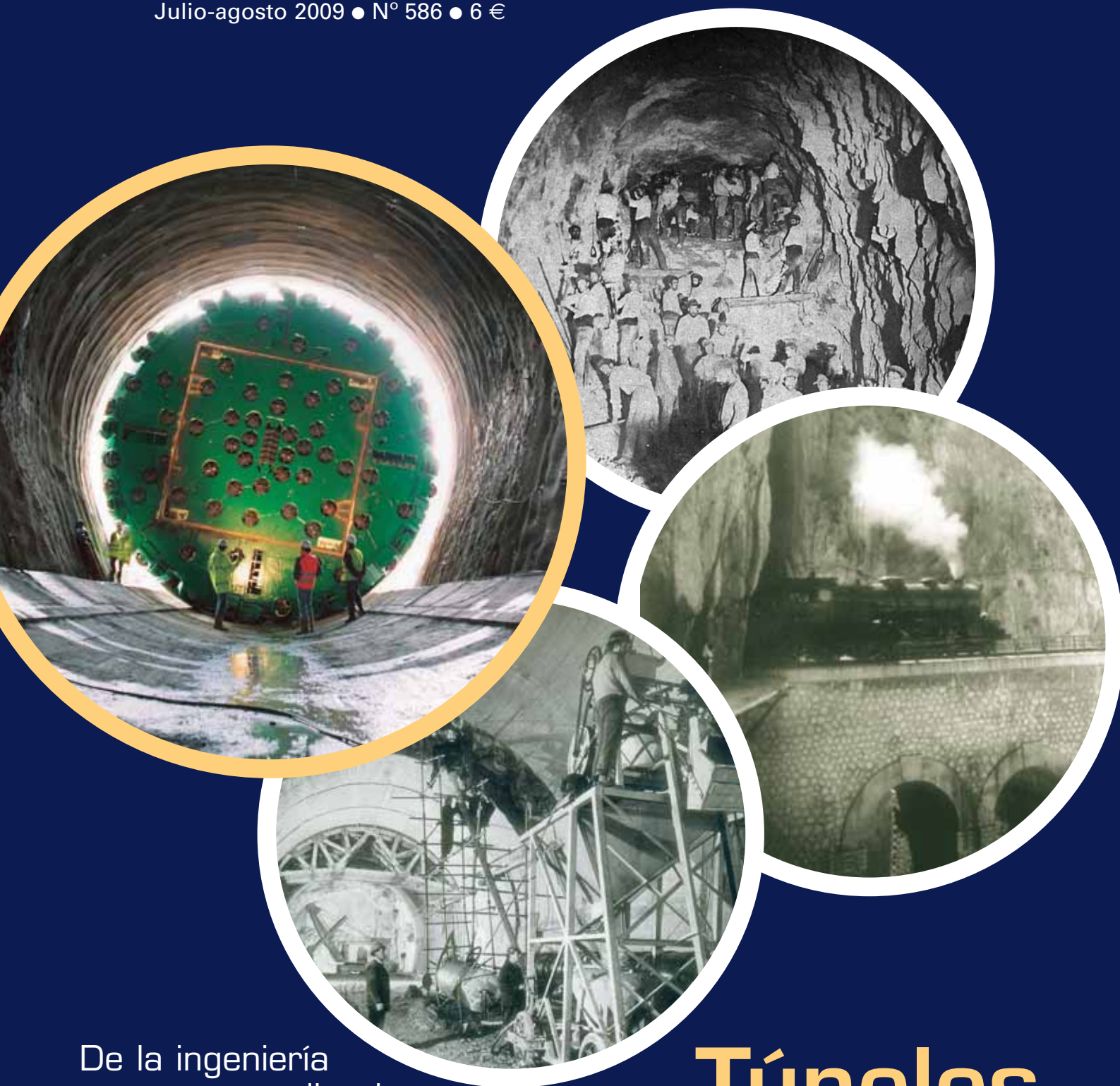


Revista del Ministerio de

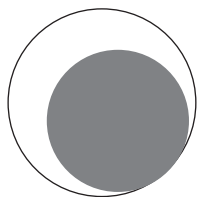
Fomento

Julio-agosto 2009 • N° 586 • 6 €



De la ingeniería
romana y medieval
a los modernos
túneles del siglo XXI

Túneles de España



FE DE ERRORES. El reportaje 'Prevención a bordo', aparecido en el número 585 de la revista, fue erróneamente atribuido a José Ignacio Rodríguez, cuando su verdadera autora es Begoña Olabarrieta.

4 **Galerías para la eternidad.** Agua, minería y defensa, orígenes de los túneles españoles de la antigüedad.

22 **Por los cuatro puntos cardinales.** La extensión de la red ferroviaria en los siglos XIX y XX generalizó la construcción de túneles por toda la geografía nacional.

42 **Subterráneos urbanos.** La construcción de la red de metro en Madrid y otras ciudades españolas.

58 **Veteranos, pero en forma.** La construcción de túneles carreteros en el siglo XX.

78 **La seguridad, de boca a boca.** Los grandes túneles carreteros del siglo XXI.

94 **En el corazón de la capital.** Túnel de Cercanías entre Atocha y Chamartín.

110 **Atravesando la Bética.** La construcción de los túneles del Corredor Sur de alta velocidad.

124 **Túneles hacia Levante.** La LAV a Valencia discurrirá durante más de 54 kilómetros bajo tierra.

136 **Buscando la frontera.** La construcción de subterráneos en la línea Madrid-Barcelona-Francia.

148 **Colosos del noroeste.** Túneles de Guadarrama, Pajares, San Pedro y A Madroa, los cuatro grandes de España.

167 **Bibliografía**

Director de la Revista: Antonio Recuero

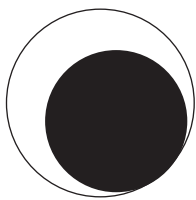
Edición: Javier R. Ventosa. **Maquetación:** J. A. Laiz. **Secretaría de redacción:** Mercedes Cantero. **Fotografía:** José Caballero. **Portada:** F.F.E. **Archivo fotográfico:** Juan Santiso. **Elaboración página web:** www.fomento.es/publicaciones. Concepción Tejedor. **Colaboran en este número:** María del Carmen Heredia Campos, Pepa Martín, María del Mar Merino, Begoña Olabarrieta, José Ignacio Rodríguez, Raquel Santos y Beatriz Terribas. **Suscripciones:** Aurora San Juan. Tel.: 91 859 07 07 Correo-e: suscripciones@tildecomunicacion.com C./ Eduardo Costa, 21 - local 2 bis Minicentro El Bulevar 28250 Torrelodones (Madrid). **Información de publicaciones del Ministerio de Fomento:** (91) 597 64 49/78. **Dirección:** Nuevos Ministerios. Paseo de la Castellana, 67. 28071 Madrid. Teléf. (91) 5 97 80 84. Fax. (91) 5 97 84 70. Redacción: Teléf. 5 97 72 64 / 65. E-mail: cpublic@fomento.es **Comité de redacción.** **Presidencia:** Jesús Miranda Hita (Subsecretario del Departamento). **Vicepresidencia:** Fabiola Gallego Caballero (Secretaría General Técnica). **Vocales:** Félix Albertos Carrión (Director de Comunicación), Juan Ángel Mairal Lacoma (Director del Gabinete de la Secretaría de Estado de Planificación e Infraestructuras), Carlos Ibarz del Olmo (Director del Gabinete de la Secretaría de Estado de Transportes), Andrés Hernández González (Vocal asesor de la Secretaría General de Relaciones Institucionales y Coordinación), Tomás Moreno Bueno (Jefe del Gabinete Técnico del Subsecretario), Ramón M. Lorenzo Martínez (Subdirector del Centro de Publicaciones), Antonio Recuero Almazán (Director de la Revista). **Impresión, publicidad y distribución:** Tilde Comunicación Corporativa S.L. C./ Eduardo Costa, 21 - local 2 bis 28250 Torrelodones (Madrid) Tel.: 91 859 07 07 Fax: 91 859 04 89 Correo-e: publifomento@tildecomunicacion.com. **Director de Producción:** Luis Puig. **Publicidad:** Cristina Fernández Tel.: 648 104 395. Dep. Legal: M-666-1958. ISSN: 1577-4589. NIPO: 161-09-002-1

Edita:
Centro de Publicaciones.
Secretaría General Técnica
Ministerio de Fomento



Esta publicación no se hace necesariamente solidaria con las opiniones expresadas en las colaboraciones firmadas

Esta revista se imprime en papel con un 60% de fibra reciclada postconsumo y un 40% de fibras vírgenes FSC.



Pasajes en la oscuridad

A diferencia de otras obras de ingeniería, no se han prestado casi nunca los túneles a la admiración fácil. Y en ello ha debido influir, sin duda, la alta carga simbólica y religiosa que el mundo subterráneo ha soportado en todas las civilizaciones. Desde tiempos prehistóricos, la gruta fue morada y sorprendente testigo de los vacilantes progresos de la especie *homo* en su evolución hacia la categoría *sapiens*, refugio seguro frente a las hostilidades del medio y lugar propicio a las primitivas elucubraciones para dominarlo, recinto donde técnicas, saberes y creencias, el bagaje espiritual de la especie obró su trascendencia. Y en esa noche de los tiempos hay que situar también el tabú que lo subterráneo ha tenido para el hombre como espacio de ultratumba, lugar de descanso de los muertos y sus espíritus antes del regreso a otras vidas.

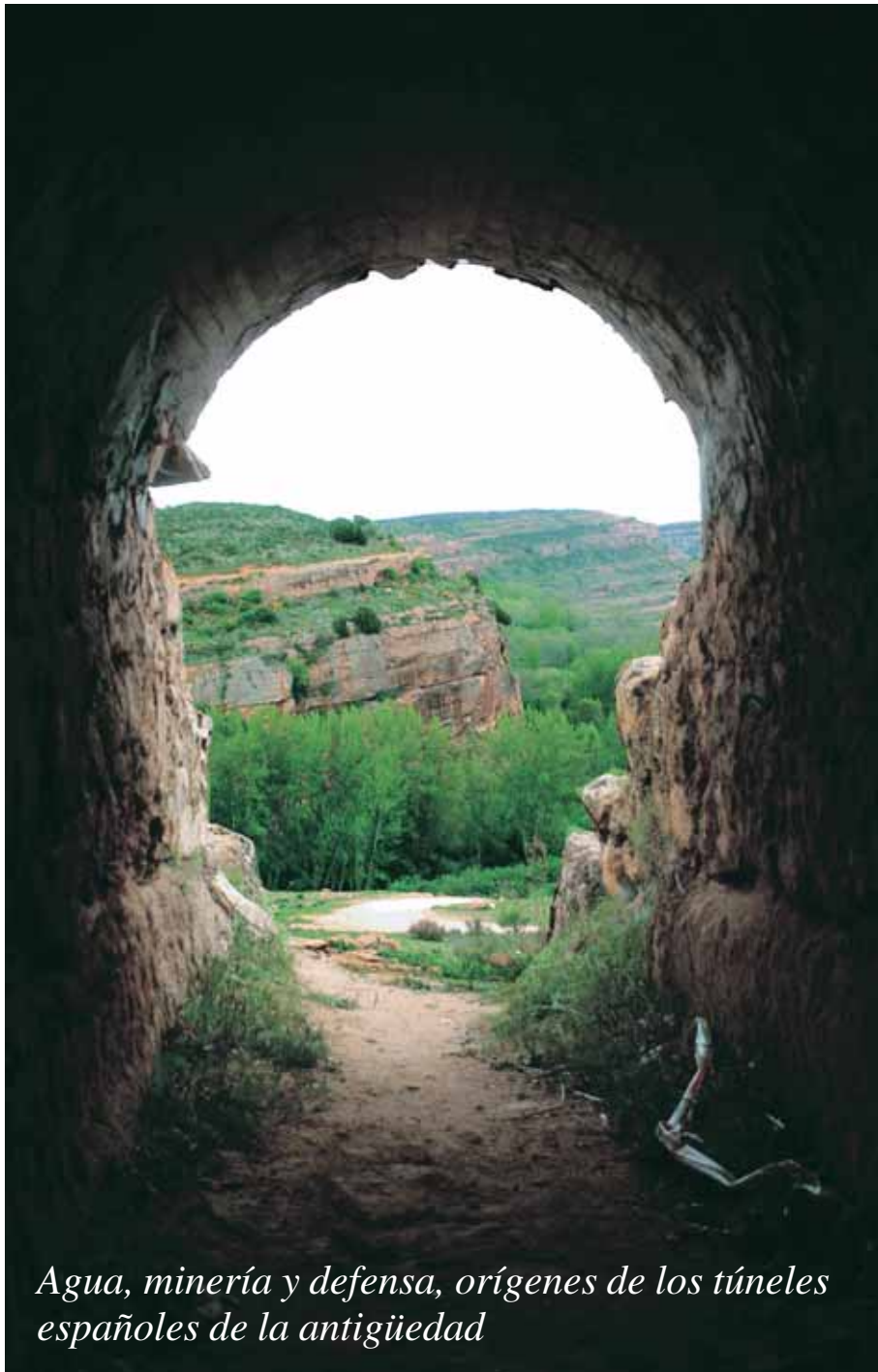
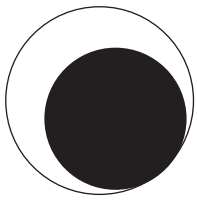
El mundo subterráneo, en definitiva, ha inspirado desde siempre en el hombre tanto temor como necesidad de adentrarse en él. Y bien para saciar la sed, o en procura de metales que multiplicaban el poder de sus herramientas y armas de piedra, se hizo constructor de túneles. En la antigua Mesopotamia, hace más de 3.000 años, trazó una sorprendente red de ríos artificiales subterráneos, los *qanats*, cuyo colapso dio también al traste con una de las civilizaciones más prósperas de la historia. Y en el Egipto de los faraones, más allá de otras conjeturas, cabe entender las pirámides como colosales recipientes donde acoger inextricables redes de túneles cuyo misterio y prodigios constructivos aún hoy nos anonadan.

Nuestro país ha tenido también desde la colonización romana una no menos portentosa tradición en la construcción de túneles. Durante ese periodo se trazaron aquí algu-

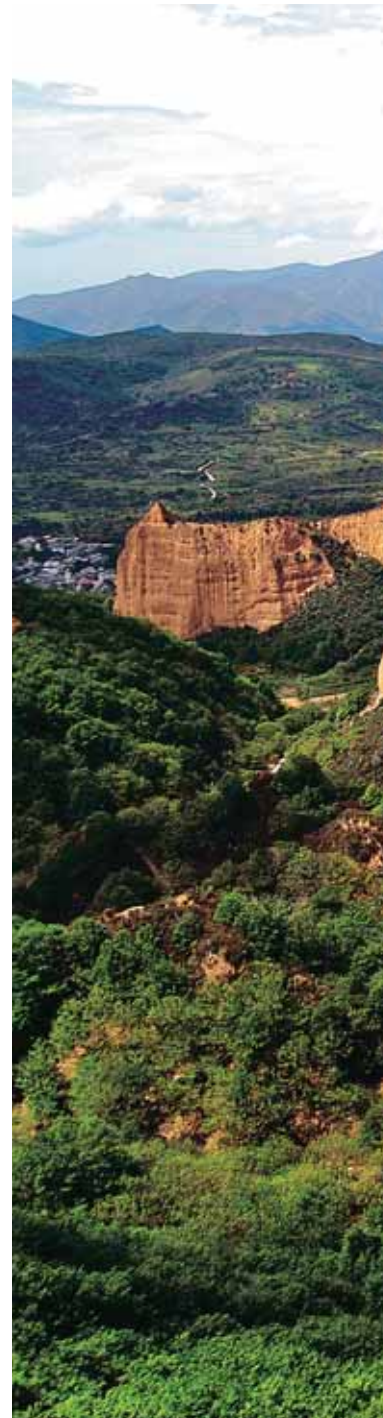
nas de las obras subterráneas más admirables, como las galerías excavadas en roca a lo largo de más de 5 kilómetros en Cella (Tertuel) o Peña Cortada (Valencia), para el transporte de agua, sin olvidar tampoco otros asombrosos túneles mineros (Las Médulas, Cartagena, Riotinto, Almadén, etc). También la cultura árabe nos legó su tradición de *qanats* en los viajes de agua que, en Madrid y hasta 1830, alcanzaron una red de 130 kilómetros que permitió el abastecimiento a cerca de 200.000 personas en unas condiciones de salubridad envidiables en otras capitales europeas. Y, en pleno Renacimiento, en la localidad aragonesa de Daroca, la ingeniería de la época concibió uno de sus hitos más singulares: la monumental mina, cuyos vestigios aún se conservan, para el desvío del Jiloca y defender a la población de sus temibles avenidas.

Hoy, singularmente en esta última década, los progresos en la técnica constructiva han permitido que España no sólo se mantenga en la vanguardia de esa tradición tunelera sino superar también una de sus grandes rémoras: la difícil orografía como condicionante de una red de comunicación y transporte eficaz. La red de alta velocidad suma ya más de 500 kilómetros de túneles finalizados o en fase de ejecución avanzada. Y cuando esa red esté operativa a su conclusión en apenas poco más de una década, el viejo sueño de unir los puntos más distantes del país en el tiempo más corto posible se habrá hecho plenamente realidad. Y seguramente, entonces, lucirá con fuerza la luz que marque el final del largo túnel de los atrasos seculares en nuestras redes de comunicaciones.

ANTONIO RECUERO ALMAZÁN



Agua, minería y defensa, orígenes de los túneles españoles de la antigüedad



Galerías para la eternidad

Romanos y musulmanes son los maestros de las grandes construcciones subterráneas de la antigüedad en España, los primeros túneles que se horadaron en la roca para que el agua discurriera por ellos, con fines de abastecimiento o para minería. A estos usos se sumaron en la Edad Media los túneles con finalidades puramente defensivas. La longevidad de algunos de estos subterráneos excede en ocasiones los 2.000 años.

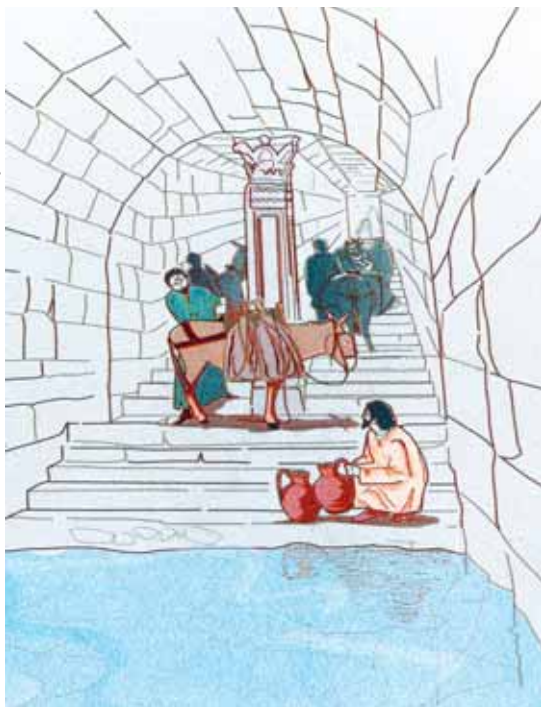
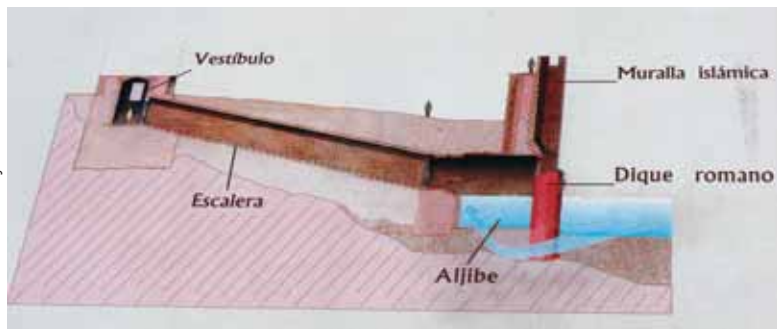
Izquierda, galería romana para la conducción de agua en Tiermes (Soria). Foto principal, las montañas de Las Médulas (León) fueron horadadas con galerías por los romanos para la explotación de un importante yacimiento aurífero.



MARÍA DEL MAR MERINO

Aunque las primeras obras subterráneas de que se tiene conocimiento son las antiguas tumbas reales excavadas en la roca del Antiguo Egipto, lo cierto es que el surgimiento de los túneles, hace unos 3.000 años, obedeció a la necesidad de transportar de forma segura un bien absolutamente necesario como el agua en las civilizaciones del Creciente Fértil. Son los *qanats*, canales de irrigación subterráneos y abiertos en la roca, que tomaban el agua de acuíferos distantes y que, a través de planicies, atravesaban las colinas, a veces con un recorrido de más de 40 kilómetros.

La técnica del *qanat* fue adoptada e introducida en España por los romanos, maestros en la construcción de obras hidráulicas, de las que han dejado numerosos ejemplos en nuestro país, pero también dominaron la ejecución de túneles para extraer materiales valiosos de las explotaciones mineras. La dominación musulmana nos ha legado asimismo importantes realizaciones subterráneas relacionadas con el agua, mientras que en la posterior Edad Media surgió el empleo del túnel como medio defensivo para hacer frente al asedio de ciudades y fortalezas. A continuación proponemos un viaje por los túneles de la antigüedad en España, asociados a diferentes usos según las épocas.



Arriba, gráfico de la bajada del agua al aljibe en Mérida. Debajo, sistema de alcantarillado de la misma ciudad. Izquierda, grabado de una galería romana para toma de agua.

Túneles hidráulicos romanos

La mayor parte de los restos de construcciones subterráneas romanas que se conservan en España corresponden a sistemas de abastecimiento de aguas a núcleos urbanos, aunque la ingeniería minera también ha dejado importantes muestras de túneles, como los que se conservan en Las Médulas (León), La Mancha (Almadén), Andalucía (Riotinto) o Levante (Mazarrón-Murcia).



Los romanos optaban generalmente por buscar el agua en las cabeceras fluviales, seleccionando aguas de buena calidad, aunque para ello estuviesen más lejanas al punto de destino y fueran necesarias obras de infraestructura más complejas. En Hispania sucedió así muy a menudo, lo que supuso la construcción de numerosos acueductos y largas conducciones, como los 60 kilómetros necesarios para el abastecimiento de Cádiz o los más de 40 kilómetros para que el agua llegara a Toledo.

Dada la complicada orografía española, los ingenieros romanos recurrieron a la explotación de los acuíferos a través de pozos y galerías subterráneas de captación, donde brilló su técnica. Como en Mérida, donde el sistema de galerías o minas romanas ha suministrado agua a la ciudad a lo largo de 2.000 años y hasta fechas muy recientes. Este tipo de captación y transporte de aguas subterráneas es el que a partir de la Edad Media usaron los musulmanes en España, con sus *qanats* o viajes de agua.

La tipología de estas obras subterráneas seguía un patrón técnico con pocas variaciones. En primer lugar, se cavaban varios agujeros hasta la profundidad deseada y se iniciaba la excavación de la galería. Estos agujeros se mantenían una vez finalizada la obra para asegurar la aireación, el mantenimiento o la reparación de la galería.

