.
- Temperatura en el sellado de la junta de dilatación entre 60 y $150^{\circ}C$ según el material.

Requisitos RWS holandeses:

- Resistir al menos dos horas los efectos de la Curva RWS en dos ensayos diferentes.
- Máxima Temperatura permitida en la cara inferior del hormigón $< 380^{\circ}C$, complementada con
- Máxima temperatura en las armaduras de refuerzo $250^{\circ}C$, con un recubrimiento de hormigón de 25 mm.
- Temperatura en las juntas de dilatación inferior a $60^{\circ}C$.

La emisión de un informe de ensayo por el Laboratorio clasifica y avala la solución ensayada para su uso en la protección de túneles, y puede ser complementado por otro tipo de ensayos, como ciclos de hielo deshielo, ensayos de abrasión (Test Taber), y otros, dependiendo de las solicitudes finales de uso del propio túnel.

Debido a que en España no existe más que algunas normativas expedidas por algunas Comunidades Autónomas, siendo las más importantes las de Cataluña relativas a tráfico de ferrocarril, que se refieren a los más conocidos sistemas de protección (sistemas de extinción, de extracción de humos, etc), pero en las que todavía se ignoran los aspectos relativos a la protección de la estructura del túnel. De modo que, en España la seguridad sigue estando únicamente bajo los buenos criterios de los técnicos e ingenieros responsables de los proyectos, echándose en falta todavía una Normativa nacional clara que fije los requisitos en este tipo de estructuras.

Parte VI

Conclusiones

Respecto al trazado de las nuevas líneas de alta velocidad.

- Actualmente se está demostrando que lo más conveniente es bajar las rasantes de los trazados y alargar los túneles ferroviarios de alta velocidad, obteniendo así trazados más tendidos que los que se venían realizando hasta ahora. Esto beneficia doblemente; por un lado permite el transporte de mercancías y por el otro alcanzar mayores velocidades a los trenes de alta velocidad. En contra partida, requiere de mayor número de infraestructuras y de mayores dimensiones.
- Se suele pensar y la intuición indica que cuanto más profundo es un túnel más peligrosa es su ejecución, pero en definitiva parece que esa creencia actual en la influencia desfavorable de la profundidad del recubrimiento sobre un túnel se basa solamente en la teoría y no tiene justificación real; hay túneles y excavaciones subterráneas muy profundas que se han realizado sin problemas y, por el contrario, túneles someros que han tenido multitud de problemas
- La vía en balasto no parece ser válida para velocidades superiores a los 320km/h . A partir de los 280km/h ya empieza el efecto del vuelo del balasto (schotterflug). El elevado grado de mantenimiento y el no permitir alcanzar grandes velocidades hacen que la mejor solución sea la vía hormigonada o también llamada vía en placa.
- Para poderse colocar esta vía en placa los asientos de los terraplenes y pedraplenes deben estar limitados a 30 mm como máximo, y se considera que la altura máxima de estos ha de estar entre los 5 y 10 m, para así poder reducir los asientos y garantizar el buen funcionamiento de la vía en placa.
- A raíz de las mejoras en la técnica, la reducción de costes y las exigencias de trazado, en los últimos 30 años ha aumentado la construcción de túneles ferroviarios cada vez más largos y de menor cota. Éstos son los llamados túneles de base

Respecto a las secciones transversales de los túneles de alta velocidad.

- En los túneles de alta velocidad la geometría de la sección transversal adquiere una gran relevancia; debido a los fenómenos aerodinámicos que se producen en su interior al circular los trenes a velocidades tan elevadas. Estos fenómenos son las variaciones de presión y el efecto de fricción tren-aire-túnel.
- Para poder reducir estos fenómenos aerodinámicos hay realizar diseños de túneles que consigan encontrar un equilibrio óptimo entre la sección transversal del túnel/tren; las variaciones de presión; el efecto de fricción tren-aire-túnel; y una adecuada velocidad de explotación y coste en la construcción y explotación del túnel.
- Para poder alcanzar este equilibrio óptimo entre: tren-aire-túnel las, mejoras aerodinámicas, de potencia y de presurización que se realizan en los trenes de alta velocidad son de gran ayuda.
- Actualmente los diámetros que se aplican a las secciones transversales de los grandes túneles son del orden de los $8,5\text{-}9\text{m}$. Esto limita la velocidad real de paso a 250km/h

debido a los efectos aerodinámicos. En los últimos estudios realizados se ha determinado que una sección de diámetro $11,5m$ permitiría una circulación de $320-350km/h$ por su interior, sin producirse prácticamente pérdidas de potencia.