Las galerías solían ser abovedadas, o cubiertas con losas, sin revestir o revestidas con mampostería, y con un canal en el suelo por el que se transportaba el agua filtrada en la zona de captación. El



A. C. Lapis Specularis



revestimiento se podía impermeabilizar usando mortero de cal en el rejuntado de las piezas de mampostería o de ladrillo. Las dimensiones variaban, pero generalmente eran las suficientes para permitir el trabajo de una persona en los avances a pico y pala y en el trabajo de los revestimientos.

En España existen numerosos ejemplos de estas conducciones asociadas a sistemas de abastecimiento urbano, y unidas a otras obras de infraestructura: canales, acueductos, cisternas, fuentes... Es el caso de Uxama (Osma, Soria), donde las excavaciones arqueológicas han hecho aflorar el recorrido de un acueducto con muchos de sus tramos contruidos en galería subterránea, excavada en roca viva. Algunos tramos son visitables, como la Boca de la Zorra, una galería de 133 metros de longitud, con 3,20 metros de altura y anchura máxima de 1,83 metros. En ella se observan detalles de construcción como dos profundos *spiramina*, o pozos de ventilación, y las repisas colocadas en la pared, realizadas para colgar lámparas, que facilitaban el trabajo y el tránsito.

El túnel de Cella

Un ejemplo espectacular de la ingeniería romana es el túnel-acueducto de Cella, que llevaba el agua de Albarracín a Cella (Teruel). Es una de las obras hidráulicas más importantes del Imperio romano en el Mediterráneo. Además, su túnel excavado en la montaña, de 5 kilómetros de longitud, es

Izquierda, galería de la mina de 'lapis specularis' en Segóbriga (Cuenca). Derecha, galería excavada en la roca del complejo hidráulico de Peña Cortada (Valencia).

el más largo hallado hasta ahora para conducción de aguas. Se sabe que esta obra mide en total 25 kilómetros, de los cuales sólo se conoce la mitad, mientras que el resto iría por el interior de las laderas y bajo campos de cultivo. El acueducto de Albarracín-Gea-Cella, construido en el siglo I d. C., es el primer trasvase de aguas realizado en la península Ibérica desde una cuenca hidrográfica levantina, como la del Guadalaviar, a otra diferente, como es la del río Ebro.

El acueducto alterna en su recorrido la construcción en mampostería con la excavación de galerías subterráneas o superficiales. El estado de conservación es excepcional en algunos tramos: el más espectacular se observa en el paraje del Azud de Gea. Allí, en la base de las paredes rocosas, aparecen unas ventanas excavadas en la roca que forman parte de la galería rupestre más larga de la zona. Estas ventanas laterales (*spiramina* o *lumina*) sirvieron tanto para excavar el interior como para extraer la roca. Las galerías tienen características comunes: excavadas en roca caliza, seguramente con instrumentos de punta triangular (*dolabra*), con dimensiones entre 1,70 y 2,20 metros de altura y una anchura máxima de 1,25 metros.

A partir de la cañada de Monterde, el canal (*specus*) es subterráneo para salvar las lomas que separan Gea de Cella, a una profundidad media de 25 metros, pero puede llegar a los 50-60 metros en zonas centrales. En su recorrido son visibles las "hoyas", pozos de excavación que permitían construir



varios tramos de forma simultánea. El acueducto termina en la plaza Mayor de Cella, donde en 1998 se localizó una enorme cisterna (*castellum*), construida con mortero hidráulico y revestida interiormente de *opus signinum*, con una probable función de almacenamiento de agua y no de distribución.

Esta obra de ingeniería da una idea del nivel técnico que alcanzaron los romanos. El acueducto es un trabajo de gran precisión topográfica, lo que aún cobra más valor si se considera que las obras se ejecutaron en todo el acueducto al mismo tiempo con el objetivo de rentabilizar al máximo el trabajo, pues no podían trabajar dos personas en el mismo punto a causa de la estrechez de las obras. Y todo ello empleando instrumentos técnicos tan sencillos como la *libella*, dos piezas de madera en forma de A, o el *chorobates*, un nivel de agua de 6 metros de largo que ofrecía nivelaciones muy precisas.

Actualmente, esta faraónica obra de ingeniería es en parte visitable, pues el Gobierno de Aragón y la Diputación de Teruel han invertido en obras de acondicionamiento en un proyecto de recuperación patrimonial que ha incluido la consolidación, excavación y conservación de los restos. Gracias a los trabajos se han recuperado para visitas 1.200 metros

Resto del canal de desagüe romano en Cádiz. Debajo, galería de conducción de agua de Peña Cortada (Valencia).

discontinuos de acueducto, de los cuales más de 300 son de nueva apertura gracias a la excavación arqueológica. Entre ellos pueden recorrerse varios tramos de las galerías subterráneas, situados en el paraje de El Azud y en el castillo de Santa Croche, la llamada Galería de los Espejos. En breve está prevista la apertura de un centro de interpretación del acueducto en Gea de Albarracín que permitirá la divulgación y revalorización de este patrimonio.

Un segundo ejemplo de notable infraestructura hidráulica romana en España, contemporáneo del túnel de Cella, lo constituye el complejo de Peña Cortada, formado por acueductos, acequias y túneles para abastecer con aguas del río Tuéjar los campos de Villar, Casinos y Llíria, en Valencia. Aunque su más reconocida obra es el puente-acueducto que salva la rambla de Alcotas, el complejo incluye una sucesión de túneles, excavados a cielo abierto o en el interior de la montaña, con longitudes de 200 a 300 metros, alturas de 1,50 a 1'90 metros y anchuras de 1 a 1,20 metros.

Túneles mineros hispanorromanos

Los romanos explotaron las riquezas minerales españolas de una forma sistemática y organizada, alcanzando el momento del máximo esplendor en la minería antigua. Avanzaron espectacularmente en la tecnología empleada y en los criterios de explotación que aplicaron, originando la ingeniería de minas como disciplina científica.

Los principales yacimientos hispanorromanos se concentraban en Andalucía —minas de Riotinto (Huelva), Linares (Jaén), Sierra Morena—, Murcia —núcleo Cartagena-Mazarrón—, la zona cantábrica con producción de hierro, Almadén (Ciudad Real) o el noroeste peninsular, con la explotación aurífera de Las Médulas (León), donde los sistemas de extracción empleados, basados en la fuerza del agua, no fueron superados hasta muchos siglos después.

Muchas fueron las aportaciones de los romanos a la minería, entre ellas la aplicación a esta actividad de los avances tecnológicos conseguidos en otros campos, como la topografía y la hidráulica.





Museo Nacional de Arte Romano de Mérida



Museo Nacional de Arte Romano de Mérida

Otra fue la explotación racional de los yacimientos, apoyada en un conocimiento efectivo de las condiciones geológicas del terreno, adquirido *in situ* y con conocimientos experimentales previos. La conjunción de estos nuevos referentes permitió acometer trabajos de gran envergadura desconocidos hasta la época.

La técnica utilizada por los romanos consistía en pozos y galerías, rectangulares, de pequeña sección y profundidades hasta los 200 metros, como en la sierra de Cartagena o en Riotinto (Huelva). Los po-

Arriba, interior de la galería de conducción del acueducto de Cornalvo y escaleras del acueducto de Rabo de Buey (Badajoz). Debajo, cisterna helenística de la ciudad romana de Ampurias (Girona).

zos comunicaban no sólo las labores subterráneas con el exterior, también se abrían pozos verticales para comunicar entre sí los distintos niveles de la mina. Su perforación era muy cuidada, con paredes recortadas a pico, usando cerchas de madera o revestimiento de piedras en las zonas de terrenos más blandos. En ocasiones los pozos eran escalonados, con lo que se alcanzaban mayores profundidades.

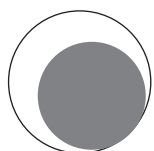
El alumbrado de las minas se realizaba mediante lámparas de aceite colocadas en pequeñas cavidades (lucernarios) excavadas en los hastiales para su colocación a la altura deseada. Otra novedad fue el empleo generalizado de útiles de hierro (picos, palas, cuñas metálicas o martillos) frente a las herramientas de piedra y hueso de épocas anteriores. Para el avance en el interior de las galerías usaban con frecuencia el sistema de torrefacción, utilizando fuego para ablandar el terreno. También se introducían cuñas de madera, que se humedecían con agua y al hincharse provocaban el derrumbe. La fortificación y sostenimiento de las galerías se hacía con madera y obras de mampostería con arcos o bóvedas de piedra, estas últimas de mayor duración.

Junto a estas innovaciones, las galerías de desagüe fueron el gran avance tecnológico romano en la minería. Solucionaron con éxito el problema de la presencia de agua en el terreno, ya sea de origen superficial o de la propia circulación natural de las aguas subterráneas. A mayor profundidad de las ga-





Interior restaurado del complejo de origen romano de Las Cuevas de Hércules, en el centro urbano de la ciudad de Toledo.



Las Cuevas de Hércules en Toledo

Es uno de los lugares subterráneos más misteriosos de Toledo. Estas cuevas, situadas en el nº 3 del callejón de San Ginés, en pleno centro urbano, han sido consideradas como un "paradigma de la magia toledana", pues, según la leyenda, en ellas se basa la fundación de Toledo, y allí se sitúa el palacio encantado en el que los reyes visigodos guardaban sus tesoros. En realidad, este mítico espacio formaba parte de las cisternas del abastecimiento romano de Toledo, constituyendo una gran cisterna de agua hacia el siglo I d. C. Con posterioridad, encima de este depósito se levantó un templo cristiano en época visigoda, y más tarde los árabes lo convirtieron en mezquita, para después convertirse en otro templo en honor a San Ginés, demolido en el XIX.

En torno a este espacio subterráneo se tejieron leyendas sobre tesoros, prácticas diabólicas o hechos inexplicables. Una de ellas alude a Hércules, quien, al llegar a Toledo, construyó un palacio para guardar un tesoro bajo un gran candado. Al pasar los años, los reyes visigodos cumplían la tradición de colocar otro candado en la puerta del palacio como respeto a Hércules, que advirtió que nadie penetrara en él para no causar un gran mal. Cuando la puerta tenía ya 24 candados, comenzó a reinar Don Rodrigo, último rey visigodo, que, en vez de cumplir la tradición, accedió al

palacio para satisfacer su curiosidad. La maldición que cayó sobre España fue la ocupación árabe.

Tanto misterio envolvía a las cuevas que, en 1546, el cardenal Silíceo ordenó reconocer este espacio. Los exploradores que se internaron en las galerías aparecieron demacrados y contando cosas tan terribles que la cueva se tapió. En 1839, tras otro reconocimiento, se describe el lugar como "un espacio formado por bóvedas de piedras paralelas y semicirculares, de fabricación romana, unidas por arcos prácticamente cerrados. En los extremos de la estancia, boquetes o puertas tapiadas que comunican con alguna bóveda inmediata".

Fue en 2003 cuando el Consorcio de la Ciudad de Toledo inició los trabajos arqueológicos en el recinto, lo que ha permitido datar este depósito de agua, con capacidad superior a los 273 m³, en la segunda mitad del siglo I. Su construcción se realizó con piedras con mortero de cal, yeso, arena y sillares de granito, que aún pueden apreciarse. El estudio arqueológico también ha arrojado luz sobre la planta de la iglesia de San Ginés, la ubicación de los accesos y los espacios que se utilizaron para realizar enterramientos. Estos trabajos de restauración garantizan la conservación de uno de los espacios más sugerentes de la ciudad, que, desde enero de 2008 puede visitarse los viernes y los domingos en rutas organizadas por el Consorcio toledano.



Ayuntamiento de Monturque



A. C. Lapis Specularis

lerías, más probabilidades de encontrarse con este problema. Los romanos encontraron la solución en la realización de galerías de drenaje con trazados de varios kilómetros de longitud, como en Coto Fortuna (Mazarrón, Murcia), donde se hacía circular el agua por una galería de 2 kilómetros de largo y 1,30 metros x 2 metros de sección, a 70 metros de profundidad. También introdujeron sistemas mecánicos de desagüe, como la noria o rueda de cangilones, el tornillo de Arquímedes, o más complejos, como la bomba de Ctesibius.

A cielo abierto

El gran paso tecnológico de la ingeniería romana en las explotaciones a cielo abierto fue la utilización extensiva de la fuerza hidráulica aplicada en los yacimientos auríferos del noroeste peninsular. El agua se utilizó como elemento de trabajo principal, tanto en el proceso de extracción como en el lavado de materiales y la evacuación de estériles. Con ello se redujo la necesidad de mano de obra,

Arriba, cisternas de Monturque (Córdoba) y bomba de Ctesibius. Debajo, galería de una mina de 'lapis specularis'.



elevando también la capacidad técnica de movimiento de tierras a un nivel que no se superó hasta el siglo XIX.

El ejemplo más emblemático de estos trabajos es la explotación aurífera de Las Médulas, en El Bierzo (León). El despliegue de medios aplicado en este yacimiento minero fue impresionante, con la construcción de una enorme red hidráulica de captación, traída y almacenamiento de agua. El agua se captaba en ríos y manantiales, conduciéndose por canales, para lo que los romanos debieron solventar los problemas impuestos por la orografía, manteniendo un perfecto nivel de la pendiente de la conducción del agua. Para ello se construyeron kilómetros y kilómetros de túneles excavados en la roca que horadan el interior de las montañas de Las Médulas.

El agua, una vez captada, se conducía por los canales a la cima de la explotación, almacenándose en grandes estanques (*stagmas*). Y ése es el comienzo de la compleja técnica extractiva conocida como *ruina montium*. El agua embalsada llenaba por completo los estanques. Cuando lo creían conveniente, abrían las compuertas de estos embalses y hacían pasar el agua por las galerías excavadas en la montaña, produciéndose la erosión de los materiales. La inmensa masa de agua y barro se arrastraba hacia los canales de lavado, donde se cribaba la tierra hasta separar el metal.

Esta técnica, para la que fueron necesarios la construcción de casi 600 kilómetros de canales y galerías, dejó en el lugar una huella paisajística espectacular, barrancos ruiniformes y de color rojizo de más de 100 metros de altura, que sobresalen en-



tre la vegetación de castaños, matas de roble y brezos. Este paisaje singular que ha dejado la actividad minera fue incluido en la lista de Patrimonio Mundial de la Unesco en 1997.

‘Qanat’ hispánicos

España, donde la huella árabe es profunda, atesora numerosos ejemplos de este sistema de abastecimiento de agua de origen oriental, basado en la construcción de galerías subterráneas, túneles o minas para captar las aguas de lluvia retenidas en capas permeables del terreno, apoyadas sobre otras impermeables.

El origen del arte del *qanat* o galería subterránea se remonta a épocas prerromanas, y en su evolución, romana, árabe o medieval, reproduce varios elementos esenciales:

- Galerías: captan las filtraciones del terreno, se distribuyen en planta arborescente o cruciforme, sin revestir cuando el terreno lo permitía, pero frecuentemente revestidas de ladrillo o losas de piedra. Conducen el agua por gravedad.

Excavación en roca en el monte Furado para canalizar el agua del río hacia el yacimiento de Las Médulas.

El ‘qanat’, galería subterránea para captar aguas pluviales, se remonta a épocas prerromanas, pero fue muy empleado por los musulmanes durante la ocupación de España

- Dimensiones casi fijas: entre 1’7-2 metros de altura y de 0’6 a 1 metros de anchura.

- Pozos verticales de ventilación, que conectan la galería con el exterior.

- Existencia a lo largo del recorrido de las galerías principales de salas o estancias abovedadas (cubas o *qubbiyas*) con arcas para el reposo, mezcla o distribución del agua.

- Presencia del *castellum aquae* o piscina limaria en la salida de la galería principal, de donde parte la conducción que lleva el agua a la villa, fuente o campo de regadío.

En la península Ibérica, la técnica del *qanat* llegó a al Andalus en los primeros años de la conquista árabe pero no se puede descartar que este arte milenario proceda de época romana, como lo atestiguan los restos de estas construcciones en España, como en Mérida, donde los acueductos presentan un largo *specus* con pozos subterráneos.

La presencia histórica de los *qanats* es muy importante en los países mediterráneos. Se han encontrado conjuntos de cierta relevancia en Francia, Portugal, Córcega, Sicilia, Egipto, Israel-Palestina o Irán. En España la huella es evidente y existen ejemplos en Andalucía, Mallorca, Madrid... Hay que destacar también la transferencia tecnológica de las galerías a la América hispana, donde coexistieron antiguas técnicas autóctonas, como los apanles mejicanos y puquíos andinos, con las galerías construidas en tiempos coloniales siguiendo la tecnología al uso en España.

Viajes de agua

Este ancestral sistema de captación y distribución de aguas tiene en la ciudad de Madrid uno de los ejemplos más significativos de la historia hidráulica de España. Las galerías, llamadas en Madrid “viajes de agua”, fueron el único sistema de abastecimiento con que contó Madrid desde su fundación en época musulmana (siglo IX) hasta mediados del XIX, cuando se creó el Canal de Isabel II. Para Santos Madrazo, los viajes de agua han sido la gran originalidad de la capital durante siglos y sus habitantes se han sentido siempre orgullosos no sólo por la abundancia y calidad de las aguas, sino por su original sistema de captación. De la importancia histórica, técnica y cultural de estos via-



A. C. Lapis Specularis

Izquierda, galería del complejo de Peña Cortada (Valencia). Derecha, galería de una mina de 'lapis specularis' y entrada a una mina aurífera romana en Asturias.



jes baste decir que la Unesco recomendó en 2002 su protección como Herencia Mundial.

Para conocer mejor la construcción de estos viajes de agua, el investigador Emilio Guerra Chavarino da tres nombres básicos: Andrés García de Céspedes, cosmógrafo mayor de Felipe II, inventor del cuadrante geométrico, instrumento de nivelación aplicado en la construcción de galerías; Teodoro Ardemans, fontanero mayor con Felipe V y, entre otros cargos, veedor de las conducciones de agua y maestro mayor de las fuentes de Madrid, y Juan Antonio Arnar de Polanco, autor de varios tratados sobre las aguas de Madrid, las fuentes y los viajes subterráneos. A través de esos especialistas y sus obras conocemos la técnica y evolución de este sistema de abastecimiento.

Los primeros viajes madrileños son de origen islámico aunque no se ha conservado de ellos ninguna referencia escrita. Ardemans los describe en sus tres partes esenciales: red de pozos y galerías de captación, galerías de conducción y otra red de distribución que termina en las fuentes para el consumo. Eran como ríos subterráneos artificiales que desembocaban en aljibes, desde donde se distribuía el agua a través de fuentes públicas.

En 1830 existían en Madrid 30 viajes de agua, con un recorrido de más de 124 kilómetros de galerías, de los cuales 70 correspondían a los cinco viajes principales: Alto y Bajo Abroñigal, Alcubilla, Amanuel y

Fuente Castellana. Los puntos de arranque de las minas estaban situados casi siempre al norte y este de la villa, principalmente en el camino de Fuencarral y Alcalá, distantes de la capital entre 7 y 12 kilómetros, y con desniveles entre 80 y 100 metros, lo que equivale a una pendiente en torno al 1%.

Al llegar los viajes de agua a la ciudad comenzaba la red de distribución por medio de galerías de conducción, que iban revestidas interiormente y provistas de canalones que podían ser de barro, tubería de hierro fundido, de canaleta... Desembocaban las galerías en las fuentes, públicas o privadas. En Madrid existieron unas 500 fuentes particulares y unas 77 públicas que suministraban agua gratuita a 128 caños. En un principio, a las fuentes iban los vecinos a recoger el agua, surgiendo posteriormente el oficio de aguador, la persona encargada de suministrar cántaros de agua a domicilio.

El auge de los viajes de agua tuvo lugar en tiempos de Felipe III, cuando la corte vuelve a Madrid y es necesario abastecer a una población que pasó en pocos años de 14.000 a 42.000 habitantes. Es entonces cuando se construyen las galerías de Alto y Bajo Abroñigal, el viaje de la Castellana y el de Amanuel, que conducía sus aguas al antiguo alcázar. A lo largo de los siglos XVII, XVIII y primera mitad del XIX, los viajes de agua son la única fuente de abastecimiento de la ciudad y constante tema de preocupación, tanto por la cantidad como por la ca-

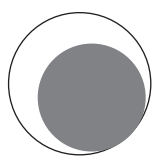


Izquierda, galería romana en Tiermes (Soria). Arriba, canalización del acueducto de Tempul (Cádiz).

lidad de las aguas. Por ello, en 1617 se crea la Junta de Fuentes, encargada no sólo de buscar nuevas minas, sino también del cuidado, reparación y distribución equitativa del agua, así como de controlar los caudales de los viajes.

A pesar de los numerosos proyectos realizados, en la primera mitad del XIX Madrid seguía bebiendo de los viajes, por lo que el Ayuntamiento, principal propietario de los mismos, seguía abriendo nuevos caudales, ampliando galerías, haciendo reformas... Aun así, la necesidad de agua de la ciudad era evidente. Hacia 1850 los madrileños sólo disponían de 7 litros diarios por persona para 220.000 habitantes. Ante esta situación, se pensó en la conveniencia de conducir a la capital las aguas de río Lozoya. Éste fue el germen del Canal de Isabel II,

El 'qanat' de Ocaña, una reliquia hidráulica



Impresionante obra hidráulica donde se reconocen elementos romanos, árabes, medievales y

renacentistas, el 'qanat' de Ocaña (Toledo) es un ejemplo de los viajes de agua que abastecieron Madrid hasta mediados del XIX. Bien conservada, aún hoy sigue proporcionando el 20% del abastecimiento de agua a la ciudad.

La ciudad se enclava en la Mesa de Ocaña, con buenas condiciones hidrogeológicas. Páramo alto de terreno calizo, a sus pies nacen manantiales que se han aprovechado para el abastecimiento humano, abrevado de animales, riego de huertas, etc... Estos manantiales se captaron también para el abastecimiento de Aranjuez. Incluso

Fernando VI, en 1757, viendo la calidad de esta agua, más fina que la del Tajo, mejoró las conducciones y aumentó las arcas de limpieza, en un "viaje" de captación y transporte de más de 10 kilómetros para abastecer de agua el palacio y caserío del Real Sitio, algo que ha perdurado hasta los años 80.

Por las características hidrogeológicas del terreno, se dan notables variaciones en la calidad del agua, y precisamente el 'qanat' de Ocaña se diseñó teniendo en cuenta estas variaciones. Así, la Fuente Grande, por sus diversos caños y abrevaderos, conduce independientemente desde su origen las distintas calidades de agua sin mezclarlas, dedicando las mejores al consumo humano y las peores al abrevado de animales y al lavado de

ropa y enseres.

El 'qanat' participa de las viejas técnicas hidráulicas romanas y árabes. El conjunto es un palimpsesto, que nace a partir de una galería romana. Ésta se reconstruyó en el siglo XVI en estilo herreriano con numerosos túneles y salas abovedadas. Tiene dos galerías principales de 400 metros. La Galería Antigua lleva dirección nordeste desde la Fuente Grande aguas arriba. Es fácil seguir su recorrido gracias a los pozos de aireación, espaciados cada 40 metros, con una profundidad de 7 a 11 metros. Exteriormente se localizan por su remate en forma de capirote, con varios taladros en su extremo que sirven de respiraderos y coronados por una bola de piedra. La galería, de amplias dimensiones,



A. C. Lapis Specularis



Izquierda, acceso a una mina de 'lapis specularis'. Arriba, galería subterránea excavada por los romanos en Tiermes (Soria).

que acometió en 1851 la primera gran obra hidráulica del país, la presa del Pontón de la Oliva, desde donde se captaron las aguas que, por medio de un canal de fábrica de 70 kilómetros, llevaba el agua del Lozoya hasta el gran depósito de aguas de Chamberí. El agua llegó por fin en 1858.

A partir de ese momento, los viajes cayeron en desuso por abandono y contaminación de las aguas. En la actualidad se conservan algunos tramos aisla-

dos, pero en peligro de desaparición. Los más notables son los de Fuente del Berro, Amanuel y San Isidro. Queda como reliquia, en perfecto estado, el *qanat* de Ocaña (Toledo), aún utilizado en parte para abastecimiento de la población.

Túneles en la Edad Media

Al margen de las construcciones subterráneas que siguieron las pautas y técnicas de romanos y árabes, son pocos los ejemplos medievales de otro tipo de construcciones subterráneas en esta época de cierto retroceso técnico. Por eso hay que destacar los restos del complejo subterráneo del castillo de Burgos, con su impresionante pozo y las galerías, que constituyen una gran obra de ingeniería medieval. Y es que en este castillo, situado en el cerro de

conduce las aguas de manera independiente según su calidad. Así, por el suelo se disponen dos canales encastrados, separados por un andén por donde se puede transitar. La galería, rectilínea, posee obras de infraestructura como la Cámara de Isabel la Católica, de grandes dimensiones y bella arquitectura, cubierta por una bóveda de medio cañón, donde se encuentra la arqueta de reparto general de las aguas que llegan por las galerías. Otro espacio de interés es la Sala Oscura o Cámara Oculta.

La segunda galería principal, la Galería Nueva, con recorrido sureste, tiene un trazado complicado, con dos cámaras principales, varias salas y galerías hoy tabicadas. Destaca la Sala de

los Secretos, donde reposan y se clarifican las aguas. También brilla la Sala del Pozo, que toma el agua de un pozo excavado y presenta unas aguas de intenso color turquesa. Este viaje nuevo se levantó en tiempos de Felipe II, siendo la parte renacentista de esta singular obra hidráulica. Sigue el mismo estilo de la fuente monumental: galerías y salas de fábrica de ladrillo, gran porte de las cámaras, simetría en la disposición de salas y galerías...

Enmarcada en una espectacular plaza empedrada de 200 m² se sitúa la monumental Fuente Grande, de estilo herreriano, construida entre 1573 y 1578 y atribuida a Juan de Herrera. Por sus numerosos caños de bronce brota el agua para consumo

humano (el agua fina), mientras que las aguas más duras van a un gran lavadero con dos enormes pilones de los que podían hacer uso hasta 300 lavanderas simultáneamente. Su racional distribución y construcción hacía que las aguas sobrantes se canalizaran para el riego de los huertos circundantes.

Actualmente, el 'qanat' de Ocaña sigue abasteciendo en parte a la ciudad, y es que su estado de conservación es excelente. Su interés arqueológico, cultural, arquitectónico e hidrogeológico es patente, por lo que su futuro, en el que ya trabajan el Ayuntamiento y otros organismos públicos, puede ser de ámbito cultural, haciendo circular de nuevo el agua por sus caños, como un bien artístico y turístico de primer orden.



dad y 1,75 metros de diámetro, con husillos laterales, hasta 6, de 1,40 metros de diámetro interior, contruidos para poder acceder hasta su fondo. Todo ello en sillería de piedra caliza.

Históricamente, este conjunto ha maravillado a todos cuantos lo han visitado. Vicente Lampérez lo definía como “una impresionante construcción”; Barrio Villamor (1657) lo consideraba como “una obra de encantamiento”, por su excelente construcción, y Leopoldo Centeno lo define como “algo excepcional, único, soberbiamente militar y constructivo, de gran ingenio militar, un modelo de pozo castelar”.

El pozo tiene obra de fábrica de sillería, predominando la caliza de la zona. Esta obra de sillería da forma al pozo, un cilindro hueco vertical de 61,50 metros de profundidad y 1,74 metros de diámetro interior. A lo largo de su perímetro hay numerosos ventanucos de ventilación e iluminación. Para el acceso al fondo están los 6 “husillos”, escaleras de caracol que forman una única estructura con el pozo. Cada husillo tiene una altura media de 10 metros, con un número variable de escalones, que oscilan entre los 33 y los 54. Para combatir la sensación de mareo que produce descender 278 escalones, los husillos se disponen con un descenso en la dirección de las agujas del reloj los cuatro primeros y en sentido contrario los dos últimos.

El diseño de pozo y husillos se concibió de forma conjunta, pues estos últimos no son añadidos al pozo sino que forman parte de la construcción global de la fábrica. Lo más probable es que ésta se realizara de abajo arriba, es decir, excavación y levantamiento de la sillería desde el fondo hasta la superficie sin juntas horizontales.

Las galerías

Los investigadores de esta obra creen probable que su finalidad fuera la obtención de agua, aunque

otros, como Gil Gabilondo, sostienen que el pozo era un mero respiradero construido como hueco de ventilación para facilitar el trabajo de las galerías que hay en su fondo. Las galerías son la parte más enigmática. Podrían ser caminos in-

Grabados de aguadores, profesión surgida en Madrid para la distribución de cántaros de agua a domicilio.



San Miguel, se ha conservado de forma casi intacta un impresionante pozo de 62 metros de profundidad, alrededor del cual se desarrolla un entramado de galerías subterráneas de más de 300 metros de longitud.

Aunque el castillo comienza a construirse en el año 884, el pozo data de los siglos XII y XIII. Calificado como “imponente legado de la construcción y cultura medieval”, este pozo consiste en un gran cilindro hueco de casi 62 metros de profundi-

El subsuelo del castillo de Burgos es recorrido por una larga red de galerías que constituye una gran obra de la ingeniería medieval

ternos de comunicación con la ciudad en caso de asedio. Otros consideran que se trata de minas y contraminas realizadas en épocas de asaltos a la fortaleza. Tampoco puede descartarse que sean excavaciones hechas en épocas recientes.

Estos pasadizos se componen de una amplia red de galerías laberínticas, como la Cueva del Moro, de 60 metros de longitud y sinuoso trazado a 10 metros de profundidad, abierta en calizas y con dos fosos en los extremos: el del inicio, muy profundo, a casi 25 metros, y el último, poco profundo. Ninguno de estos pozos y galerías tiene salida. Las galerías de la Carretera, la Caviidad, los Bomberos... también mueren sin tener salida. Aparentemente no conducen a ninguna parte. Para los expertos, estamos ante un entramado de lucha subterránea, minas y contraminas construidas a lo largo de 1.000 años de asedios, de ahí las extrañas conexiones entre galerías, las vías sin salida y la existencia de los fosos, que son auténticas trampas de defensa.

Actualmente, la fortaleza de Burgos está parcialmente reconstruida y todo el

recinto se ha convertido en un centro de interpretación de la historia de la ciudad. Las puertas del castillo se abren, pues, tras una larga rehabilitación, que ha recuperado tanto la fortaleza como su entorno. Además de pasear por el interior de sus muros, la visita obligada es bajo tierra, pues ya se puede recorrer parte del complejo subterráneo. En concreto, está habilitado el trayecto de la galería principal, llamada también la Cueva del Moro. Una vez que los visitantes han recorrido la galería, ascenderán por



Ayuntamiento de Burgos



Arriba, galería subterránea del castillo de Burgos. Debajo, castillo de la Mota, cuyo subsuelo está horadado por redes de galerías de naturaleza defensiva.

la escalera de caracol, los husillos, hasta el brocal del pozo, donde finaliza la visita a la fortaleza.

Túneles renacentistas

Como ejemplo de la técnica tunelera del Renacimiento, España atesora uno de los testimonios más relevantes de toda Europa, el túnel o mina de Daroca (Zaragoza), obra hidráulica singular construida entre 1555 y 1560 para evitar las inundacio-



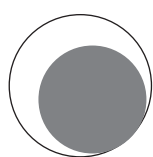
nes torrenciales en esta ciudad. Su construcción fue un hito importante en la ingeniería del Renacimiento. Está considerado como el monumento hidráulico más importante de Europa en la época moderna, es decir, entre los siglos XVI y XVIII.

Es obra del ingeniero, arquitecto y escultor francés Quinto Pierres Bedel, especialista en obras hidráulicas, que disfrutó de gran prestigio en Aragón

Interior de las Cuevas de Hércules, en Toledo.

durante el reinado de Felipe II. A este ingeniero también se debe la traída de aguas a Teruel, quizás las dos obras más importantes de Bedel en España.

La mina es, a grandes rasgos, un largo túnel de más de 600 metros de longitud y hasta 8 de altura que atraviesa de lado a lado el cerro de San Jorge. El problema de la ciudad era que la calle Mayor era un barranco natural que funcionaba como tal cuan-

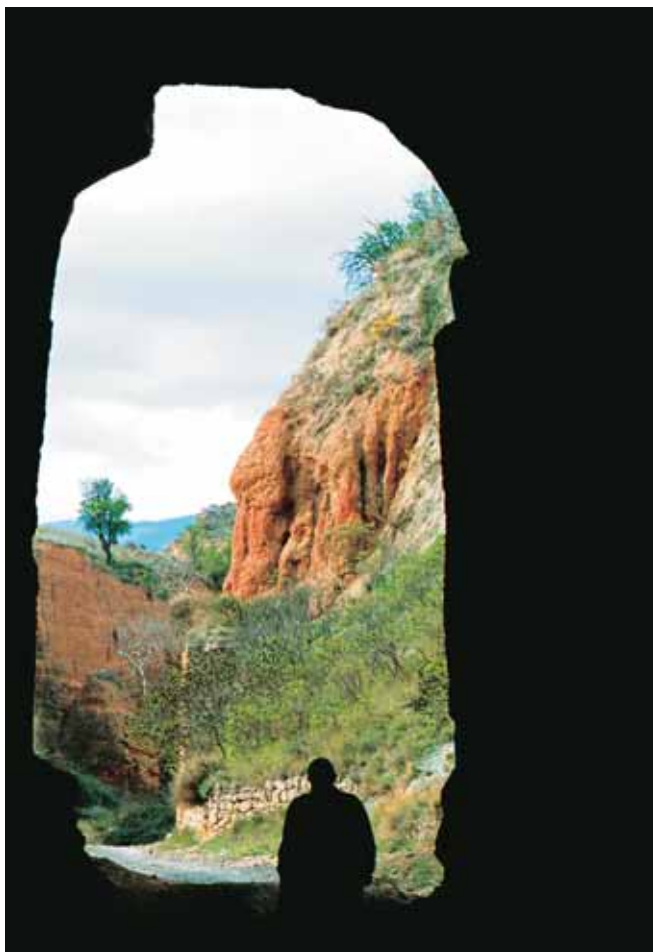


Arnedo y sus túneles

La ciudad de Arnedo (La Rioja) conserva una serie de obras subterráneas que atraviesan el interior de la ciudad, de gran interés pero poco estudiadas. Para algunos especialistas son un ejemplo de ingeniería medieval de carácter militar. Otros opinan que son parte del sistema de abastecimiento de aguas a la ciudad. Antonio González Blanco cree que son una obra musulmana de finalidad militar, como poterna para entrada o salida de la ciudad desde el castillo durante los asedios. Son de grandes dimensiones, 10 metros de alto por 4 de ancho, y de carácter laberíntico, pues junto a la galería principal se desarrollan otros túneles menores hechos como para desorientar al que osara transitar por ellos. Lo más inquietante: no se conoce ni su comienzo ni su final, pero tienen más de 2 kilómetros de recorrido

en galería subterránea. El túnel principal se complementaría con otros cuyo fin sería el abastecimiento de agua y que se centran en el colector que sirvió para entubar el agua que aún corre en dirección oeste-este.

No existen datos para identificar los orígenes de estas galerías, su cometido, los usos que hayan podido tener o su cronología. La utilidad como conducción de agua sigue siendo una posibilidad realista, aunque las grandes dimensiones de los túneles son desmesuradas para un uso hidráulico. No obstante, otros indicios avalan el uso hidráulico, como las marcas en las paredes o la existencia de aliviaderos en algunos tramos. De ser así, parece claro que se concibió para llevar un volumen de agua importante, pero tampoco se sabe si llegó a funcionar con eficacia en algún momento.



Ayuntamiento de Daroca

do las lluvias eran fuertes. La finalidad del túnel era en desviar las aguas directamente hacia el río Jiloca, evitando los graves perjuicios que las riadas provocaban a la población.

En 1555 comenzaron las obras, que durarían poco más de cinco años. Se trataba de horadar un túnel en el que se moverían más de 100.000 metros cúbicos de tierra y piedras, levantar más de 2.000 millones de kilogramos de materiales y perforar más de 600 metros de longitud por 6 de anchura y 8 metros de altura bajo una montaña que se elevaba más de 100 metros por encima del túnel.

Los trabajos comenzaron por los dos extremos a la vez con el objetivo de que las dos cuadrillas de picadores del túnel se encontraran en el centro. Los cálculos debían ser muy precisos, no sólo de dirección, sino también de la inclinación del túnel, pues el lugar por donde se inicia y por donde tiene su salida no están al mismo nivel. La nivelación de la pendiente también era básica, para que el agua discurriera de forma natural en el interior y no se produjeran estancamientos ni retenciones. Los trabajos de las cuadrillas fueron agotadores, eran entre 30 y 50 picadores, divididos en 2 grupos. La perforación se culminó el 7 de febrero de 1560, cuando se encontraron las dos brigadas en el centro el túnel, de acuerdo con los planes trazados.

Merecen destacarse por su interés arquitectónico varias obras asociadas al desarrollo de la mina.

Dos instantáneas del túnel o mina de Daroca (Zaragoza), cuyo objetivo era evitar las avenidas de agua en la ciudad.

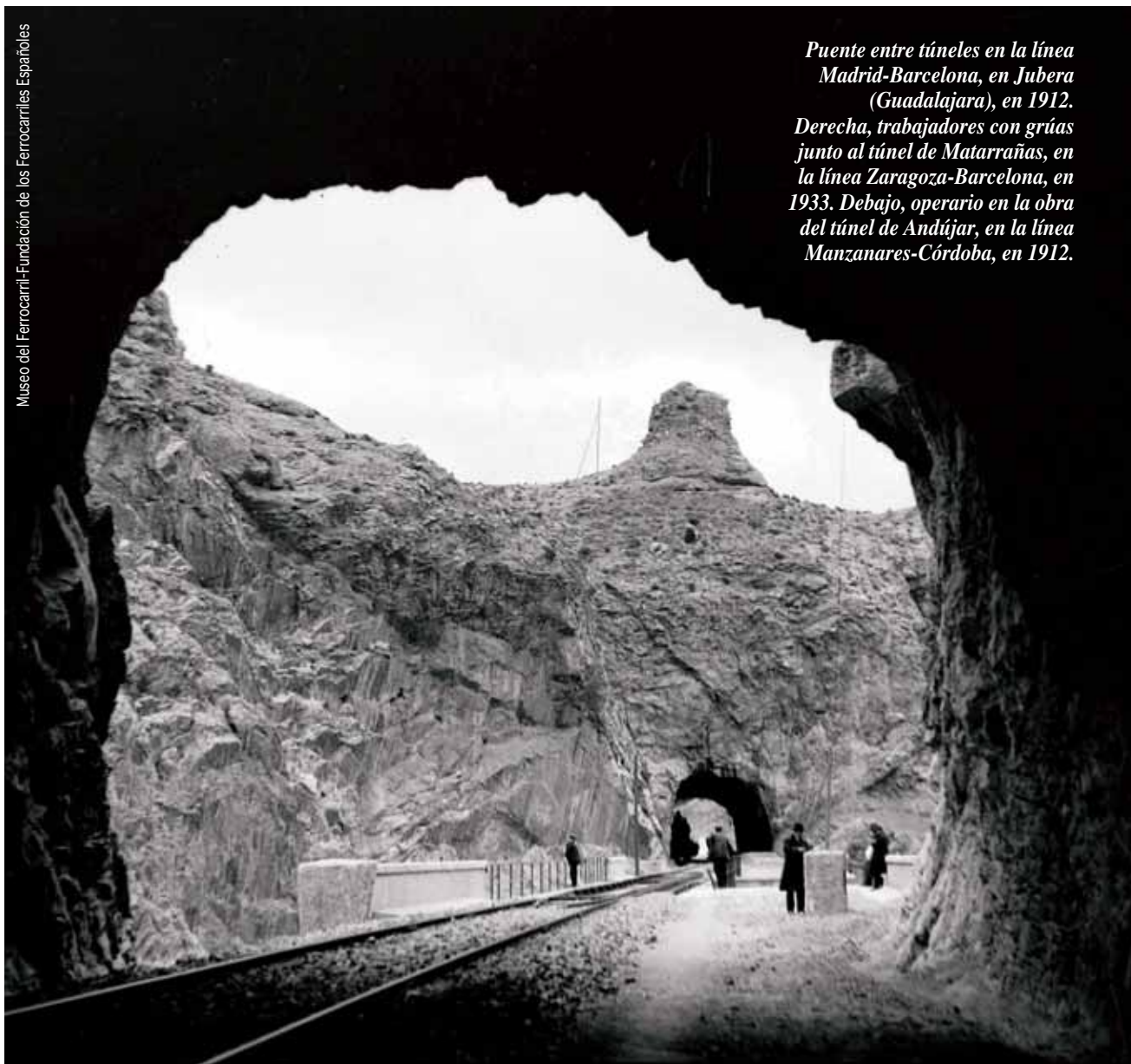
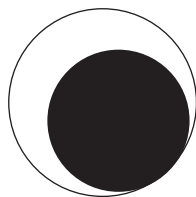
En primer lugar, la Barbacana, enorme dique de piedra sillar de más de 300 metros de longitud que servía de presa para recoger las aguas que venían del barranco y encauzarlas hacia la entrada de la mina. Destaca también la chimenea de ventilación, para lo que se perforó la montaña perpendicularmente de arriba abajo. Se sitúa a unos 30 metros de la boca de salida y su finalidad era igualar la presión que puede ocasionar la corriente de agua. Cuenta con 25 metros de anchura y 20 de altura.

El tramo a cielo abierto conserva un azud, llamado “la Rodadera”, a base de piedra sillar, construido para proteger otra de las acequias de época árabe que pasa por debajo.

También destaca un pequeño acueducto, muy bello, de un solo arco y de construcción similar a los arcos del acueducto de Teruel. Este tramo a cielo abierto se construye para el paso de las aguas de otra de las acequias árabes de la zona.

Las dos bocas de la mina se embellecieron con sendas portadas de sillares, con doble función decorativa y protectora a la vez. Los sillares, lamentablemente, han desaparecido. En el interior también se construyen recios arcos de piedra para evitar posibles desplomes, sobre todo en los tramos finales, donde los materiales son más blandos y oponen menor resistencia.

Actualmente, esta obra hidrológica del siglo XVI, única en su género, está un poco olvidada, aunque su estado de conservación es muy bueno. ■



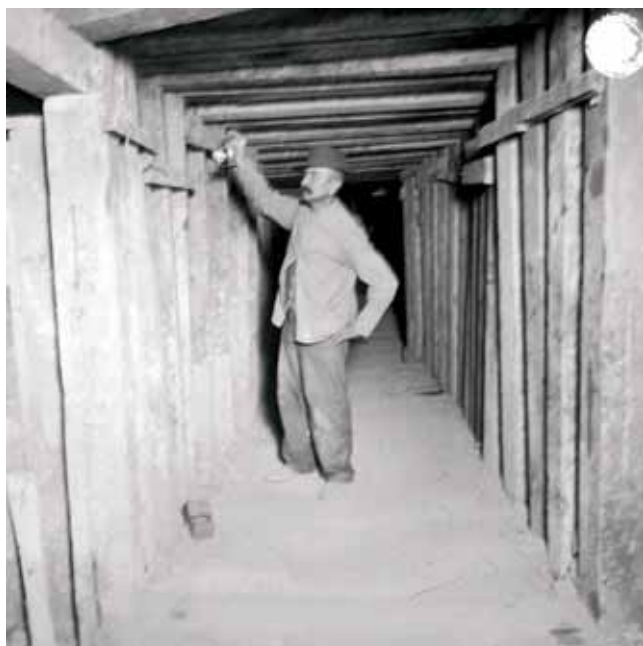
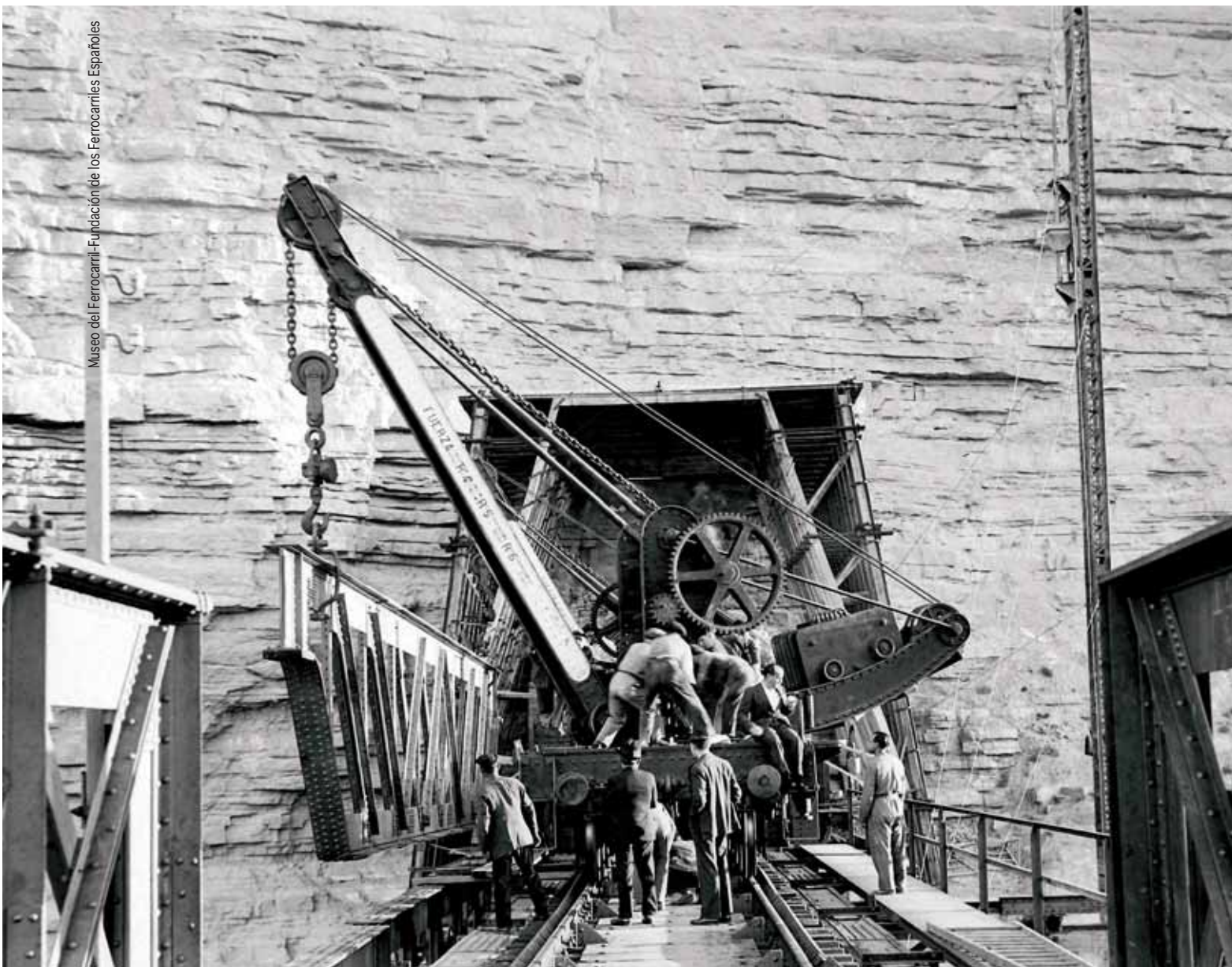
Puente entre túneles en la línea Madrid-Barcelona, en Jubera (Guadalajara), en 1912.