Respecto aspectos condicionantes en la construcción y explotación.

- Para que la construcción de un túnel resulte óptima, hay que hacer la elección adecuada de los parámetros geotécnicos del macizo, de su proyecto y del método constructivo a utilizar.
- Hay que elegir el mejor trazado posible. Para ello es de vital importancia realizar numerosos estudios, pero sobre todo, que sean de calidad y representen al máximo la realidad de los macizos que hay que atravesar. De esta forma evitaremos los trazados geotécnicamente conflictivos.
- Los tres problemas mayores, en lo que respecta al proyecto y la construcción de túneles, son el conocimiento del estado tensional in-situ del terreno o macizo rocoso, las propiedades mecánicas del macizo y en el caso de rocas las juntas o discontinuidades y sus características.
- En un futuro próximo las TBM's serán mucho más fiables y se adaptarán a cualquier tipo de terreno. Si a esto le añadimos la reducción del coste que se espera, el gran rendimiento que tienen y el mayor grado de seguridad que proporciona a los trabajadores, podemos asegurar que su utilización aumentará significativamente en los próximos años.
- Las TBM's obtienen unos rendimientos más elevados que los métodos tradicionales, pero por el contrario presentan un coste más elevado de implantación y son mucho menos flexibles. Por lo tanto su uso es adecuado en la construcción de túneles de larga longitud.

Respecto a las medidas de seguridad en los túneles.

- Los túneles a doble vía son más peligrosos que los túneles de vía única con interconexiones. En estos últimos se puede realizar una evacuación más rápida y segura a través del túnel paralelo. Sin duda el accidente más grave que se puede producir en un túnel es el que provoca un incendio, ya que al estar las cavidades muy aisladas del exterior siempre presentan dificultad en la eliminación del calor, el humo y las sobrepresiones que se pueden generar durante el incendio.
- Un aspecto que es muy importante a la hora de definir las medidas de seguridad de un nuevo túnel, o la mejora de uno existente, es la experiencia en cuanto a accidentes e incidentes que se hayan producido en otras infraestructuras de similares características. Tales datos proporcionan un punto de partida bien situado en su contexto y son una base para el diseño de nuevos túneles.
- En el futuro serán cada vez más importantes los estudios sobre incendios. Adquiriendo una gran importancia los modelos matemáticos que permiten simular comportamientos de incendios en el interior del túnel. Con estos avances se podrá realizar un mejor dimensionamiento de los sistemas de extinción.
- La seguridad en los túneles ferroviarios es un tarea interdisciplinaria, que incluye profesionales de sectores muy distintos. La gestión de la seguridad debe hacer hincapié en una correcta coordinación entre las diferentes especialidades.