Derecha, trabajadores con grúas junto al túnel de Matarrañas, en la línea Zaragoza-Barcelona, en 1933. Debajo, operario en la obra del túnel de Andújar, en la línea Manzanares-Córdoba, en 1912.

La extensión de la red ferroviaria en los siglos XIX y XX generalizó la construcción de túneles por toda la geografía española

Por los cuatro puntos cardinales

La historia de los túneles ferroviarios de España, como la de su ferrocarril en general, está llena de aciertos y fracasos, diseños arriesgados y sencillos, túneles en servicio desde hace 150 años y túneles abandonados o no-natos, largos trayectos sin un solo túnel y cortos donde se enlazan como un rosario. El viajero, aun atraído por su misterio, ansía ver la luz que se le ofrecerá al final del túnel.



Museo del Ferrocarril-Fundación de los Ferrocarriles Españoles

MARÍA DEL CARMEN HEREDIA CAMPOS

En 1865, Madrid, eje del sistema radial de comunicaciones heredado de la red de caminos reales del siglo XVIII, ya se comunicaba con los principales puertos de mar españoles y atravesaba la frontera con Francia por medio de un nuevo sistema de transporte que entraba con fuerza y se imponía rápidamente sobre los transportes por caminos de rueda: el ferrocarril. La burguesía española, necesitada de obtener materias primas para sus industrias de los puntos de extracción, así como de ofrecer sus productos elaborados al mercado exterior, acortando los tiempos de traslado, fue la principal promotora de la introducción del ferrocarril arriesgando su patrimonio en unos tiempos en que el Estado, cauteloso con un sistema nuevo y costoso, sólo ofrecía la concesión y alguna subvención. Argumento, éste, suficiente para comprender que los inversores en este nuevo medio de transporte desearan diseñarlo en función de sus necesidades. Pero la península Ibé-



rica, que por su complicada orografía, había constituido históricamente un reto para el establecimiento de las comunicaciones, no lo iba a ser menos para el trazado de un ferrocarril que, además, debía ceñirse a unas limitaciones en pendientes y curvas impuestas por la potencia de las locomotoras de la época que tenían que tirar de pesados convoyes a fuerza de paladas de carbón.

Un componente nuevo se imponía: el túnel ferroviario, presente en casi todas las líneas españolas, como elemento fundamental para sortear obstáculos montañosos y ahorrar recorridos largos y tortuosos, participando en la vertebración del territorio peninsular y en la formación del nuevo mercado nacional, así como proporcionando una importante oferta de trabajo, aunque ensombrecida por los múltiples accidentes que se producían y, a pesar de los avances, se han venido produciendo en gran número hasta casi nuestros días. Grandes retos fueron los recogidos por los ingenieros de la época para tunelar el segundo país más montañoso de Europa, después de Suiza.

Arriba, un tren de vapor sale de un túnel en El Chorro (Málaga), en 1950, y prueba de carga del puente de Matarrañas, junto al túnel del mismo nombre, en 1931.



El gran reto del XIX: conectar la Meseta

La meseta Central, en alto y rodeada de sistemas montañosos por sus bordes, debía afrontar el reto de salir de Madrid hacia las fronteras y las costas salvando, hacia el norte, la cordillera Cantábrica para alcanzar aquel litoral y Galicia; hacia el nordeste, el sistema Ibérico con la serranía de Cuenca para llegar a los Pirineos y los puertos catalanes; y hacia el sur, los montes de Toledo y sierra Morena para los puertos andaluces y la frontera portuguesa. La vía con menos impedimentos era la de los puertos levantinos, y mientras el norte y noreste tienden cortas líneas locales en los años 50, Madrid ya enlaza con Alicante y Valencia en 1859 con sólo tres túneles. Entre los años 60 y 80 sí tienen un desarrollo espectacular y a finales del siglo XIX, la red española, con 12.000 kilómetros, prácticamente está diseñada: desde Madrid se llega a Galicia, Gijón, Santander, Bilbao, los puertos de Levante y Andalucía y las fronteras con Francia y Portugal. En los años 80 del siglo XX, próxima la alta velocidad, centenares de túneles con-

El túnel de Reinosa, construido en el año 1866, fue el primer subterráneo ferroviario mayor de un kilómetro en España



Museo del Ferrocarril-Fundación de los Ferrocarriles Españoles

vencionales horadan los recorridos. Muchos de ellos, protagonistas de este artículo, superan el kilómetro de longitud.

Las excavaciones pioneras: pico y pólvora

Hasta el año 1861, la técnica habitual para construir túneles en España era prácticamente toda ella a mano. Si el túnel era de tierra, tocaba pico y pala. Si era de roca, un operario sujetaba y giraba la barrena de hierro mientras otro la golpeaba con un martillo apropiado. Terminados los huecos, se rellenaban con pólvora y se procedía a la voladura, sistema que, es obvio, producía frecuentes accidentes y lentitud en el proceso.

El primer túnel kilométrico: Venta de Baños a Santander

Una sencilla venta palentina, dependiente de Baños de Cerrato, fue designada como punto de confluencia ferroviaria de la Meseta Norte con el ca-

*Grabado con
trabajadores
del tren minero
de El Langreo.*



Vía Libre. Fundación de los Ferrocarriles Españoles

mino a Santander así como punto de encuentro con la línea Madrid a Irún, en su tramo Valladolid a Venta de Baños (Palencia) ya en ejecución. La línea se construye por tramos, por su gran dificultad, y en 1857 se abre el primero desde Alar del Rey a Reinosa, importante punto de concentración de los cereales castellanos para su traslado por carreteras por el Camino Real de Burgos a Santander desde el siglo XVIII. Hasta nueve años después el tren no pudo pasar de la rampa Reinosa-Bárcena (en las Hoces) hacia Santander, ya que implicaba bajar un desnivel de 562 metros. En 1868 el eje fue terminado con proyecto del ingeniero Cayetano González.

De sus 32 túneles, el más importante y emblemático es el de Reinosa, de 1866, construido por la Compañía del Ferrocarril de Isabel II. Hoy día discurre bajo Reinosa, aunque no fue así en sus comienzos, pues la actividad comercial se desarrollaba en torno al Camino Real hasta que Reinosa la atrajo a sus dominios. Sus 1.276 metros de longitud de vía única se elevan a una cota de carril de 829 metros sobre el nivel del mar entre curvas y rectas, bajando un escalón entre sus bocas de 20 metros.

Madrid-Alicante-Valencia

Primera y temprana línea completa es la que une Madrid con Alicante. Se desliza plácidamente por Aranjuez y Albacete sin necesidad de túneles hasta La Encina, antes de bajar hacia Alicante, donde nace el ramal La Encina a Valencia que pronto atraviesa uno de los pioneros túneles kilométricos españoles, el túnel de Madariaga, en Fuente la Higuera, de 1.510 metros, construido en 1859 por la Sociedad de Ferrocarriles de Almansa a Valencia y Tarragona, para superar el cordal de Albarizas y bajar siguiendo el río Canyoles hasta la capital valenciana. El túnel tiene el carril a una cota de 590 metros y la embocadura, construida con sillería, presenta un arco de medio punto flanqueado por dos fuertes pilastras adosadas. Rodeado de vegetación



Arriba, grabado del tren minero El Langreo, primer ferrocarril en Asturias, de 1852. Óleo de Vázquez Villarroel. Izquierda, boca de túnel en el desfiladero de Los Gaitanes hacia 1867, principal paso ferroviario desde el centro peninsular hasta Andalucía en el XIX.

y fuera de uso por el nuevo trazado de la línea para alta velocidad, espera su adecuación para el paso de trenes de mercancías con ancho ibérico.

Por la misma línea se construye otro ramal desde Chinchilla, la línea Chinchilla a Cartagena, de MZA, de 210 kilómetros, que abrió su primer tramo en 1863 entre Murcia y Cartagena. El proyecto del ingeniero José Almazán justificaba su trazado por Cieza hacia Murcia porque “yendo por donde

está apiñada la población y la riqueza agrícola de la provincia de Murcia, el tráfico parcial adquirirá un desarrollo inmenso”. De sus seis túneles, del año 1865, cinco se localizan en Hellín (Albacete), siendo el más largo el de Los Almadenes, de 1.055 metros, en el angosto paraje del mismo nombre, de una sola vía, a una cota de rail de 362 metros.

Zaragoza, encrucijada de comunicaciones

Importante encrucijada de caminos desde tiempos antiguos, Zaragoza se convierte en punto neurálgico y también pionero para el ferrocarril. La línea Madrid-Zaragoza parte en 1859 de Madrid pasando por Guadalajara y Soria y llega a Zaragoza en 1864, donde se establecerá el nudo de comunicaciones con el País Vasco, con la frontera francesa por Canfranc, con Barcelona e, incluso, con Valencia. La continuación desde la capital aragonesa hasta Barcelona acogerá una serie de túneles, ocho de ellos, de 1859, entre Castellbell y Vacarissas, y 25 en el paso de la sierra de Castelltallat. Sin embargo, habrá que esperar a la época de Renfe para contar con túneles de longitud considerable.

El lanzamiento de los 60 y 70: dinamita

En los años 60 se terminan importantes líneas y el tendido ferroviario alcanza los 3.000 kilómetros, lo que implica una gran actividad en la construcción de galerías. Sigue un estancamiento en los primeros 70, por la inseguridad política, y un relanzamiento al final de la década que continuará en alza en los 80. Los métodos de avance más utilizados son el austriaco, abriendo el túnel a toda sección, y

el belga, el más utilizado, abriendo una galería de avance de pequeña sección al nivel de los arranques que se va ensanchando en diferentes secciones hasta que el túnel adquiere las dimensiones finales de la bóveda. El sistema más usual sigue siendo manual, aunque con la utilización de dinamita.

Hacia los Pirineos: Madrid a Irún-Hendaya

La línea más llamativa de los 60, conocida como “la europea”, es la que parte de Madrid buscando la unión ferroviaria con el país galo a través de los Pirineos. Era una realidad que para el intercambio comercial y de viajeros con Europa se hacía necesario atravesar la magnífica y difícil cordillera y sus accesos más bajos eran las orillas cantábrica y mediterránea. Hacia el primero se dirige la línea, construida por Norte, con la intervención de ingenieros famosos como Sagasta, Santa Cruz, Uhagón, Echánove y otros, inaugurada en 1864 con grandes festejos de las cortes reales española y francesa, recorriendo 650 kilómetros hasta llegar a Irún. El largo recorrido se marcó por las provincias de Madrid, Ávila, Valladolid, Palencia, Burgos, Álava y Guipúzcoa con las mayores cotas en el sistema Central y en las escarpadas rampas que escalonan el descenso desde la meseta hasta el mar en Guipúzcoa.

El punto más alto, La Cañada (Ávila), a 1.350 metros, acoge al primer túnel, y desde ahí se inicia el descenso recorriendo otros 58 túneles, más de la mitad de doble vía –algo excepcional para la época–, de los cuales cinco superan el kilómetro. El primero, en Herradón de Pinares (Ávila), el túnel de Navalgrande, de 1.004 metros, se construyó en 1863 a una cota de 1.309 metros en línea recta. A su salida se despliega un amplio panorama de valles y suaves sierras y sigue el descenso hasta llegar a la Brújula I, en Barrios de Colina (Burgos), de 1.041 metros, construido en 1862 en curva y recta a una cota de 931 metros. Ya en Zegama, se inicia el recorrido más complicado de la línea por tierras guipuzcoanas, resuelto con los túneles de Otztaute, de 1864, con 1.156 metros de longitud a una cota de 610 metros, a cuya salida se desciende hasta el valle, y el de Onzurza, de 2.954 metros, el mayor de la línea terminado en 1864, que perfora el



Museo del Ferrocarril-Fundación de los Ferrocarriles Españoles



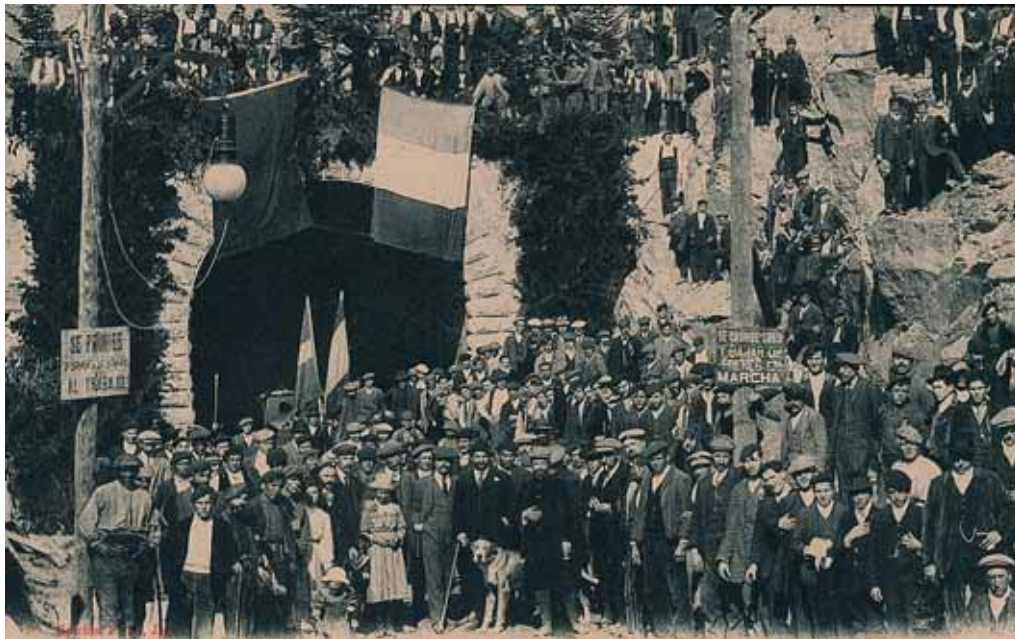
Museo del Ferrocarril-Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Arriba, túnel en construcción en Barcelona, 1922-26. Debajo, túnel del Salto de el Run (Huesca), a principios de 1910.

monte Aikorri entre curvas y rectas a una cota de 515 metros. Finaliza la serie con el túnel de Urnieta, en Andoaín, de 1.004 metros, a 54 metros sobre el nivel del mar, del año 1863.

Los industriales vascos buscan salida: Castejón de Ebro a Bilbao

Vizcaya será de las provincias más tempranas en intentar la unión ferroviaria con el mercado interior castellano y con el europeo. La corporaciones vizcaínas que obtienen la primera concesión de la importante línea Madrid-Irún, para pasarla por Bilbao, tienen que abandonarla por falta de capitalistas inversores, pero sí emprenden la construcción de su primer trazado de vía ancha, con la línea Castejón-Bilbao, esencialmente comercial, para conectar el puerto de Bilbao con el alto Ebro y al mismo tiem-



con 50 metros bajo tierra, la más profunda de España.

Dos caminos para ir a Galicia

Dos líneas se disputan el camino hacia Galicia en los primeros 60, ambas entroncadas con la línea Madrid a Burgos por Valladolid. Una, al norte, buscando el puerto de La Coruña desde Palencia por León y otra, más al sur, buscando el de Vigo partiendo de Medina del Campo hacia Zamora y Orense. Vence la primera en la pugna y llega a Astorga en 1866, sin túneles, donde esperará a los años 80 para atravesar los trechos más complicados. La línea por Zamora sólo llega a Toro en 1864, y ahí esperará aún más, pues el Plan General de Ferrocarriles de 1864 excluye la línea Zamora-Orense por no ofrecer beneficios “debido a las dificultades del terreno y a la poca vida de la comarca que atraviesa”. Queda, por tanto, expectante en la histórica ciudad hasta ser completada en el siglo XX, momento en que excavará sus túneles más complicados.

Abrir el amplio valle del Guadalquivir

Varias compañías se interesan prontamente por el camino hacia el sur. Andaluces y MZA compiten por el tráfico de los plomos de Linares o los carbones de la sierra cordobesa. Otras lo harán por los minerales de piritas, hierro y cobre de Huelva y, más tarde, por los de Almería y Granada, para embarcarlos para la exportación. Relieves como Sierra Morena y la Penibética se oponen a sus planes dando lugar a relevantes puentes, viaductos y túneles.

En 1862, ya abierto el tráfico entre Alcázar de San Juan y Santa Cruz de Mudela, con origen en Madrid y descenso por Aranjuez, el ferrocarril espera pacientemente a las puertas del difícil paso de Despeñaperros, en Sierra Morena. Cuatro años después, el tren cruza el legendario desfiladero y llega a Córdoba para enlazar con el ferrocarril que prestaba servicio, desde 1859, entre Córdoba y Cádiz con eje en Sevilla. El tramo de Santa Elena a Córdoba, construido en 1866 por MZA, tuvo que atravesar once



po con la línea Madrid-Irún en Miranda de Ebro (Burgos). La primera locomotora, “La Celestina”, partió de Castejón hacia Tudela el 29 de abril de 1861, y en 1863 ya se había completado el recorrido hasta Bilbao-Abando.

La línea, de 249,5 kilómetros, cuenta con 19 túneles. La mayor concentración se produce en el lazo de galerías que se dibuja en la altiplanicie de la sierra de Gibijo (Álava), aunque el mayor de ellos se localiza al final de la línea entre Bilbao-Abando y Basauri, el túnel de Cantalojas. Con 1.075 metros de longitud, fue construido en 1863 por la Compañía del Ferrocarril de Tudela a Bilbao, a una cota de 37 metros, con el recorrido en pendiente. Hoy día, este túnel será reutilizado en la nueva línea Bilbao-Orduña y en su caverna, que ha tenido que ser ampliada, se alojará la estación de Miribilla que será,

Vista de la fiesta en el túnel de Canfranc (Huesca) para inaugurar su perforación. Debajo, trabajos en la boca del túnel de Somport, en Canfranc.

Vista de la boca del túnel de Somport en el lado francés. Debajo, interior del túnel de Canfranc en pleno proceso de construcción.



Museo del Ferrocarril-Fundación de los Ferrocarriles Españoles



Museo del Ferrocarril-Fundación de los Ferrocarriles Españoles

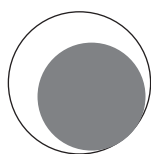
túneles cortos para finalizar con el kilométrico de Andújar (Jaén), con 1.024 metros de galería, todos de amplia boca semicircular para doble vía aunque sólo se instaló una.

Málaga enlaza con Córdoba

El trazado de la radial Madrid-Cádiz, y los beneficios que podía aportar el unirse a ella, impulsan al capital malagueño (Loring, Heredia y Larios) a construir la línea Córdoba a Málaga. Esta se abre en 1865, por la Compañía del Ferrocarril de Córdoba a Málaga, con un trazado por campiñas cordobesas hacia otro de gran belleza y dificultad, a partir de Bobadilla, por la sierra malagueña de Abdalajís. Este paso se resolvió siguiendo el curso del río Guadalhorce hasta Málaga mediante importantes obras de ingeniería en puentes y túneles, abiertos con pico y dinamita, en el paraje llamado "El Chorro". Varios de sus 14 túneles del siglo XIX, cortos por su dificultad y contruidos para doble vía que nunca se instaló, ofrecen al viajero el magnífico espectáculo del desfiladero de Los Gaitanes, aunque habrá que esperar a 1972 para tener dos túneles que superen el kilómetro nacidos tras la inundación de parte del trazado por las aguas del embalse del Guadalhorce. Estos túneles que, en parte, reutilizan otros anteriores, son el de Vado-Yeso (Antequera), de 1.684 metros, y el del Gaitán (Campillos), de 5.321 metros, ambos de Renfe y a cotas de 372 y 374 metros, respectivamente.

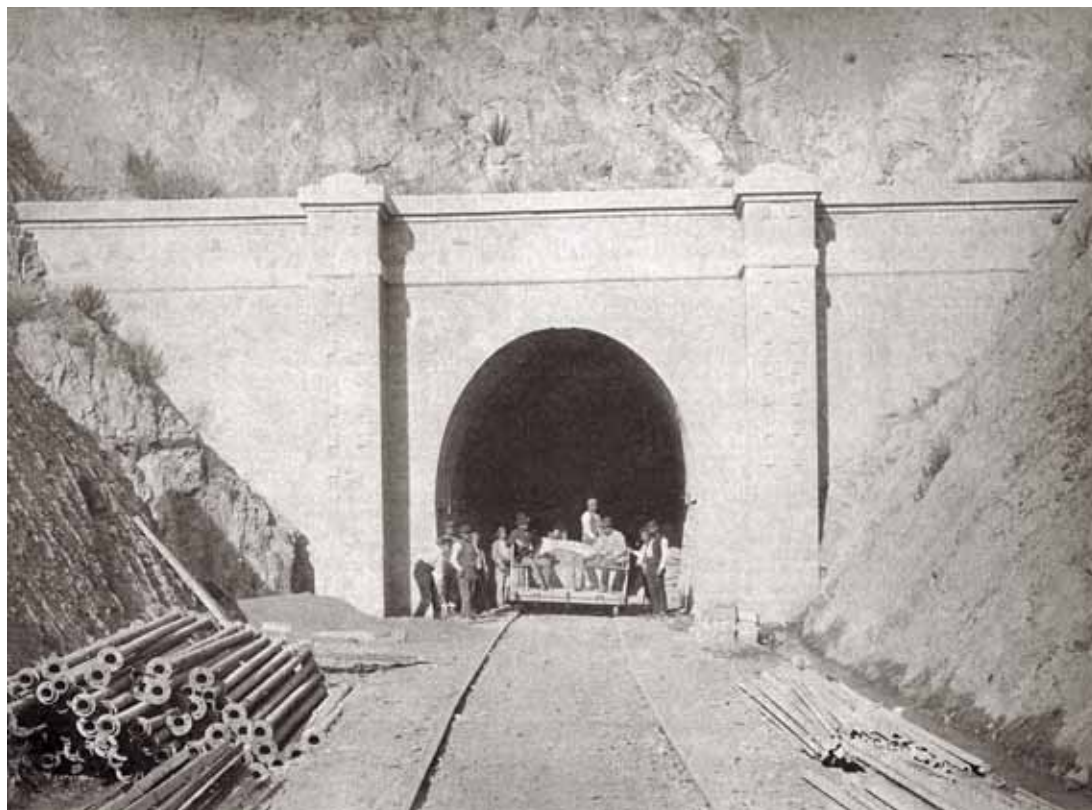
La comunicación radial con Barcelona

La unión entre Madrid y Barcelona se proyectó en dos tramos: Madrid-Zaragoza y Zaragoza-Barcelona por Caspe. El primer tramo se construye entre 1859 a 1864 por MZA, con 26 túneles, muchos de doble vía. La línea escala hasta su punto más alto entre Sigüenza (Guadalajara) y Medinaceli (Soria) donde se excava el túnel de Torralba, en 1863, a 1.090 metros de cota. Tiene 3.231 metros de longitud de doble vía y una amplia embocadura en la que se abre un gran arco semicircular con dos semipilastras adosadas a ambos lados. Le sigue el túnel



Un reto no siempre superado

Trabajo duro y nuevo era construir los primeros túneles ferroviarios para sortear los importantes obstáculos montañosos españoles. Los ingenieros, antes de construir un túnel, no sólo tenían que elegir el lugar adecuado sino también estudiar el tipo de roca, paso de manantiales, maquinaria apropiada, sistema de excavación, entibados a utilizar, recubrimientos, etc. Aun así, no pocas veces surgían sorpresas a medida que iban excavando e, incluso, se veían obligados a abandonar las obras. Con muchos condicionantes físicos y fuertes gastos, cualquier línea ferroviaria decimonónica y de los primeros años del siglo XX podía constituir un reto económico y tecnológico que no todas las iniciativas privadas superaban.



de Torralba viejo, llamado así aunque pertenezca a una variante de 1959, de 1.012 metros, en perfecta armonía con la arquitectura del anterior aunque en desuso hoy día. A partir de Medinaceli empieza un suave descenso pasando por Calatayud entre las últimas sierras hasta los 374 metros de la capital maña, donde la línea esperará casi treinta años a ser continuada.

Ingeniería de finales del XIX: mecanización

Desde finales del siglo XIX a los años 30 del XX se producen los primeros planes de obras subterráneas de gran importancia. La técnica de excavación de túneles avanza con la utilización de la perforadora de aire comprimido, aunque se evita por su mayor costo frente a la perforación manual, y a finales de siglo ya se utiliza la perforadora Ferroux, consistente en un imponente carro accionado por aire comprimido que movía simultáneamente seis barrenas orientables, con mucho rendimiento.

El difícil camino de León a Gijón

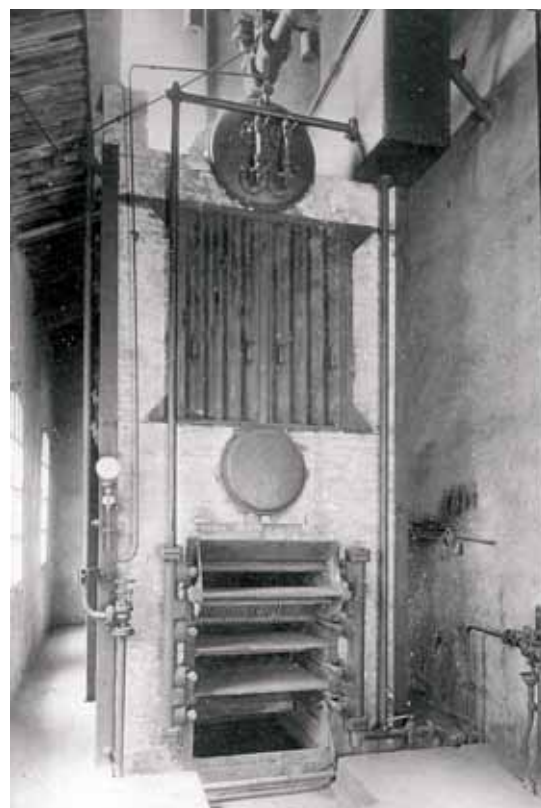
Asturias, a pesar de haber iniciado tempranamente las gestiones para su ferrocarril, tarda veinte años en conseguirlo, y no sólo por las extraordinarias dificultades del recorrido, sino por su negativa a construir un ferrocarril barato que luego tuviese dificultades para su explotación. La línea férrea de León a Gijón, obra de ilustres ingenieros como Regueral, Sanz, Inchaurreta y Angulo, obligada a excavar múltiples y difíciles túneles para salvar las

Boca del túnel de Argentera, que salva la sierra tarraconense del mismo nombre, construido en 1890. Derecha, sistema de ventilación del mismo túnel.

el paso de Pajares requirió cuatro años de excavaciones (1880-84) y 69 túneles para salvar el desnivel entre los 1.237 metros de altura de Busdongo (León) y los 420 de Campomanes. Empieza la serie de 1884, con el túnel de la Perruca, entre Villamán y Lena (León y Asturias) de 3.072 metros, importantísima obra orgullo de la ingeniería del siglo

fuertes pendientes, abrió su primer tramo más fácil entre León y la Pola de Gordón en 1868, pero no pudo finalizar las obras hasta agosto de 1884, celebrándolo con la asistencia a su inauguración de los reyes Alfonso XII y María Cristina. Cuenta con 100 túneles, muchos de doble vía, 91 de ellos del siglo XIX, en un camino de vueltas y revueltas, espectacular entre Pajares y Lena, hasta alcanzar Gijón.

Los primeros grandes túneles de la línea se construyeron en 1874 entre Lena y Mieres por Caminos de Hierro de Asturias, Galicia y León, pero



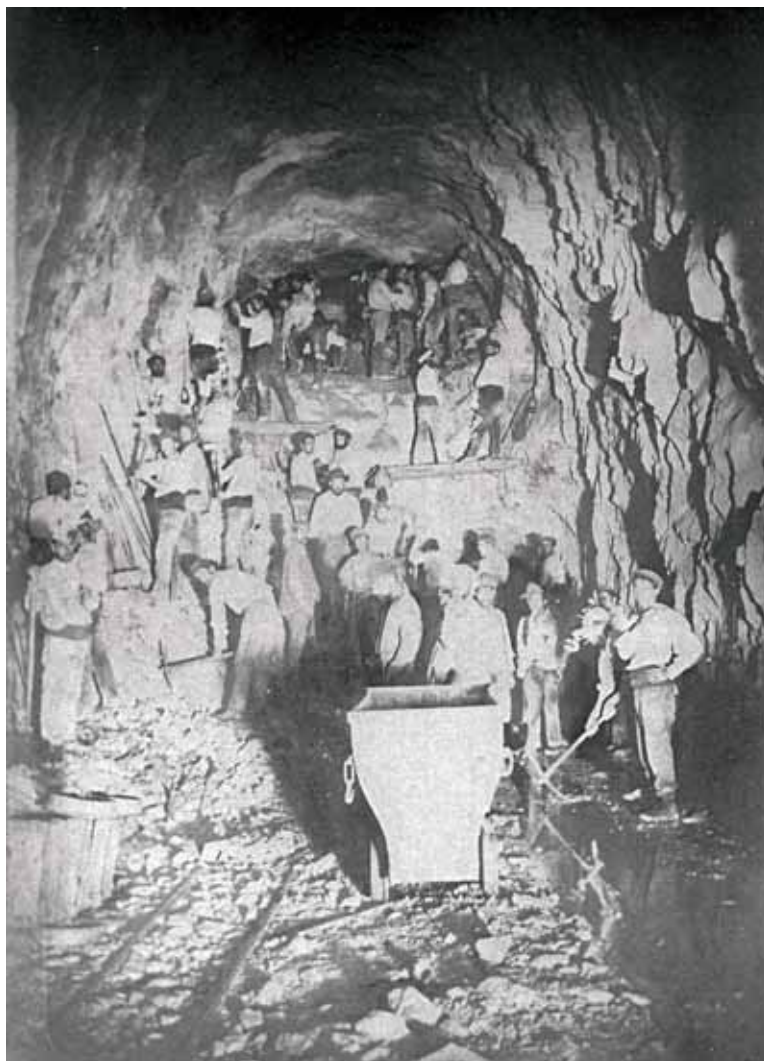
A finales del siglo XIX se introdujeron las primeras perforadoras de aire comprimido en la construcción de túneles ferroviarios en España

XIX español, recto y a 1.270 metros de cota, el punto más alto de la línea, con una embocadura de las más originales de España, a modo de entrada de palacio con dos pilastras flanqueando el ingreso rematado por un frontón curvilíneo con placa. A partir de él se inicia un largo descenso hacia Gijón. En Lena se atraviesan los túneles más importantes: La Pisona (1.050 metros en curva y recta, a 1.022 metros de cota), La Sorda (1.076 metros, a 860 metros de altura, en el que se alternan curva y recta), Congostinas (1.170 metros de longitud y cota de 760 metros en curva y recta), El Capricho (1.838 metros de galería recta, a 580 metros), Orria (1.057 metros, a 508 de cota), Sanriella bis (2.490 metros de recorrido, a una altura de 270 metros) y Padrún bis (2.625 metros, a 183 metros de altura). Con la finalización de la rampa de Pajares, el viaje entre Madrid y Gijón pasó de realizarse en cuatro días en carruaje a unas veinte horas en ferrocarril. Son túneles no muy amplios, de piedra y boquillas de arco de medio punto. En 1979, Renfe añade el túnel del Padrún, de 1.728 metros, en el mismo punto kilométrico que el Padrún bis.

Madrid a Segovia, camino desechado hacia Irún

En la línea Madrid-Irún, con paso obligado por Valladolid, el paso del macizo de Guadarrama se planteó, en principio, por Segovia, lo que suponía un túnel de 16 kilómetros de longitud, pero el ingeniero José Almazán demostró que por el puerto de Las Pilas, en Ávila, el camino tenía menor dificul-

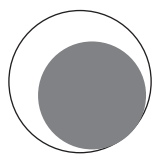
Operarios trabajando en 1890 en la excavación del túnel de Argentera, en Tarragona.



tad orográfica, por lo que el trazado se lanzó por la ciudad de Santa Teresa –no sin oposición por parte de los segovianos–. No se abandonó, sin embargo, la idea del ferrocarril segoviano y años más tarde se construyó esta línea, muy montañosa, perforando siete túneles, en 1888, por la Compañía Norte, para atravesar la sierra de Guadarrama, división natural entre las mesetas norte y sur. El mayor de ellos, el túnel de Guadarrama, entre Madrid y Segovia, con 2.380 metros de longitud construidos con pico y pala, accidentes y epidemias, pasa bajo el Alto del León escalando una pendiente en curva y recta a una cota de 1.296 metros. Es un túnel sencillo que abre su salida encajonada entre dos cerros en El Espinar.

Se completa la línea Madrid a Barcelona

La importante línea Madrid-Barcelona, por Caspe, cuyo primer tramo hasta Zaragoza quedó terminado en 1864, reanuda sus obras en los años 80 con el trayecto más complicado y conecta con Barcelona en 1894, dejando así de usar la vía a Barcelona, de otra compañía, ya existente por Lérida. Hubo que abrir 56 túneles entre 1890 y 1894, construidos por Ferrocarriles de Tarragona a Barcelona y Francia (TBF), que se unieron a los 20 ya excavados en el



Marqués de la Argentera

Ingeniero de Caminos. Nacido en Barcelona en 1855 en una familia acomodada y con un abuelo directamente relacionado con el ferrocarril Barcelona a Mataró, Eduardo Maristany siguió su carrera profesional por el mismo camino ferroviario con muchos éxitos. Su obra magistral fue la construcción del túnel de Argentera, en el que desarrolló un trabajo fundamental que le valió el título de marqués de la Argentera. Pero su principal legado para la historia tal vez sea el tratado que escribió con los datos de su construcción, 'El túnel de Argentera', de 1305 páginas, la mitad de ellas de ilustraciones, por lo que pudo aportar a otros estudiosos que le siguieron en una materia tan nueva como el ferrocarril.



tramo Barcelona-Tarragona entre 1881 a 1884. Se hicieron con sillares y sillarejos de buenas piedras calizas del lugar, de fácil labrado y más económicas que el ladrillo que había que traer de lejos. Es una línea muy original y única en el diseño de sus túneles; casi todas sus bocas son de arco ovalado, a ve-

Máquina eléctrica del Norte y convoy en la sección asturiana de Pajares saliendo de un túnel.

ces flanqueado por pilastras laterales, coronado con un frontón recto adornado con molduras horizontales. La boquilla más interesante es la del túnel del Fayón Antiguo, con un arco de medio punto inscrito en otro ojival rematado con doble nervadura que recuerda el portón de una iglesia gótica.

Siguiendo el orden de los túneles mayores de un kilómetro, en primer lugar, en Nonaspe (Zaragoza) se abren, en 1892, el túnel de Sol de Horta, de 1.202 metros, al terminar un puente que atraviesa el torrente de Val de Batea, excavado para evitar los 7 kilómetros de zig-zag que hubieran exigido el seguir la ladera derecha del río Matarraña y el río Algás, y el túnel de Tasconeras, de 1.409 metros, construido para evitar otros 9 kilómetros en zig-zag que bordean el mismo río Matarraña. Por sus dificultades, ambos túneles tuvieron que ser abiertos a mano. Sigue una serie de túneles cortos muy próximos unos a otros a una cota muy baja y se llega al del Fayón antiguo (Fayón), de 1.846 metros en recta y curva, hoy en desuso, horadado para salvar un contrafuerte entre los ríos Ebro y Matarraña. Costó 1,4 millones de pesetas y su construcción se realizó en 17 meses. La boca de entrada se halla sobre un acantilado de 200 metros de altura bajo las enormes peñas de Bugarreig, lo que obligó a construir un trozo de túnel a cielo abierto de 10 metros de longitud sobre el río Matarraña para garantizar la seguridad de los trenes. En este lado se aplicó una moderna perforadora Ferroux mientras que la otra boca, en curva, se excavó exclusivamente a mano.

En la provincia de Tarragona, a 329 metros de cota se accede al túnel más importante de la línea, el túnel de Argentera, conocido como el "túnel de la Torreta", de 4.040 metros, construido en 1890 para pasar la sierra de Argentera tras graves dificultades que le valieron a su constructor, el joven inge-



Viaducto y túnel del Gaitán, en la línea Córdoba a Málaga.

niero de Caminos Eduardo Maristany, el título de marqués de la Argentera. Costó casi cinco millones de pesetas y se perforó con máquinas Ferroux, al igual que el túnel del Fayón. Ya a la vista del mar, en Sitges (Barcelona), a 19 metros de cota, se atraviesa el túnel de Penyes Roges, de 1.872 metros, excavado por MZA en 1881, y unido a él, un paso atrás y más corto, el túnel del Francés, cayendo ambos, sobre un paraje muy bello al borde del roquedo marino.

En 1964, Renfe construye la variante de Fayón, con cuatro túneles, dos de ellos de gran envergadura en la Poble de Massaluça, de 2.994 y 3.741 metros, respectivamente.



Caballero

Se busca nueva entrada a Francia por Port Bou

Conectada España con Francia por Irún desde 1864, se busca más tarde reforzar tanto el intercambio hispano-francés por la orilla mediterránea con la línea Tarragona a Port Bou (Gerona), con distinto ancho de vía para franceses y españoles, como por Irún. El trayecto, con origen en 1854, fue construido en distintos momentos y por distintas compañías hasta su puesta en servicio en enero de 1878, pero sus 15 túneles, construidos entre 1859 y 1887, pertenecían a TBF. De sección semicircular, muchos de ellos presentan una sobresaliente clave en el arco dovelado de sus boquillas. El más importante es el túnel de Canyellas (Vilajuiga, Gerona), del año 1878, con 1.224 metros de longitud a 60 metros de cota, con su salida empotrada entre dos altas laderas.

Alcanzado el 'finis-terrae': Palencia-La Coruña

Esta línea, construida por Caminos de Hierro de Asturias, Galicia y León, que en 1864 llegaba a Astorga desde Palencia y en 1875 a Lugo desde La Coruña, deja para los 80 el tramo central y más complicado de los montes de León y del macizo Galaico. En los montes de León la vía logró realizar uno de los más espectaculares trazados del ferrocarril español, el "Lazo de La Granja", que, con esa figura, rodea los cerros a diferentes cotas de altura y los atraviesa con el primer túnel importante, el del Lazo (Villagatón), de 1.041 metros a 840 de cota. Continúa la línea hacia Ponferrada, donde se abre el túnel de Las Fragas (Congosto), con 1.008 metros de longitud a 570 de altura, iniciándose a su salida un recorrido que acompaña al Sil por apretados cañones con otra impresionante serie de 24 túneles hasta Sarriá, en Lugo, donde se caló el túnel más largo

Boca de uno de los túneles de Pajares, principal paso ferroviario desde la Meseta hasta el Principado de Asturias.

de la línea, el del Oural, de 1.907 metros de longitud. Allí enlazará la línea con diez túneles cortos procedentes de La Coruña.

La línea completa tiene 85 túneles, construidos entre 1880 y 1883, todos de vía única. Unos con la salida tallada en la roca desnuda, otros de amplio arco de medio punto con grandes dovelas labradas; algunos, rodeados de agua y verde. El más original es el de Las Fragas, de piedra y con un frontón triangular coronando su arco de ingreso de medio punto.

Se cruza la frontera con Portugal

Varias líneas llegaron a Portugal, en el siglo XIX, donde enlazarían con el mismo ancho de vía que el español (1,67 metros). La primera, desde Madrid por Ciudad Real y Badajoz, en servicio desde 1866, ha dado paso al país lusitano durante muchos años. Sus 513 kilómetros de recorrido sólo necesitaron dos túneles cortos, uno de ellos en el único tramo complicado, en la sierra de la Rinconada, entre las provincias de Córdoba y Badajoz. Lo mismo ocurre con el paso de la frontera por Cáceres desde Valencia de Alcántara; la línea parte de Madrid y pasa por Torrijos y Plasencia con 11 túneles cortos

de 1881 y de 1969, casi todos en Garrovilas. La línea Salamanca a Barca de Alba (Portugal), de 1887, fue la más complicada y una importante y singular obra de la ingeniería española por sus bellos puentes de hierro. Con un primer tramo corto construido

El obstáculo de Pajares se salvó entre 1880 y 1884 con la construcción de un difícil trazado ferroviario en el que existen 69 túneles



Locomotora de la SNCF (ferrocarriles franceses) engalanada en la estación de Canfranc.

por la Compañía del Ferrocarril de Salamanca a la Frontera con Portugal, naciente en Fuente de San Esteban, en tan sólo sus 15 últimos kilómetros, en La Fregeneda, se excavaron 20 túneles para descender hasta el puente internacional del río Águeda por un lado del barranco paralelo al río que ofrece una vista espectacular. El más importante es el llamado túnel de la Carretera de Salamanca (por pasar por debajo de dicha carretera), de 1.594 metros de longitud. La conexión con el tramo Ávila-Salamanca, y de paso con Madrid, no se termina hasta el siglo XX con cuatro túneles cortos en el cruce del Adaja y en las estribaciones de la sierra de Ávila.

Extremadura y el activo puerto de Huelva

Una línea de estos años, no radial, con muy buenos rendimientos tanto comerciales como para viajeros, fue la de Zafra al puerto de Huelva, construida entre 1886 y 1889 por la Compañía de los Ferrocarriles Zafra a Huelva, para el embarque de minerales para la exportación. Nace en Zafra, en la línea Mérida a Los Rosales (Sevilla), y recorre 184 kilómetros hasta llegar al puerto onubense atravesando los quebrados paisajes que forman las crestas y valles de la sierra de Aracena. Tiene 18 túneles, de los cuales el mayor es el de Almonáster-Cortegana I (Almonáster la Real, Huelva), de 1.354 metros, del año 1889. La pretensión de leoneses y extremeños era unir todo el territorio mediante una gran línea que enlazase León, Zamora, Salamanca y Extremadura con Sevilla y Cádiz, que sería lla-

mada Ruta de la Plata rememorando la antigua vía romana.

Impulso ferroviario prímoriverista

En los primeros 20 años del siglo XX, el ferrocarril, que ya tiene los 12.000 kilómetros de tendido al empezar el siglo, sigue siendo el transporte por excelencia por su rapidez y economía, y la construcción de túneles se ve favorecida con un nuevo impulso en los años de la dictadura de Primo de Rivera (1923-30) con el Plan Guadalhorce del ministro de Fomento Rafael Benjumea, aportando capitales estatales para terminar las comunicaciones radiales con Madrid y construir líneas no rentables para los inversores privados por su alto coste y dudosa rentabilidad. Algunos recorridos se terminan, otros se construyen de nueva planta y otros más acortan caminos mediante el tendido de líneas transversales a otras ya existentes. Nuevas perforadoras aparecen en los años 20, mejorando las Ferroux, como las Ingersoll de martillos perforadores, igualmente accionados por aire comprimido.

Nuevos caminos por los Pirineos

El 18 de julio de 1928 Alfonso XIII y el presidente de la República Francesa se encuentran bajo el túnel internacional de Somport (Canfranc) e inauguran solemnemente la línea Zaragoza-Pau. Una



docena de proyectos se habían redactado entre los dos países para el paso central transpirenaico, pero sólo dos llegaron a buen puerto: el paso por Canfranc (Huesca) y el de Puigcerdá (Gerona), que se inauguraría al año siguiente. Tanto para un paso como para el otro hubo que excavar importantes túneles, costosos, con maquinaria y material de primera fila y con los mejores ingenieros de la época.