Referencias Bibliográficas

1. A. López Pita (2010) *Alta velocidad en el ferrocarril*. Barcelona: Edicions UPC.
2. A. López Pita (2006) *Infraestructuras ferroviarias*. Barcelona: Edicions UPC.
3. A. López Pita (2001) *La rigidez vertical de la vía y el deterioro de las líneas de Alta Velocidad*. Revista de obras públicas nº 3415.
4. A. López Pita (2000) *Compatibilidad entre trenes de viajeros en Alta Velocidad y trenes tradicionales de mercancías*. Revista de obras públicas nº 3403.
5. Arroyo Diez, Carlos et al (2007) *Los túneles de Pajares, infraestructura de última generación*. Revista CAUCE 2000. nº 138
6. A. Lozano (2000) *El dimensionamiento de túneles ferroviarios en líneas de alta velocidad, Segunda parte: Métodos alternativos*. Revista de obras públicas, nº 3402.
7. Botton, Charles and Braun, Michael (1991) *Le Col de Tende*. France: Les Editions du Cabri
8. Arthur Wyss-Niederer y Berne (1979) *The Gotthard - Switzerland's Lifeline*. Lausanne: Editions Ovaphil, S.A.
9. Carlos Oteo Mazo et al. (2010) *Soterramiento del ferrocarril Málaga - Fuengirola: Nuevo túnel en terrenos blandos*. Revista de obras públicas, nº 3511.
10. Carrasco Reyes, Jaime (2004) *Posibilidades de los servicios ferroviarios nocturnos en la futura red europea de alta velocidad*. Barcelona: UPC
11. C. López Jimeno (2006) *Manual de Sondeos. Tecnología de perforación*. Madrid: U. D, Proyectos E.T.S.I. Minas
12. C. López Jimeno (2004) *Ingeo túneles. Libro 7*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A.
13. C. López Jimeno y P. García (2003) *Manual de perforación y voladura de rocas*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A.
14. C. López Jimeno (2001) *Aplicaciones*. Madrid: U. D, Proyectos E.T.S.I. Minas
15. Collaborateurs de BLS AlpTransit, S.A. et al (2005) *Le tunnel de base du Lötschberg. De l'idée au percement*. Switzerland: Stämpfli Editions, S.A.
16. Comuni de Gorizia (2006) *Transalpina 100 anni (1906-2006) Un binario per tre popoli in immagini d'epoca*. Mariano del Friuli: Edizioni della Laguna
17. Corrado Lesca (1988) *Tre ingegneri per un traforo. La storia della ferrovia del Frejus*. Borgone di Susa: Melli.
18. Cristoph Herbst (2002) *Brenner basistunnel Galleria di base del Brennero*. Bruneck: BBT.
19. Daulmerie, Dominique (1993) *La maintenance des équipements fixes (Eurotunnel)*. *Revue Générale des chemins de fer*.
20. Daniel Albalade (2011) *Cuando la economía no importa: Auge y esplendor de la alta velocidad en España*. Revista de economía aplicada, nº 55 (vol: XIX)

-
21. Enrique Priego de los Santos (2009) *Túneles y tuneladoras Nociones generales y topografía para su guiado*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
 22. E. Alarcón Álvarez (2010) *Modelos de riesgo para túneles*. Revista de obras públicas, nº 3511.
 23. E. Alarcón Álvarez (2002) *La seguridad frente a incendios en túneles*. Revista de obras públicas, nº 3420.
 24. F. Mendaña (2009) *La construcción de túneles en terrenos mixtos con tuneladoras de gran diámetro. Experiencias recientes en algunas obras*. Revista de obras públicas, nº 3498.
 25. J. Antonio Coberos et al. (2005) *Túnel de Guadarrama*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.L.
 26. J. Bueno (2006) *Ejecución de galerías de conexión entre túneles paralelos en terrenos difíciles*. Revista de obras públicas, nº 3467.
 27. Joan Manuel Estradé (2002) *Nuevas líneas de alta velocidad. Su incidencia en la aviación e importancia de las relaciones regionales*. Revista de obras públicas, nº 3420.
 28. José Antonio Cobreros et al. (2002) *Proyecto y construcción del túnel de Guadarrama*. Revista de obras públicas, nº 3426.
 29. José Antonio Juncà Ubierna (1990) *EL túnel. I. Historia y mito*. España: Esygraf, S.A.
 30. José M^a Rodríguez et al. (2010) *Nueva estación de cercanías de la Puerta del Sol-Gran Vía. Proyecto y construcción de la caverna de estación*. Revista de obras públicas, nº 3511.
 31. Mario Peláez (2011) *Experiencias de la construcción de túneles de ferrocarril en España, con tuneladoras*. Madrid: Ministerio de Fomento, Adif
 32. M. Melis Maynar (2011) *Proyecto y construcción de túneles y metros en suelos y rocas blandas o muy rotas. La construcción del Metro de Madrid y la M-30*. España: Gráficas Gallagor.
 33. M. Melis Maynar (2006) *Terraplenes y balasto en alta velocidad ferroviaria, Primera parte*. Revista de obras públicas, nº 3464.
 34. M. Melis Maynar (2006) *Terraplenes y balasto en alta velocidad ferroviaria, Segunda parte: Los trazados en Alta Velocidad en otros países*. Revista de obras públicas, nº 3468.
 35. M. Melis Maynar (2006) *Terraplenes y balasto en alta velocidad ferroviaria. Tercera parte: Los túneles de Alta Velocidad. Profundidad, proyecto, RMR y NATM*. Revista de obras públicas, nº 3472.
 36. M. Melis Maynar (2001) *Diseño de túneles para trenes de alta velocidad. Rozamiento Tren-Aire-Túnel y ondas de presión*. Revista de obras públicas, nº 3415.
 37. M. Melis Maynar (2000) *El túnel, clave de las infraestructuras. 149 túneles españoles y extranjeros: Métodos y velocidad de construcción*. Revista de obras públicas, nº 3403.