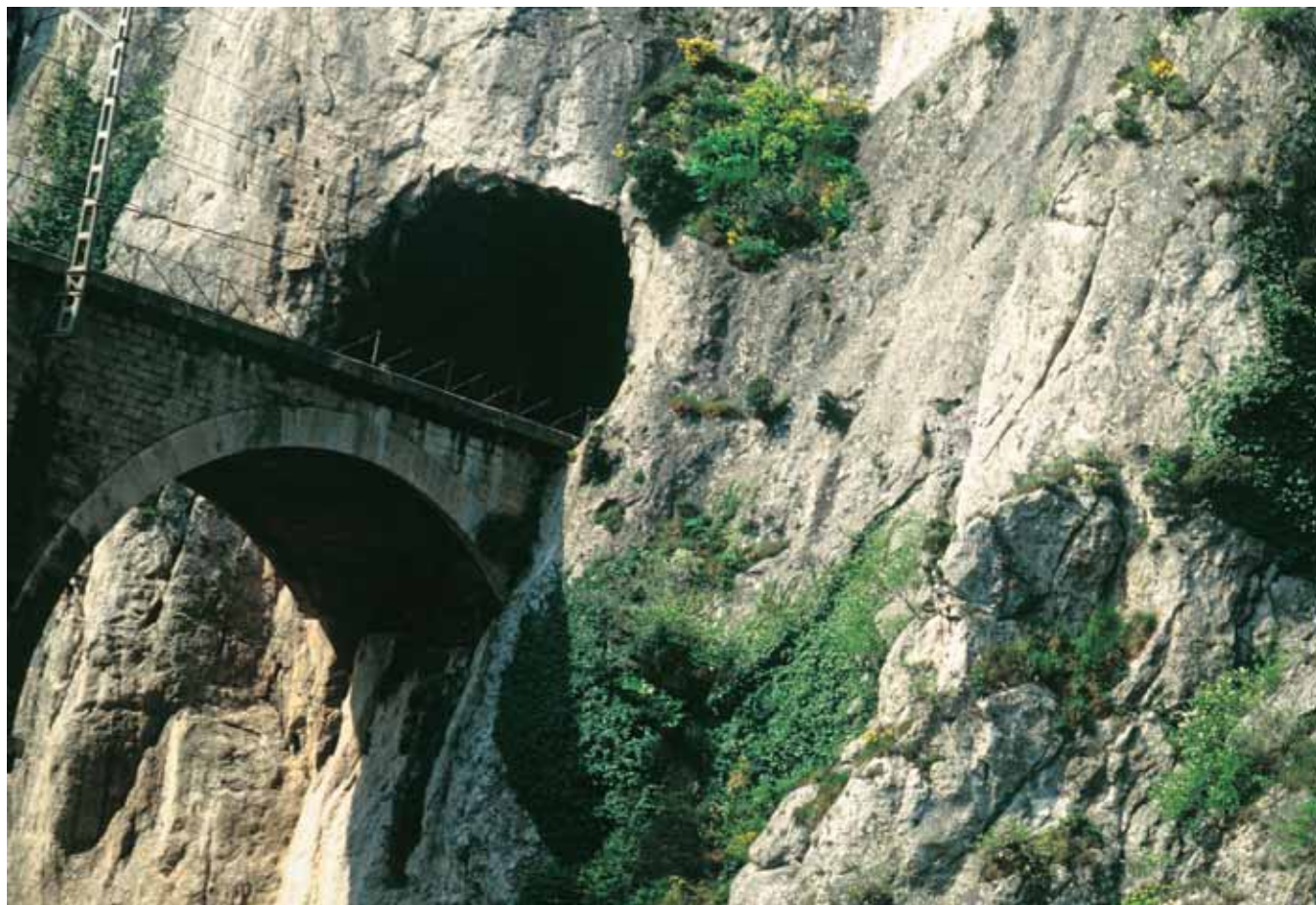
En el caso de Canfranc, el difícil relieve reservó la peor parte para Francia tras el paso de Somport con pendientes de 43 por mil a las que no tenían nada que envidiar las pendientes españolas de 20 por mil. Este proyecto procedía de otro iniciado por Norte como “ferrocarril transpirenaico de Zuera a Olorón”, en 1893, con 10 túneles en el tramo Huesca a Jaca, en conexión con Zaragoza. En 1928, la misma compañía completó la línea con el tramo más alto y difícil entre Jaca y Canfranc, con participación estatal, y 20 túneles más, siendo el más importante el que discurría bajo el macizo de Somport en el Pirineo oscense con un total de 7.847 metros, 3.796 de ellos por territorio español. El proyecto aprobado fue el del ingeniero Joaquín Bellido y la excavación se realizó con perforadoras Ingersoll-Rand y dinamita, mediante el

Boca del túnel Sol de Horta, de 1.202 metros de longitud, construido en 1892 cerca de Nonaspe (Zaragoza) como parte de la línea entre Zaragoza y Barcelona.

El primer gran túnel ferroviario a través del macizo pirenaico, el de Somport, de 7,8 kilómetros de longitud, se inauguró en 1928

sistema austriaco, en su mayor parte, y el sistema belga, modificado y más barato, en ocasiones. Las bocas del túnel se acordaron entre los Gobiernos español y francés tras laboriosas negociaciones al tener que contemplar no sólo el punto de vista constructivo, sino también el de la defensa militar. Es un túnel espectacular con una fachada que recuerda la entrada a un castillo con dos órdenes, adornado el segundo con un friso con arquillos ciegos, escudo y cartel conmemorativo en el centro. La boquilla de arco de medio punto muestra un elegante almohadillado. Este paso se interrumpió en 1970 hasta nuestros días, debido a un grave accidente ferroviario en el lado francés.

La entrada a Francia desde Gerona, con la línea Ripoll a Aix-les-Thermes, se inauguró en julio de 1929. El tramo español, Ripoll-Puigcerdá, de 48,6 kilómetros, ya fue construido por el Estado entre 1910 y 1922, enlazando con otra línea que venía de Barcelona. Línea muy arriesgada, cuenta con 10.523 metros de galerías distribuidos en 43 túneles, alcanzando la cota más alta de los ferrocarriles españoles, a 1.480 metros, en el interior del túnel de Tosas, considerado el de mayor dificultad de la línea, en el que trabajaron 250 obreros. Se empezó a calar en 1912 por la boca sur, en Tosas, y se terminó en 1919 al encontrarse las galerías de avance norte y sur con un error de 7 centímetros, resultado extraordinario que se atribuyó al mérito de su autor, el ingeniero Martínez de Velasco. Mide 3.904 metros contando la prolongación artificial de la boca norte o de la Molina. La sección de la bóveda es semicir-



Boca de túnel y viaducto en el desfiladero de Pancorbo, en la línea férrea de Madrid a Irún.

cular y se apoya en sendos estribos rectos dando una altura total de 5,70 metros en la clave y anchura de 4,80 metros en la plataforma. Se perforó por el sistema belga y no se empleó la voladura sino el martillo neumático. La embocadura está construida cuidadosamente con dos pilastras laterales rematadas por torrecitas y un friso que le concede cierto aire oriental. En Tosas también, anterior a él, se abre el túnel helicoidal “Caracol”, con 1.054 metros, construido en 1922, llamado así porque la vía gira sobre sí misma cruzándose a mayor altura para poder ganar una cota de 1.345 metros en el puerto de Tosas.

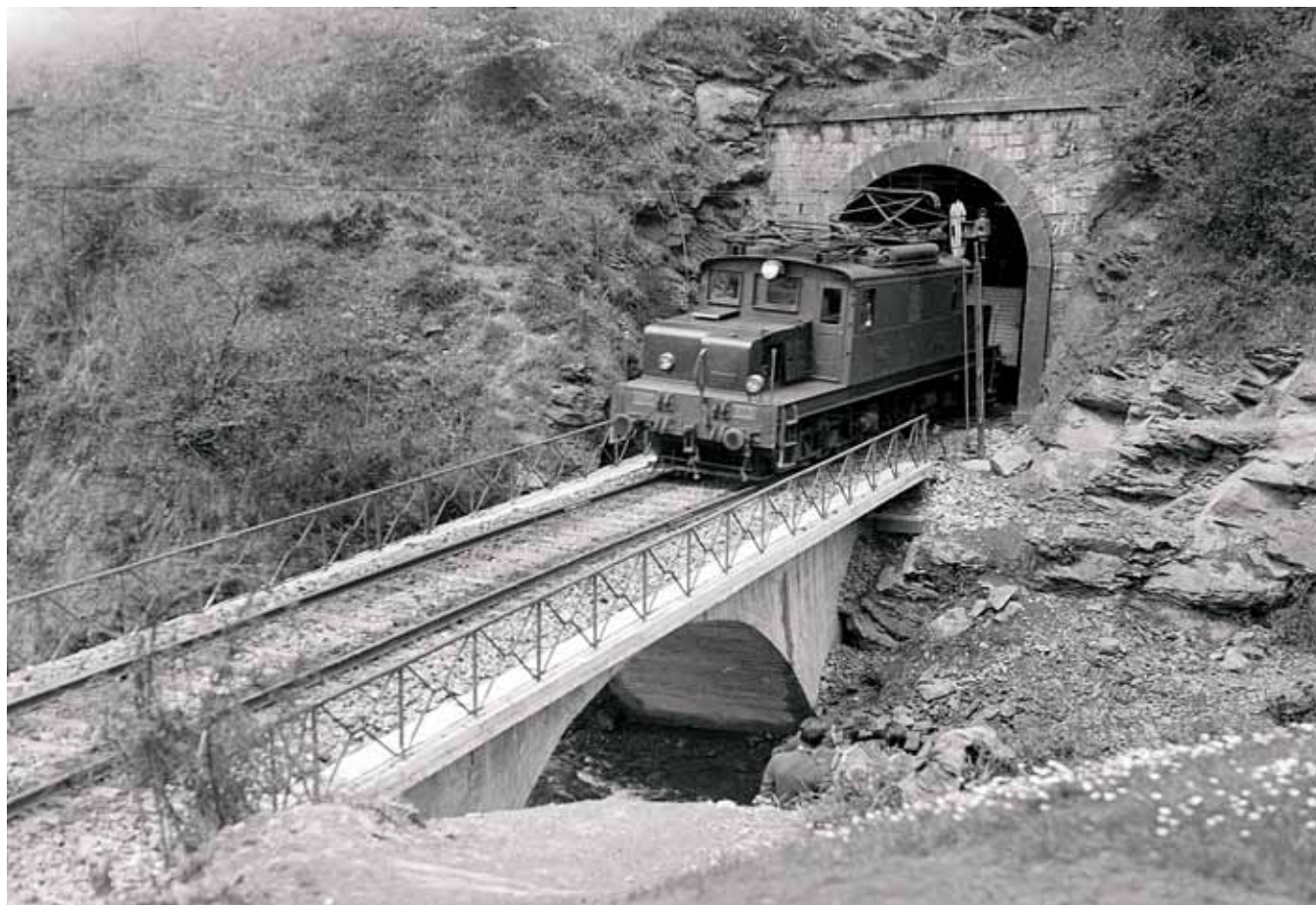
Un atajo para ir de Valencia a los Pirineos

Establecido contacto con Francia desde Zaragoza por Canfranc, en 1929, se abrió la vía internacional también para Valencia que ya enlazaba con Zaragoza por Calatayud dando un rodeo, que se podía acortar desde Caminreal a Zaragoza. Esta línea se abre en enero de 1933, por la Compañía del Ferrocarril de Aragón, con la circulación del primer tren de mercancías, para asentar los raíles, cargado con naranjas y las esperanzas de los valencianos en el aumento de la exportación de sus cítricos a Francia “De este modo, las frutas valencianas podrán ser consumidas en Zaragoza tan frescas como en su propio origen, ya que sólo 15 horas ha de durar para los mercancías, y la mitad para los viajeros, el recorrido del trayecto de 346 kilómetros que separa ambas capitales”. La línea se construyó en cinco años con

diez túneles de vía única en los términos de Villarreal de Huerva y Encinacorba, el mayor de los cuales, a caballo entre los dos términos, el de Puerto Alto I, bajo el puerto del mismo nombre, tiene 1.075 metros de longitud en curva y recta a una cota de 909 metros. Es un túnel no revestido con boca de arco de medio punto y frontón recto. Todos los túneles de la línea guardan armonía entre sí y cuentan con un arco de medio punto con un singular recercado de mampostería de diseño modernista.

Mallorca se “comunica” con la Península

No se resignaba la insular Mallorca a no participar en los beneficios del ferrocarril enlazando su economía con la peninsular. Pero antes tenía que salvar un impresionante obstáculo geográfico, la sierra de la Tramontana, extendida de suroeste a noreste de la isla. En el año 1912 inaugura su ferrocarril de vapor Palma-Sóller, que atraviesa transversalmente la Tramontana, para viajeros y mercancías previa construcción del gran túnel de la Alfabia, proyectado por el ingeniero Pere Garau, con 2.856 metros de longitud, y perforado a lo largo de tres años. Este ferrocarril se completa en el año 1929 con el tranvía de Sóller al puerto de Sóller, alentando las esperanzas de los mallorquines en los beneficios que reportaría el disponer de “un punto terminal de la línea de vapores Barcelona-Mallorca, que será la más directa de las comunicaciones con la Península”.



Los planes de reconstrucción franquistas: Renfe

Prácticamente concluidas las grandes líneas radiales y transversales españolas, pasadas la II República y la Guerra Civil, surge la necesidad de completar líneas paralizadas y deterioradas y de evitar el paso por las ciudades con cargo al Estado, lo que dará lugar al nacimiento de nuevos túneles en los años 40 y 50 con los Planes de Reconstrucción franquistas y la creación de Renfe. Las técnicas de perforación aportan en los años 70 el “escudo” de frente abierto, para roca blanda, consistente en un tubo de frente abierto que avanza y protege a los trabajadores durante la excavación aunque con peligro de “colapsar” con la entrada de materiales de desprendimientos por el frente desprotegido. En cuanto a los estudios del terreno, en el periodo entre 1975 y 1985 se empiezan a utilizar galerías-piloto como sistema para mejorar su conocimiento.

A caballo entre dos siglos: la línea Zamora a La Coruña

El ferrocarril Zamora-La Coruña, paralizado en Toro en 1864, retoma sus obras en 1927 por el Estado, aunque con destino a Santiago, y las suspende la II República para reanudarse tras la Guerra Civil. Dividida en tramos, el primero, de Santiago a La Coruña, se inauguró en 1943 y, el más difícil, el

Tren remolcado por locomotora 6103 a la salida de un túnel de la línea León-Gijón.

paso de Zamora a Orense, se inauguró en 1957, por el jefe del Estado, Francisco Franco, constituyendo un importante acontecimiento social. Con 453 kilómetros y 185 túneles que miden 77 kilómetros, mantiene el récord de ser la línea convencional con mayor porcentaje de galerías.

De los 182 túneles del siglo XX, todos de Renfe, dieciséis superan el kilómetro y todos fueron perforados para doble vía, aunque sólo se instalase una debido a la escasa demanda de uso. El obstáculo principal entre la meseta y Galicia fueron los puertos de Padornelo y la Canda en las tierras de Sanabria, unos 50 kilómetros del recorrido salvados mediante 106 túneles. Se inicia la cadena de túneles zamoranos, de longitud superior a un kilómetro, en el túnel de Paradas (Requejo), de 1.226 metros de longitud. Entre Requejo y Lubián le sigue el emblemático túnel de Padornelo, de 1957, conocido en la zona también como “el túnel 12”, que permitió el paso de los primeros trenes entre Puebla de Sanabria y Orense. En su construcción se emplearon 25 años y el trabajo de unas 4.000 personas. Con sus 5.958 metros de longitud construidos a 1.104 metros de cota, ha sido durante casi medio siglo el túnel ferroviario más largo de España hasta la llegada de los túneles de alta velocidad. Se empezó a excavar por el lado de Zamora en 1929 y por el lado de Orense en 1930. El coste total de las obras, incluyendo las del poblado ferroviario “Santa Bárbara”, ascendió a unos 25 millones de pesetas. Es un túnel completamente recto con sección de arco carpanel y mantiene en el cen-



tro la chimenea vertical al exterior utilizada para las obras, que hoy proporciona ventilación al túnel y favorece la descompresión provocada por los trenes, el “efecto pistón” producido cuando un tren atraviesa un túnel a cierta velocidad y empuja el aire que hay delante de él hacia fuera por la torre de ventilación más cercana y succiona el aire hacia el túnel desde la torre de ventilación más próxima por su espalda causando un golpe de aire perfectamente audible.

En Orense y Pontevedra se encuentra el mayor número de túneles de los años 1957 y 58. En el tér-

Boca sur del túnel de Somosierra (Madrid) y boca del túnel de Padornelo, que con sus 5.958 metros de longitud fue el túnel ferroviario más largo de España hasta la llegada de la alta velocidad.

mino de Lubián aparecen tres mayores de un kilómetro: Lubián (1.565 metros), Brialló (1.084 metros) y La Canda (1.994 metros). En Castrelo do Val, los túneles de Camba I (1.148 metros) y Camba II (1.559 metros). En el término de Laza, los túneles del Molino (1.066 metros), Corno (2.491 metros, debido a sus enormes dificultades técnicas, se perforó para vía única, abriéndose en paralelo otro túnel de vía única que no fue concluido a falta de unos 1.000 metros), Canallón, (1.291 metros) y el de Sierra Pequeña (1.676 metros). En Xunqueira de Ambía se localiza el túnel de Salgueiros, de 1.565 metros. Ya en Pontevedra, en Lalín, el túnel de Fojo el Cabrito (2.625 metros). Continúa la línea con los túneles de 1943 hacia La Coruña, con el de Meirama (1.808 metros) en La Laracha; en Culleredo, el de Bregua III (1.050 metros); y en Arteixo, el túnel de Ujes III (1.405 metros, a 98 de cota de carril). Casi todos los túneles, aún siendo de distinta época, mantienen un original arco rebajado o carpanel en sus amplias boquillas, y 143 de ellos están revestidos.

Madrid a Burgos directo

Perteneciente a un antiguo proyecto no realizado para unir Madrid con Irún, se iniciaron las obras de la línea Madrid a Burgos con el Plan Guadalhorce y en 1928 ya habían superado el salto de la meseta entre Burgos y Somosierra y se empezaba a abrir el gran túnel del mismo nombre. La línea se paralizó con la II

República y se concluyó en los años 60 ante la creciente industrialización de Madrid. Su difícil trazado dio lugar a 44 túneles, todos de Renfe, de 1968. Cinco de ellos superan el kilómetro.

Tomando la línea desde Madrid, el túnel número 13 es el de Medio Celemín (Valdemanco), de 2.291 metros de vía única; le siguen los de Mata el Águila (Lozoyuela), de 2.900 metros y Solamojada (Buitrago de Lozoya), de 1.034 metros. Luego hay 9 túneles cortos hasta alcanzar el túnel de Somosierra, de 3.910 metros, no sólo espectacular por su ta-

maño, sino también por su embocadura, única, que recuerda a un castillo medieval con su portón y torres almenadas a los lados. Se dice que rememoran, la boca sur, la puerta de San Vicente de la muralla de Ávila y, la boca norte, el alcázar de Segovia. Se atraviesa a continuación el paso de la sierra de Guadarrama, con 18 túneles cortos, y comienza otro grupo importante bajo La Serrezuela, destacando el túnel de Maderuelo III, de 1.169 metros. Cierran la serie los túneles cortos que llevan a Burgos. Todos son de una vía y sus boquillas son circulares, amplias y doveladas.

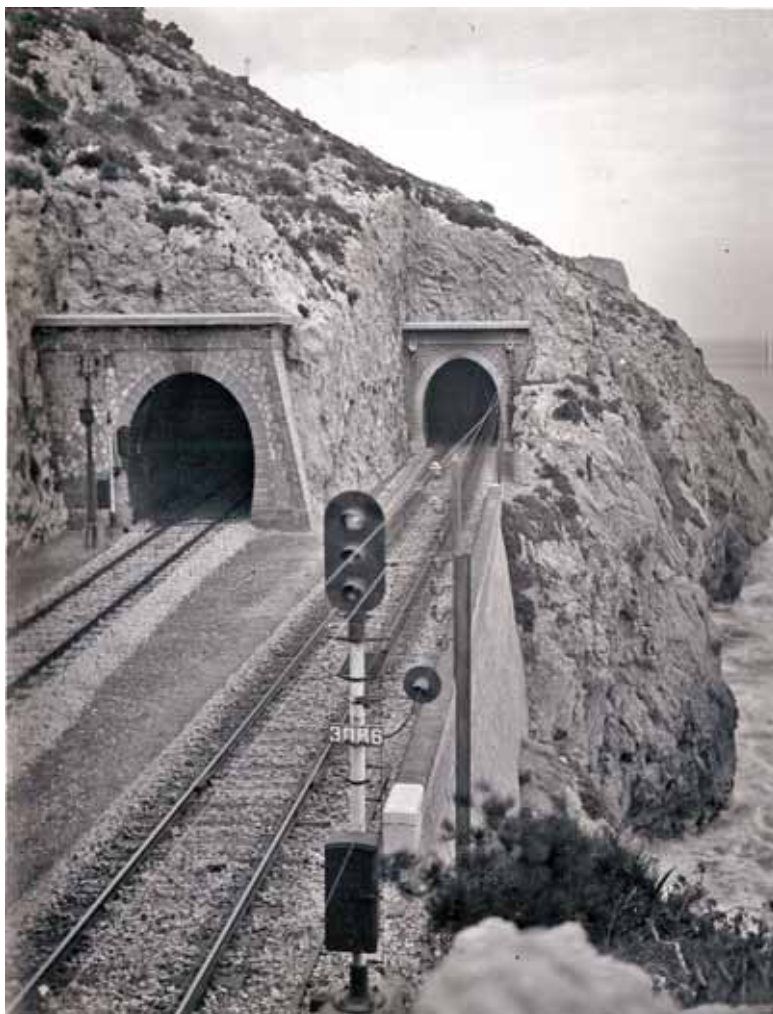
Madrid directo a Valencia por Cuenca

Aunque Madrid se comunicaba tempranamente con Valencia a través de Albacete y Alicante, busca a finales del siglo XIX un recorrido más corto por Cuenca y consigue construir los dos tramos de los extremos (Valencia-Utiel y Aranjuez-Cuenca) con 15 túneles, dejando para el siglo XX el tramo central de Cuenca a Utiel, terminado en 1942 por Renfe. El trazado discurre casi en línea recta hasta los Altos de Cabrejas, donde se abre el primer túnel, y luego se enfrenta al paso de la serranía de Cuenca, uno de los itinerarios ferroviarios españoles más complejos, donde impresionantes viaductos se alternan con 21 túneles, de los cuales los más importantes son los de Palancares (Fuentes) y La Olmedilla (Villora), de 2.302 y 1.884 metros de longitud, respectivamente. Sigue el fácil tramo de la Plana de Utiel y un tercer tramo complejo que resuelve el escalón de bajada desde la meseta hasta los llanos litorales. Los túneles del siglo XX se realizan con nuevas técnicas de ingeniería subterránea, todos ellos son de vía única y sus boquillas presentan un original arco abocinado de medio punto.

Grandes proyectos logrados

El intento de unir el Cantábrico con el Mediterráneo

La línea Calatayud-Cidad Dosante se inicia en 1927 por The Anglo-Spanish Co. como parte de la ambiciosa línea que comunicaría el Cantábrico con el Mediterráneo usando la ya existente, de Calatayud a Valencia. Se construyeron 365 kilómetros de Calatayud a Ciudad Dosante por zonas despobladas de Zaragoza, Soria y Burgos. A partir de Ciudad Dosante el terreno se complicaba y las obras, reanudadas en 1941, se paralizaron definitivamente en 1959, muy cerca de su final. Aunque incompleta, la línea dio lugar a 19 túneles, de los cuales, al final de ella, en los montes de Samo, se accede al magnífico túnel de la Engaña (entre Burgos y Cantabria), que nunca entró en uso, de 6.976 metros, según reza su placa de piedra, y un desnivel entre la boca norte y la sur de 116 metros, construido por el método belga entre 1951 y 1959.



Túneles en las costas del Garraf (Barcelona) hacia 1940.