-
38. L. Cornejo Álvarez (2006) *Los grandes proyectos internacionales de construcción de obras subterráneas un reto tecnológico para el siglo XXI*. Revista de obras públicas, nº 3464.
 39. L. Cornejo Álvarez (1988) *Excavación mecánica de túneles*. Madrid: Editorial Rueda.
 40. Patrick Belloncle (1986) *Le chemin de fer du Lötschberg*. France: Les Éditions du Cabri.
 41. Parra, Santiago et al. (2005) *Canfranc, el mito*. Jaca: Pirineum editorial.
 42. Peter Krebs et al. (2006) *Simplon. 100 anni di galleria del Sempione*. Berna: AS Verlag.
 43. T. M. Megaw y J. V. Barlett (1997) *Túneles Planeación, diseño y construcción. Volumen 1*. México: Editorial Limusa S.A.
 44. T. M. Megaw y J. V. Barlett (1997) *Túneles Planeación, diseño y construcción. Volumen 2*. México: Editorial Limusa S.A.
 45. Raúl Míguez Bailo (2005) *Los túneles de Pajares*. Revista de obras públicas, nº 3460.
 46. Rafael Sarasola (2006) *La protección de los túneles en España*. Revista de obras públicas, nº 3460.
 47. R. Pigem Comeselle (2008) *50 años de alta velocidad en Japón*. Barcelona: UPC.
 48. Silvio Rojas (2009) *Clase de túneles*. Venezuela: Universidad de los Andes.
 49. Unión Española de Explosivos (UEE) (2002) *Manual de empleo de explosivos*. Madrid: Gráficas Arias Montano, S.A.
 50. Unterschütz P. (2005) *La nouvelle ligne du Saint-Gothard*. Switzerland: Alptransit, Gotthard S.A.
 51. M. Stephen (2007) *Presentation of the project Lyon-Turín ferroviaire. Presentation by Stephen Slot Odgaard*. Project Manager.
 52. E. García (2007) *El nacimiento con parto algo distócico de la alta velocidad ferroviaria española*. Madrid.
 53. Yamaji, Hitoshi (2001) *The world's longest terrestrial tunnel: Iwate - Ichinohe Tunnel on the Tohoku New Trunk Line*. Japan: Journal of Construction engineering and management.

Direcciones de Internet

- [A] <http://www.trenscat.cat>
- [B] <http://www.catedra-ffcc-caminos.com>
- [C] <http://www.lineasdeltren.com>
- [D] <http://www.renfe.es>
- [H] <http://ropdigital.ciccp.es>
- [E] <http://www.uic.asso.fr>

-
- [F] <http://www.vialibre-ffe.com>
 - [G] <http://www.sncf.com>
 - [H] <http://home.no.net/lotsberg>
 - [I] <http://www.adif.es>
 - [J] <http://www.lotsberg.net>
 - [K] <http://ferropedia.es>
 - [L] <http://diariopublico.es>
 - [M] <http://www.railforum.net>
 - [N] <http://www.wikipedia.com>
 - [O] <http://www.tunconstruct.org>
 - [P] <http://london-runner.blogspot.com.es>
 - [Q] <http://www.construmatica.com/construpedia>
 - [R] <http://www.miningandconstruction.sandvik.com>
 - [S] <http://esp.prefabricatspujol.com>
 - [T] <http://www.alptransit.ch>
 - [U] <http://www.fomento.es>
 - [V] <http://www.japan-tunnel.org>
 - [W] <http://www.microtunnel.com>