Lérida a Saint-Girons, otro intento transpirenaico

También llamada “Noguera Pallaresa” por seguir el curso de ese río hasta el país vecino, la línea Lérida a Poble de Segur, incluida en el Plan Guadalhorce, formó parte de un plan que enlazaría Francia con Jaén por el Pirineo leridano. Iniciada en 1907 y parada en varias ocasiones e incluso modificado el trazado inicial que cruzaba el coll de Porta con el túnel de Santaliña (3.440 metros), al construirse la presa de Camarasa, no se termina la línea hasta 1949-50, por Renfe, y sólo hasta la Poble de Segur, muy alejada de la frontera francesa. Sus 15 kilómetros de túneles comprenden el gran túnel de Villanueva la Sal I (Camarasa-Avellanes), de 3.499 metros, del año 1949, que atraviesa la sierra de Montroig. Es una línea que discurre a una altura media de unos 350 metros con 41 túneles cortos, muchos sin boquilla, por un bello paisaje entre montañas y agua.

Túneles locales y urbanos

Mientras se construían las grandes líneas y trazados transversales importantes, no se dejaban de lado las provinciales y de interés local, y también



ellas necesitaron túneles considerables para sortear los impedimentos orográficos.

La línea local Málaga-Fuengirola, parte de la línea Málaga-Algeciras-Cádiz que sólo logró tender este tramo en 1926 en vía estrecha, se adaptó a vía ancha en 1975 y necesitó 10 túneles para sortear no sólo un relieve quebrado, sino urbanizaciones, calles y carreteras, dando lugar a dos importantes túneles de Renfe, el del Guadalmedina (Málaga), de 1.057 metros, y el de Torremolinos, de 1.356 metros.

En cuanto a túneles urbanos notables, merecen mención: el túnel de El Ferrol (1.100 metros), construido en 1923 por la JOP para dar acceso al deno-

Locomotora diésel para vía estrecha del Ferrocarril del Langreo saliendo del túnel de Nusel, en Asturias.

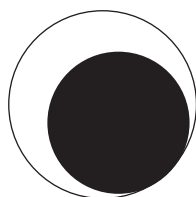
minado “puerto interior” desde los muelles ferrolanos; bajo la ciudad de Zaragoza, el túnel de la avenida de Tenor Fleta, de 1.692 metros, de Renfe; en Barcelona, el túnel de Sabadell, de 5.400 metros, de Renfe de 1973, de doble vía y muy importante hasta la llegada del AVE, y el túnel de Martorell, de 1.025 metros; y en la línea Bilbao-Abando a Portugalete, “el ferrocarril de la Ría”, inaugurado en 1888, destaca el túnel de Portugalete, con 1.068 metros de doble vía, a 6 metros sobre el nivel del mar.

Ejemplo destacable de túnel urbano lo constituye el enorme túnel de Tudela-Veguín (Langreo), en la asturiana línea Tudela-Veguín a Lugo de Llanera. La línea, de 11 kilómetros, tiene dos túneles y el llamado “túnel de la Grandota”, de 3.756 metros, iniciado en 1947 y puesto en servicio en 1957, constituye por sí solo la tercera parte de la misma. El ingeniero Fermín García González proyectó este ferrocarril para evitar que los trenes carboneros de las cuencas mineras hacia los puertos de Gijón y Avilés atravesasen la ciudad de Oviedo. Hoy día, decaída la actividad minera de la zona, su uso se ciñe a servir de circunvalación de la capital asturiana al combinar curva y recta.

Por último, nacido no-urbano y convertido en urbano es el gran túnel de Elche, de 4.202 metros de longitud, construido en 1884 en la corta línea Alicante a Alquerías-Los Ramos (Murcia), de Andalucés, para enlazar, por la línea que venía de Madrid, con el activo puerto levantino. Se tuvo que soterrar en los años 60 del siglo XX debido al gran crecimiento urbanístico de la ciudad. ■

Túneles para vías verdes

En los años 40-50 del siglo XX, parte del presupuesto se destina a trazar transversales ferroviarias a las líneas principales. Nace así la línea de La Puebla de Híjar a San Carlos de la Rápita, por territorios turolenses y tarraconenses, dando lugar al gran túnel del Equinocio, de 2.106 metros, de 1942, famoso porque, por su orientación, dos veces al año los rayos del sol lo cruzan de un extremo a otro. Esta línea forma parte, hoy día, de la Vía Verde de Val de Zafán, aunque el túnel se ha cerrado en 2009 por desprendimientos. Otra vía verde es la de la línea de Alcoy a Xàtiva, terminada 1904 y continuada en los años 20 hasta Alicante, que no se llegó a inaugurar, pero sí dejó el túnel de Batalla III en Alcoy, de 1.020 metros, para que hoy, línea y túnel, formen parte de la Vía Verde del Maigmo.



La construcción de la red de metro en Madrid y otras ciudades españolas

Subterráneos urbanos

A partir del siglo XIX, el desarrollo industrial provocó el incremento de la población de las grandes ciudades y, en consecuencia, el de los medios de transporte, que congestionaban las calles, tardaban demasiado y, en suma, eran ineficaces para los viajeros. Esta situación originó el nacimiento de un nuevo medio de transporte subterráneo, el metro, implantado en las urbes más prósperas de Europa y América a partir de la apertura en 1863 del Metropolitan Railway de Londres. En España el metro llegó por primera vez a Madrid en 1919, y a Barcelona en 1924.



Archivo Metro

Alfonso XIII inauguró en 1919 la primera línea de la red del metro madrileño, que hoy, 90 años más tarde, suma ya 289 kilómetros.



BEATRIZ TERRIBAS

Desde sus inicios el metro se concibió como un sistema ferroviario capaz de transportar el mayor número de personas en el menor tiempo posible y de la forma más segura.

La capital del Reino Unido, cuna de la Revolución Industrial, con sus 2,9 millones de habitantes, se había convertido en la ciudad más desarrollada del mundo y en la pionera en construir el primer ferrocarril subterráneo, que recorría inicialmente seis kilómetros con locomotoras a vapor, sustituidas en 1890 por vehículos de tracción eléctrica. Al tube in-

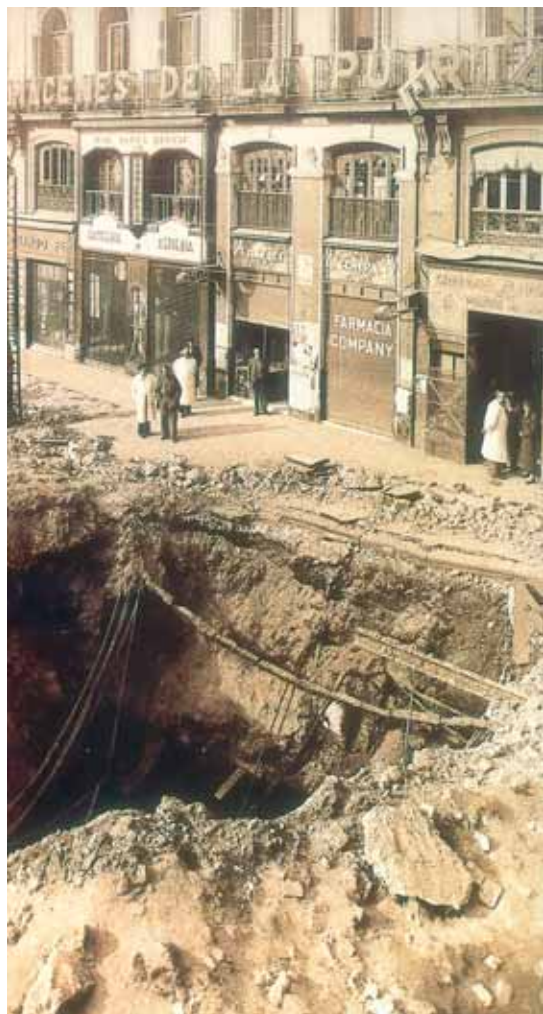


glés, así denominado por circular por túneles en forma de tubo, le siguió en 1895 el subterráneo de Chicago, inaugurándose en la misma década los de Budapest, Glasgow, Boston y Viena, mientras que los de París, Nueva York, Berlín y Hamburgo comenzaron a operar entre 1900 y 1912. En Latinoamérica, la primera línea subterránea fue la de Buenos Aires, el popular “subte”, inaugurado en 1913, que sirvió de modelo a aquellos otros que empiezan a circular a partir de la segunda mitad del siglo XX en México, Brasil, Venezuela y Colombia, mientras que los de Chile, Puerto Rico y la República Dominicana datan del presente siglo.

El metro de Madrid

En España, el primer metro que se trazó fue el de Madrid, ciudad que comienza a expandirse a partir de 1868 en torno al casco histórico con las primeras manzanas del ensanche, proyecto urbanístico redactado por Carlos María de Castro y Carlos Ibáñez de Ibero a instancias del Ministerio de Fomento, que perfilaba el futuro ordenamiento urbano de la ciudad.

En aquel momento, los velocípedos y los omnibuses arrastrados por caballerías eran los medios de transporte habituales de los 300.000 madrileños, ya que la primera línea de tranvías, también con “mo-



A. G. A.



A. G. A. (Repr. A. del Mazo)



A. G. A.

tor de sangre”, es decir, de tracción animal, se inauguró en 1871. Pero tanto su velocidad, 12 km/h, como su frecuencia, 30 minutos, les hacía inútiles ante el incremento paulatino de la población, que en 1877 se cifraba ya en 400.000 personas. Además, aunque el desarrollo del tranvía había sido extraordinario, los siete trayectos de sus vehículos saturaban las vías públicas, imposibilitando su buen funcionamiento.

Ante esta situación, los ingenieros Pedro García Faria y Manuel Becerra Fernández elaboraron en 1892 y 1898, respectivamente, dos proyectos de transporte subterráneo que resultaron infructuosos. Habría que esperar hasta 1913 para que Miguel Otamendi, a instancias de sus socios Carlos Mendoza y Antonio González Echarte, redactase el proyecto definitivo del Ferrocarril Metropolitano de Madrid, que presentó en el Ministerio de Fomento en mayo de 1914, solicitando su concesión como ferrocarril secundario sin subvención del Estado. Esto obligaba a los promotores de la obra a responsabilizarse de los gastos de construcción y de la adquisición de equipos y material móvil, reservándose el derecho al establecimiento de tarifas una vez que el subterráneo comenzase a funcionar. El proyecto contemplaba la apertura de cinco líneas para conectar Madrid de norte a sur, comunicando a su vez el centro de la ciudad con los barrios del este y el oeste y

La Guerra Civil causó numerosos daños en el metro, que fue empleado como refugio por los madrileños.

las calles más importantes, entre otras las de Serrano y Alcalá, corazón financiero de la ciudad. Todos los trayectos se harían por galerías subterráneas cuya profundidad desde la bóveda del túnel hasta el pavimento de la calle se estimaba entre los 2 y los 20 metros dependiendo de la zona de excavación. En ellas se acoplaría una doble vía de ancho internacional (1,445 metros), por donde iban a circular entre las seis de la mañana y las dos de la madrugada ochenta coches motores y cuarenta remolques con toma de corriente eléctrica aérea. La velocidad



A. G. A.



Archivo Metro

Los primeros túneles del metro madrileño tenían una profundidad desde la bóveda del subterráneo hasta el pavimento de la calle de entre 2 y 20 metros, según la zona de excavación



Archivo Metro

del metropolitano, que inicialmente recorrería 14 kilómetros beneficiando a los 614.000 habitantes de la ciudad, se estimaba en 25 km/h y el intervalo de los trenes entre 2 y 3 minutos, siendo la capacidad de cada convoy de 5 unidades de 250 personas. En cuanto a las estaciones de acceso, la distancia entre cada una de ellas sería como máximo de 500 metros, situándose las dos terminales en Sol y Cuatro Caminos.

Inicio de las obras

El 19 de septiembre de 1916, una Real Orden aprobaba el expediente de concesión del Ferrocarril Central Metropolitano de Madrid, cuyo coste ascendía a algo más de 18 millones de pesetas. Para comenzar las obras de la sección de Sol a Cuatro Caminos, Miguel Otamendi y sus socios necesitaban 8 millones de pesetas de difícil recaudación, ya que las entidades financieras negaron su apoyo al proyecto por considerarlo prematuro. Tan sólo el Banco de Vizcaya se comprometió a aportar cuatro millones, colaborando por su parte el rey Alfonso XIII con 1,45 millones al considerar al metropolitano como “una obra de enorme interés para el progreso de Madrid”. Del capital restante se responsabilizaron los socios de la Compañía Metropolitano Alfonso XIII, constituida en enero de 1917.

Una vez superados los problemas económicos y



Archivo Metro

Arriba a la izquierda, efectos de una bomba en el metro. De arriba abajo, trabajos en superficie en 1919, ejecución de túnel según el método belga en 1918 y trabajos en la estación de Ríos Rosas en 1918.

las desavenencias con el Ayuntamiento, que exigía a la compañía el pago de un canon anual y la reversión de la concesión otorgada por el Ministerio de Fomento para hacer prevalecer el derecho del Consistorio al dominio del subsuelo, las obras del metro por fin comenzaron el 17 de julio de 1917. Fueron unos trabajos plagados de dificultades ante las amenazas de huelga que se gestaban por todo el país, la escasez de materiales de construcción como el cobre, de elementos mecánicos como los *bogies* (rodaduras que sustentan locomotoras y vagones) o de motores eléctricos, que obligaron a la compañía a



Archivo Metro



Archivo Metro



Archivo Metro



Archivo Metro

adquirirlos en empresas norteamericanas, ya que las fábricas europeas eran inoperantes en plena Primera Guerra Mundial. Incluso dada la imposibilidad de adquirir el material móvil se optó por comprar al metro de París los coches usados que tenía en venta. Afortunadamente, los carriles, traviesas, remolques y otros elementos necesarios fueron suministrados por la Sociedad Altos Hornos de Vizcaya y los talleres de Beasaín, Carde y Escoriaza, mientras que la Unión Eléctrica Madrileña se encargaría de suministrar la energía para el funcionamiento del ferrocarril.

De arriba abajo, bifurcación de vía a la entrada de estación, taquilla de metro y acceso a la estación de plaza de Castilla. Fila derecha, obras de alargamiento de una estación en los años 60.

Las obras del túnel de la línea 1, en el tramo Puerta del Sol a Glorieta de Bilbao, comenzaron tras la perforación de cinco pozos de ataque localizados en distintos puntos de la futura línea ante la imposibilidad de construir a cielo abierto por la intensa circulación de las calles de la zona. Eran muy profundos con objeto de situar la traza del subterráneo por debajo de la zona ocupada por los servicios de alcantarillado, luz y agua. Para su construcción se utilizó el método belga, consistente en abrir una pequeña galería de avance en la parte superior central del futuro túnel que, tras entibarse con piezas de madera, se iba ensanchando a ambos lados, procediéndose, una vez conseguida la sección completa de la bóveda, a sujetarla con un nuevo entibado en forma de abanico, para recubrirla después de ladrillo y mampostería. A continuación se excavaba la parte inferior del túnel y se construían los hastiales o muros laterales, solándose la galería finalmente con hormigón.

El segundo tramo de la línea, que finalizaba en la zona rural de Cuatro Caminos, se realizó a zanja abierta, abriéndose dos filas de pozos para formar dos fosos que al revestirse de hormigón constituyeron los estribos. Tras levantarse el pavimento de la calle, se abrió otra zanja entre ellos, cuyo fondo sería la futura bóveda del túnel, que una vez hormigonada permitió continuar con la perforación del subterráneo y su solado.

Tanto la construcción de estos túneles como las obras que fue preciso realizar en algunos tramos de la línea (nuevo alcantarillado, modificación de las tuberías de agua y conducciones de gas, y traslado de los cables de la luz y del teléfono, así como de las farolas y las columnas que sujetaban el hilo aéreo de los tranvías) tuvieron un valor extraordinario si se tienen en cuenta los precarios medios con que trabajaban los obreros. Éstos estaban extraordinariamente especializados, tanto en las labores de excavación como en las de entibación, a las que se dedicaban exclusivamente los expertos en seleccionar, preparar y montar los soportes del túnel, de madera de álamo negro, que según decían *cantaban* al recibir mayor pre-



Archivo Metro



Archivo Metro



Archivo Metro

sión de la que podían aguantar, avisando así del peligro de desprendimiento del túnel.

Finalizadas las obras de estaciones y galerías, cuyas secciones se dotaron de señales luminosas de seguridad que indicaban cuándo podía circular cada tren, el 17 de octubre de 1919 el rey Alfonso XIII inauguró la primera línea metropolitana de España. Catorce días después, el metro se abrió al público con tal éxito que el primer año de su vida se contabilizaron casi 15 millones de desplazamientos, por lo que la compañía decidió ampliar su capital lanzando a la venta 12.000 acciones con el fin de obtener recursos para prolongar la línea 1 hacia el sur. Esta prolongación se inauguró en mayo de 1923 con 8 kilómetros de recorrido, pese a continuar con la falta de motores y *bogies*, pese a los conflictos entre la compañía y el Ayuntamiento —que intentó paralizar las obras ante la negativa de aquélla a abonar el impuesto exigido por utilizar el subsuelo de la ciudad— y

Foto superior, estación de Banco de España en los años 50. Debajo, túnel del Metrosur y bifurcación a la entrada de una estación.

pese a la aparición de la sequía, que obligó a la Unión Eléctrica Madrileña a restringir el suministro de energía.

En 1924 comenzaba a funcionar la línea 2, que desde el centro se dirigía hacia la zona este, abriéndose el año siguiente un ramal de conexión con la estación de ferrocarril del Norte, cuya traza es la más alta de toda la red debido a la necesidad de salvar el fuerte desnivel existente entre el casco antiguo y el río Manzanares. En 1932, la misma línea se completó con otro tramo para enlazar varios puntos neurálgicos de la zona este con la Puerta del Sol. Aquel año también se aprobó la construcción de la línea 3, para ampliar la comunicación del centro con la zona sur, que pudo efectuarse gracias a una nueva aportación del monarca de 1,45 millones de pesetas y a los beneficios que hasta entonces había conseguido la compañía, cuyo nombre, tras la proclamación de la República en 1931, pasó a ser Compañía Metropolitana de Madrid.



Archivo Metro



Guerra Civil y posguerra

Las huelgas laborales de 1934, los sabotajes y el descenso del número de usuarios retrasaron la apertura al público del nuevo trazado hasta agosto de 1936, justo un mes después del estallido de la Guerra Civil, que acabó con los nuevos proyectos de ampliación de la compañía. Los bombardeos continuos sobre Madrid, que perforaron varios túneles, no impidieron que el subterráneo siguiera funcionando, especialmente para conducir a las tropas al norte de la ciudad, trasladar los cadáveres al cementerio del Este y los heridos a los puestos de socorro bajo las directrices del Comité de Control Obrero, que se encontraba al frente de los servicios del metro. Fuera de uso había quedado uno de los ramales de la línea 2, convertido en Taller de Carga de Projectiles Artilleros, mientras que andenes, pasillos y estaciones eran ocupados por los ciudadanos y cientos de personas que desde los pueblos cercanos acudían allí a refugiarse de las gélidas temperaturas del invierno de 1938, el más frío del siglo, y de los bombardeos, pese a la tragedia ocurrida el 10 de enero de aquel año al explotar el Taller de Carga de Projectiles Artilleros, causando numerosas víctimas mortales.

Durante la contienda, el equilibrio financiero del Metropolitano pudo mantenerse con grandes dificultades debido a las enormes inversiones realizadas para arreglar los destrozos causados por las bombas y pagar salarios y pensiones de viudedad. Al finalizar la guerra, pese a tan precaria situación, se retomaron las obras de la línea 4, destinada a comunicar el este con el centro de la ciudad, que se inauguró en 1941. La carestía de materiales y la necesidad de seguir comprando elementos auxiliares en el extranjero no impidieron que tres años después, cuando el metro tenía ya 27 kilómetros de recorrido y 332 millones de viajeros anuales, se abriera al público la línea de los bulevares, que conectaba Madrid de este a oeste. Independientemente de estas obras, emprendidas a raíz de la subida de tarifas prometida por el Gobierno, la red se iba ampliando con nuevos accesos de correspondencia entre las líneas, a la vez que se modernizaban coches y siste-

Arriba, de izquierda a derecha, los trenes de las series 5000, 3000 y 8000 reflejan la evolución del material móvil del metro madrileño. Debajo, estación de Ventas en los años 60 del pasado siglo.

mas de seguridad y se dotaba a las subestaciones de abastecimiento energético de nuevas instalaciones para garantizar el suministro.

Sin embargo, el retraso hasta 1956 de la subida de tarifas afectó de tal manera a las arcas del Metropolitano que el Gobierno dictó en 1955 un Decreto Ley de Financiación Compartida que otorgaba al Ministerio de Obras Públicas la potestad de construir la futura infraestructura del metro, que dejaba de ser propiedad de la compañía, mientras que el Estado se encargaría de fijar las condiciones jurídicas, técnicas y económicas de la explotación. En 1956 se aprobó la Ley sobre el Plan de Transportes de Madrid, que establecía para el metro nuevas ampliaciones que extenderían la red hasta los 50 kilómetros, con el objetivo de descongestionar el tráfico de superficie. El programa contemplaba también la construcción del suburbano para comunicar Madrid con la Casa de Campo a través de túneles y trazado en superficie. Once años después de aprobarse el documento, cuatro de las subestaciones de abastecimiento de energía ya habían aumentado su capacidad; se habían renovado más de 20 kilómetros de carriles y traviesas; el metro había llegado a Moncloa; se habían inaugurado dos ampliaciones:

Archivo Metro





Archivo Metro



Archivo Metro

Los primeros túneles se ejecutaron según el método belga, con una galería de avance en la parte superior central del tubo que luego se ensanchaba hacia ambos lados

la de la línea 1 hacia el norte y hacia el sur, para dar servicio al entorno de Vallecas; y la de la línea 2 hacia el este, además de un tramo de seis kilómetros del suburbano, de los cuales dos, al pasar por debajo del río Manzanares, obligaron a construir en la plaza de España la estación más profunda de las conocidas hasta entonces.

Otra obra importante de este periodo fue el alargamiento en 30 metros de 17 estaciones de la línea 1 para permitir la circulación de trenes de seis coches en lugar de cuatro. Los trabajos fueron muy peligrosos, porque tanto la construcción de los estri-

bos de la prolongación de cada estación como la demolición de la bóveda de la parte del túnel que iba a desaparecer para agrandar las estaciones se realizaron sin interrumpir el tráfico de trenes. Sólo la preparación de la cimbra de chapas articuladas utilizada como encofrado de la bóveda definitiva de las estaciones se realizó, al igual que su desmontaje, de madrugada, aprovechando que no circulaban los trenes.

Ampliación y modernización

Estos trazados pronto resultaron insuficientes, obligando al Gobierno a aprobar en 1967 un Plan de Ampliación y Modernización del Metro destinado a cubrir las necesidades de Madrid hasta el año 2000. El proyecto, revisado en 1974, contemplaba la apertura de siete nuevas líneas que comunicarían, entre otros puntos, barrios tan densamente poblados como los del Pilar, Concepción, Canillejas, Pueblo Nuevo o Moratalaz. El Ministerio de Obras Públicas estableció los criterios de construcción del nuevo trazado, por donde circularían trenes de la serie 5000, de mayores dimensiones que los tradicionales, lo que obligaba a modificar la altura y anchura de los futuros túneles y, en consecuencia, su profundidad y la de las estaciones, a las que se dotaría de escaleras mecánicas. Paralelamente, con el fin de modernizar la supraestructura de la red existente, se realizó un estudio que contemplaba, entre otras medidas, sustituir en túneles y estaciones la toma de corriente tranviaria tradicional de los trenes por la catenaria flexible para aumentar su velocidad; dotar al metro de avanzados sistemas de seguridad como el ATP, que detecta la posición de un tren en un tramo impidiendo que otro pueda entrar en él, o el sistema de conducción automática ATO para mejorar la velocidad del tren a lo largo del trayecto y durante el frenado. Además, se añadió la posibilidad de regular desde un centro de control la circulación de trenes mediante ordenadores y la de dotar a las subestaciones de un sistema de telemando. La mayor parte de estas medidas se implantaron paulatinamente en algunas líneas, al tiempo que se reno-

Archivo Metro



Interior de un coche de la serie 1000, que aportó un mayor confort a los viajeros a partir de los años 70 del pasado siglo.



vaban los sistemas viario, de alumbrado y señalización, y se saneaban bóvedas.

La elevada inversión para estas mejoras, sin que se hubiese aprobado un nuevo sistema tarifario, colapsó el equilibrio financiero de la compañía, por lo que en 1978 fue intervenida por el Gobierno. Tras sucesivos cambios de titularidad, la Compañía Metropolitana de Madrid pasó en 1985 a manos del Consorcio Regional de Transportes, integrado por la Comunidad Autónoma de Madrid, el Ayuntamiento y la Administración central, entre otros. Mientras tanto, el metro proseguía la reforma y modernización de instalaciones y equipos, destacando la remodelación de las estaciones más deterioradas y la sustitución de la red de telefonía tradicional por un sistema de comunicación a base de centrales digitales y enlaces de fibra óptica.

La Comunidad Autónoma de Madrid puso en marcha desde mediados de los años 90 tres ambiciosos programas de ampliación del metro, correspondientes a los periodos 1995-1999, 1999-2003 y 2003-2007. En el primero, con una inversión de 270.000 millones de pesetas, se crearon 56 nuevos kilómetros de trazado que extendieron la red a ocho distritos periféricos de la ciudad, al recinto ferial Juan Carlos I y al aeropuerto de Barajas, con la construcción de 36 estaciones. El segundo abordó la ampliación de la línea 8 desde Mar de Cristal a Nuevos Ministerios, con la construcción de un gran intercambiador, y la prolongación de la línea 10 para enlazar el oeste y el norte de Madrid con el Metrosur, línea circular de 40 kilómetros, ejecutada en las mismas fechas y que comunica los municipios de Alcorcón, Leganés, Fuenlabrada, Móstoles y Getafe. Y el tercero ha supuesto la mayor ampliación de la red de

Arriba, de izquierda a derecha, estaciones de Barajas, Nuevos Ministerios, del metro, y de Fuenlabrada, de Metrosur. Debajo, túnel de acceso a una estación de la prolongación de la línea 7.

la historia del metro, con la construcción de 53 kilómetros nuevos de trazado convencional, 27 de metro ligero —que circula en superficie hasta Pozuelo de Alarcón y Boadilla del Monte— y 79 estaciones. En este plan se han prolongado las líneas 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 11 hasta el límite de las zonas pobladas del norte, sur y este de la ciudad, además de superar los límites del ámbito urbano de Madrid con el trazado del Metronorte y Metroeste.

Con estas ampliaciones, en las que se ha invertido más de 4.000 M€, el metro de Madrid, con 289 kilómetros, 284 estaciones y 550 millones de desplazamientos anuales, se ha convertido en la tercera red subterránea del mundo después de las de Londres y Nueva York, mientras continúa su expansión con el desarrollo del cuarto programa de amplia-

La adopción de trenes de la serie 5000, a partir de 1974, obligó a modificar la altura, anchura y profundidad de los futuros túneles del metro





ción, 2007-2011, que seguirá extendiendo la cobertura del Metronorte, Metrosur y Metroeste, facilitando además su conexión con la red de trenes de Cercanías.

Los otros metros españoles

La segunda red metropolitana de España en cuanto a longitud, 147 kilómetros, es la de Valencia, inaugurada en 1988 pese a las dificultades de su construcción debido al suelo arcilloso y a la profundidad del nivel freático de la zona, que ha exigido la continua utilización de bombas de agua durante las obras. Consta de tres líneas de metro y dos de tranvía que transportan anualmente más de 68 millones de viajeros, estando prevista la prolonga-

La circulación de los trenes del metro madrileño es regulada desde un puesto de mando.

ción de varias de sus líneas para el año 2010. A ella le sigue la de Barcelona, que comenzó a operar en 1924 y actualmente consta de 115 kilómetros, mientras que la de Bilbao, que data de 1995 y tiene 51 kilómetros, ocupa el tercer lugar en cuanto al número de pasajeros: 86 millones transportados en 2007. Por su parte, la de Palma de Mallorca, de 7 kilómetros, enlaza desde 2007 la ciudad con el campus de la Universidad de les Illes Balears, y la de Sevilla funciona con un trazado de 18 kilómetros desde el pasado mes de abril.

Una de las obras más notorias del transporte subterráneo se está desarrollando en la actualidad en Barcelona: la construcción de la línea 9, en la que se habrán invertido entre 2002 y 2010 más de 3.000 M€. Será el trazado más largo de Europa con 43 ki-



Archivo Metro



Tuneladora en la estación de Nuevos Ministerios, en la línea a Barajas.

Metro Sevilla

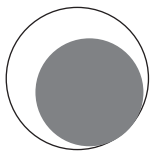


Caverna y túnel del metro de Sevilla, en servicio desde hace unos meses.

lómetros que enlazarán el resto de las líneas de la ciudad, la red de ferrocarril, el AVE, el puerto, el aeropuerto de El Prat, la Fira de Barcelona, cinco municipios de la provincia y la futura Ciutat Judicial de L' Hospitalet de Llobregat. Para perforar los diferentes tramos, caracterizados por la diversidad de los suelos por donde pasan, arenas limosas y rocas, principalmente, se están empleando tres tipos de tuneladoras de frente cerrado y distintas dimensiones. Una de las peculiaridades de esta línea radica en que la mayor parte del trazado del túnel se ha diseñado para albergar dos vías superpuestas que, separadas por una losa de hormigón armado, funcionarán como dos túneles independientes pero interconectados por rampas y escaleras dotadas de puertas antifuego para garantizar la evacuación de los pasajeros en caso de producirse algún incidente. Por otro lado, algunas de sus 46 estaciones, diseñadas de forma vertical, se caracterizan por su gran profundidad, máxima de 90 metros, ya que la línea cruzará todas las demás del metro de Barcelona.

Por su parte, Bilbao se ha convertido en un referente internacional en cuanto a la traza arquitectónica de su metro, obra del equipo de Norman Foster por la que fue premiado en 1998 por la Universidad de Harvard. La estructura de sus accesos en acero y cristal provee de luz natural todas las estaciones, entre las que destaca por su amplitud la de Sarriko, cuya cubierta está inspirada en las alas abiertas de una gaviota. Paralelamente a ello, el esmerado diseño del mobiliario de la red, que en 2012 habrá ampliado esu recorrido actual en más de 6 kilómetros, también fue galardonado en 1997 por la Asociación Española de Profesionales del Diseño, mientras que el Instituto Técnico Español de Limpiezas reconoció entonces al metro de Bilbao como el más limpio de Europa. Aunque han sido muchas las distinciones que ha recibido, incluyendo el pre-

Métodos de construcción



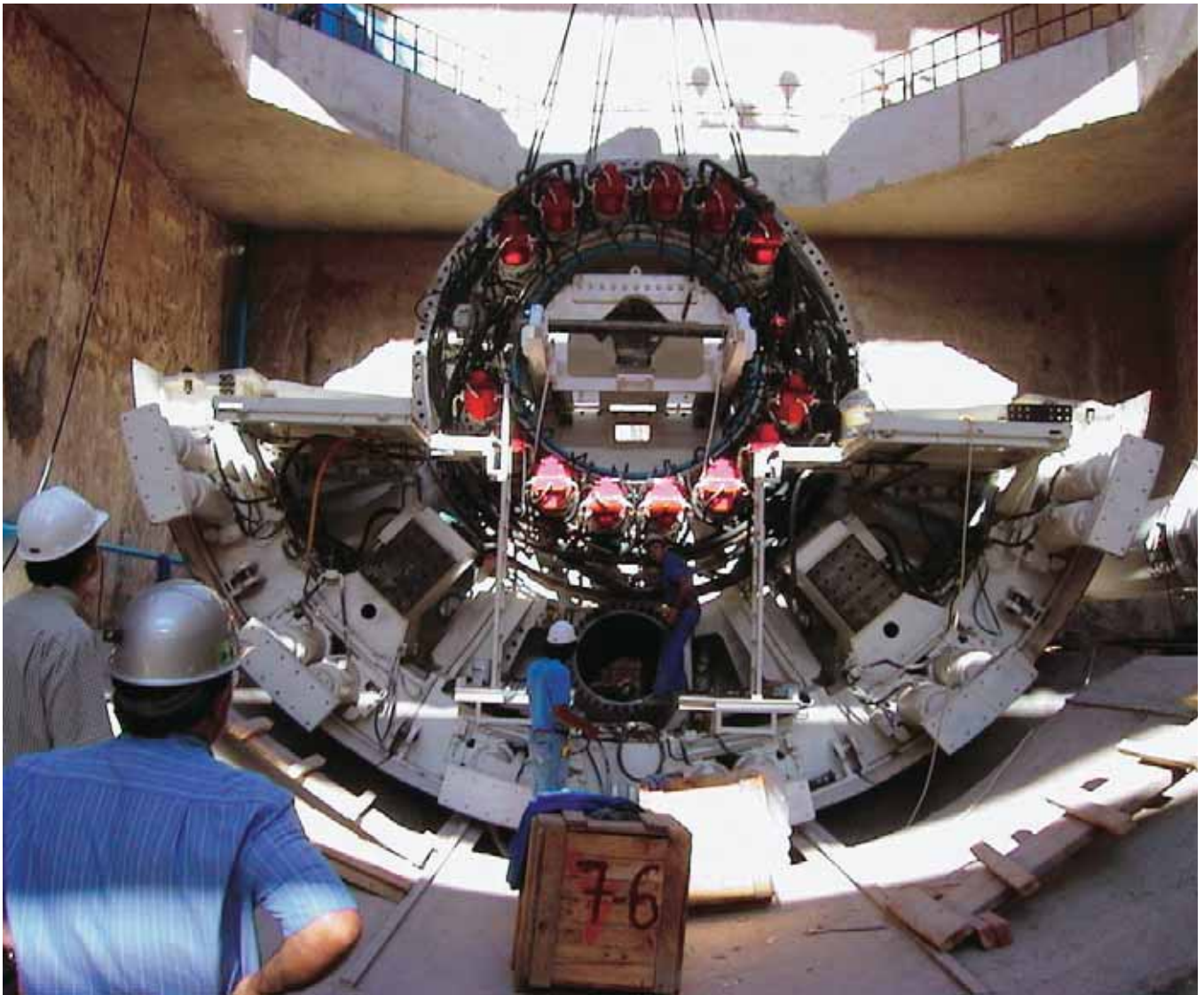
Hasta 1999 se han ejecutado en el metro de Madrid más de 80 kilómetros de túneles con el sistema belga o método tradicional de Madrid, por la seguridad que presenta la excavación, ya que al irse abriendo pequeñas secciones de la galería se minimiza el riesgo de hundimiento. Prueba de ello es que en los noventa años de historia del subterráneo madrileño sólo se ha producido un accidente con víctimas mortales utilizando este procedimiento. Fue en 1971 cuando se hundió uno de los tramos de la línea 7 al surgir una bolsa de arena suelta con agua colgada mientras se entibaba la

galería de avance. Este método sólo presenta dos inconvenientes: la necesidad de gran número de personal especializado y la lentitud en la construcción, razones por las que a partir de los años 70 sólo se ha empleado para perforar túneles de escasa longitud o en zonas donde es difícil introducir tuneladoras.

Otro procedimiento constructivo utilizado ha sido el método alemán, con el que se abrieron en los años 80 los 300 metros de subterráneo de la línea 9 que pasan bajo las líneas 4 y 6, así como la estación de Guzmán el Bueno. Este sistema, adecuado para excavar subterráneos de grandes luces en los que la bóveda soporta mucha

carga del terreno superior, es análogo al método belga, pero cambia las fases de su ejecución, ya que mientras que con éste se construye primero la bóveda del túnel y a continuación se excava el resto de la sección, con el sistema alemán la obra se inicia con la ejecución de los muros laterales del túnel, continúa con la de la bóveda, que se apoyará en ellos, y acaba con la perforación de la galería.

A partir de los años 70 se utilizaron las primeras tuneladoras de frente abierto, robustos cilindros de acero provistos de brazos o ruedas excavadoras que presentaron algunos problemas porque, aunque protegen el



Las tuneladoras han sido protagonistas del crecimiento del metro madrileño a partir de los años 70 del pasado siglo.

perímetro de la excavación, dejan el frente del túnel abierto, con el consiguiente riesgo de hundimientos. En Madrid se emplearon tres de estos equipos en las líneas 6 y 9, pero tras varios desplomes su uso se descartó en 1995. Desde entonces sólo se han manejado escudos de frente cerrado, cuya trayectoria tanto en la perforación del Canal de la Mancha como en los metros de París, Londres, Milán, Roma, El Cairo y Lisboa, ha puesto de manifiesto que estas máquinas son las más apropiadas para abrir túneles en rocas o suelos blandos, característicos de gran parte del terreno de Madrid. Garantizan tanto la seguridad de los trabajadores

como la estabilidad del frente de la galería al almacenar el material excavado en una cámara de la cabeza donde se conserva a la misma presión horizontal que tenía en el terreno.

Diez de estas tuneladoras, de nombres tan castizos como 'La Chata', 'La Paloma' o 'La Almudena', han hecho posible las ampliaciones del metro madrileño, en las que se ha dado prioridad a la seguridad con el diseño de severos planes de auscultación. Con la experiencia alcanzada en la perforación de túneles, el metro de Madrid ostenta el récord mundial de avance, con 1.020 metros por mes. Además, la incorporación a la red de las más

avanzadas tecnologías en infraestructura viaria, que reducen costes de mantenimiento y consumo energético, y de innovadores sistemas de seguridad que detectan por control remoto cualquier incidencia en las instalaciones, permitiendo controlar también la posición y velocidad de los trenes en circulación, han conferido al metro de Madrid tal liderazgo en el sector que, además de haber colaborado en el trazado de los subterráneos de Palma de Mallorca y Sevilla, participa en la asistencia técnica de los de Reino Unido, China, Buenos Aires, México y Chile, entre otros.



Consortio de Transportes. Bizkaia

mio GIMM a la Empresa por garantizar la accesibilidad en todas sus estaciones a las personas con problemas de movilidad, merece especial atención el interés que el metro de Bilbao ha mostrado por la conservación de recursos naturales tan preciados como el agua al crear un sistema de recogida de aguas que, procedentes de los acuíferos y de las lluvias, se recuperan para el Consorcio de Aguas de Vizcaya mediante un sistema de canalizaciones y bombeo. Finalmente, también cabe destacar que entre las medidas de seguridad empleadas para prevenir inundaciones, la estación del Casco Viejo ha sido equipada con un sistema de sólidas compuertas de acero que en caso de necesidad clausuran sus accesos impidiendo la entrada de agua. Otra estación, la de Ansio, en la vega de Baracaldo, que antiguamente se inundaba en marea alta, está dotada de un tanque de tormentas destinado a recoger tanto las aguas de una subida de marea como las de las lluvias torrenciales.

El metro de Sevilla es el único que existe por el momento en Andalucía. Han pasado más de cua-

Estaciones de los metros de Valencia (arriba) y Bilbao (debajo).

renta años desde que en 1968 el Ayuntamiento de la ciudad contempló la posibilidad de construir un medio de transporte subterráneo, un proyecto que, con orígenes en 1974, ya mencionaba el trazado de tres líneas. Incluso se llegaron a construir varios tramos de túneles hasta que en 1983 se abandonó la idea del metro ante el temor de que pudiera afectar a los edificios históricos de la ciudad. Sin embargo, el crecimiento urbano del área metropolitana de Sevilla, con más de 1 millón de habitantes, dio un nuevo impulso en 1999 al trazado de la red, cuya primera línea, inaugurada en abril pasado, recorre 18 kilómetros entre Mairena de Aljarafe y Dos Hermanas, mayoritariamente de forma subterránea, aprovechando parte de la infraestructura ya construida. Dadas las características del terreno por donde circula, algunos de los tramos de sus túneles fueron excavados manualmente y otros con tuneladora o con el sistema de muros en pantalla, que consiste en levantar dos muros de hormigón armado verticales a ambos lados de la futura excavación del túnel que posteriormente se cubren con una losa a modo de cubierta, lo que permite restablecer la normalidad en la superficie mientras que se continúa perforando el subsuelo. Una vez solventados los incidentes ocurridos durante las obras, varios socavones producidos por la filtración de agua y el descarrilamiento de un convoy en fase de pruebas, el 2 de abril comenzó a funcionar la primera línea de las cuatro previstas para el metropolitano de Sevilla. En su construcción se ha valorado tanto la seguridad de los edificios e infraestructuras existentes, reforzándose el terreno con la aplicación de inyecciones de morteros, espumas y geles, como la de los túneles, a los que se ha dotado de sistemas de ventilación, evacuación de aguas y alumbrado convencional y de emergencia. Por otro lado, también se han cuidado al máximo los aspectos medioambientales, ya que los convoyes disponen de frenos eléctricos que devuelven la energía consumida a la red; asimismo, en las vías se han acoplado elementos disipadores que reducen considerablemente el ruido y las vi-



braciones de los vagones, provistos para el mismo fin de ruedas elásticas. Todos los coches, además, son de piso bajo para facilitar el acceso de los usuarios, disponiendo también de zonas especialmente destinadas a los discapacitados.

Andalucía contará próximamente con otras dos redes metropolitanas en las ciudades de Málaga y Granada. El proyecto del metro de Málaga forma parte del Plan Intermodal de Transportes en el Área Metropolitana de Málaga, aprobado en 1999 para descongestionar el transporte superficial de la ciudad. Tras aprobarse dos años después el estudio informativo de la red y en 2005 el proyecto definitivo de sus seis líneas, actualmente están en construcción las líneas 1 y 2, que a lo largo de 14 kilómetros conectarán el distrito de la Carretera de Cádiz, la zona más poblada de la ciudad, con el centro urbano, la Universidad, el hospital Clínico y la Ciudad de la Justicia. Para construir los 8 kilóme-

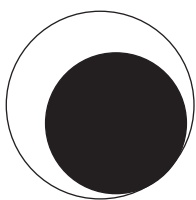
Arriba, obras de prolongación de la línea 9 del metro de Barcelona, con una sección circular que acogerá dos vías superpuestas. Debajo, trabajos en una estación del metro de Sevilla.

tros de su trazado subterráneo se ha utilizado el sistema de muros pantalla, a fin de prevenir posibles daños en los edificios colindantes. Uno de los tramos más delicados es el comprendido entre la estación de Renfe y La Malagueta, donde se localizan importantes restos arqueológicos romanos, musulmanes y cristianos. Las obras, que comenzarán en 2010, afrontarán el reto de no dañar no sólo estos yacimientos, sino también la vida de los ficus centenarios de la Alameda Principal.

En otoño de 2007 se empezó a construir el metro de Granada, que unirá en 2011 la zona norte del área metropolitana con el sur, que es el área de mayor crecimiento urbano de la ciudad. Conectará a lo largo de 16 kilómetros y en 45 minutos los municipios de Albolote, Mararena, y Armilla con el distrito universitario de Granada, los hospitales, las instalaciones deportivas y las estaciones de autobuses interurbanos, de ferrocarril y la futura del AVE.

Al igual que en los demás trazados de reciente construcción, el metro de Granada, que transportará a 47.000 personas diariamente, ha respetado los más estrictos protocolos de seguridad en estaciones, túneles y convoyes, que estarán bajo la supervisión de un puesto de mando centralizado que controlará el tráfico de vehículos y los sistemas de seguridad de los vagones y de toda la infraestructura de la red. ■





La construcción de túneles carreteros en el siglo XX

Veteranos, pero en forma



Dragados



DCE Catalunya

Izquierda, túnel de Sant Pere de les Maleses en la N-260, en la Pobl de Segur (Lleida). Arriba, boca del túnel viejo de Vielha durante su construcción.

La red de carreteras estatal se construyó en su mayor parte a lo largo del siglo XX con recorridos que han tenido que salvar los principales obstáculos montañosos del país, como reflejan los más de 400 subterráneos de que consta. Túneles como los de Vielha, Guadarrama, Cadí, Bielsa o los del Huerna son ejemplos representativos de la forma de construir subterráneos carreteros durante el pasado siglo.

JOSÉ IGNACIO RODRÍGUEZ

La red de carreteras española, con competencias divididas entre el Estado (unos 26.000 kilómetros), las comunidades autónomas (70.000 kilómetros) y las diputaciones y cabildos insulares (69.000 kilómetros), tiene a lo largo de sus 160.000 kilómetros de longitud una buena cantidad de túneles de distintas dimensiones y tipos, construidos desde que se comenzó a extender la red viaria por toda la geografía española. Sólo en la Red de Carreteras del Estado existen actualmente 405 túneles, con una longitud total de 214 kilómetros.

A continuación se detalla la historia y el proceso constructivo de una serie de importantes túneles construidos en zonas montañosas a partir de 1925, como el túnel viejo de Vielha, y hasta 1993, como los túneles del Huerna, que ilustran las técnicas constructivas de los subterráneos carreteros españoles a lo largo del siglo XX.



Viejo túnel de Vielha

En mayo de 1948 se abrió al tráfico el túnel de Vielha, de 5.240 metros de longitud, la principal obra española de ingeniería de la primera mitad del siglo XX. Con la inauguración en diciembre de 2007 de un nuevo túnel paralelo –Vielha-Juan Carlos I–, el más veterano, incapaz de adaptarse a las exigencias del tráfico del siglo XXI, pasaba a dar un servicio complementario.

El túnel de Vielha se encuentra situado en la carretera N-230 (Tortosa-Francia), en la provincia de Lleida, entre las poblaciones de Vilaller (boca sur) y Vielha (boca norte) del Valle de Arán.

Alfonso XIII ordenó el inicio de las obras de construcción del túnel de Vielha en marzo de 1926, a pesar de que la idea fuera defendida ya en el siglo XIX por el gobernador liberal, Pascual Madoz, y transformada en proyecto por los ingenieros franceses Auriol y Partiot en 1830.

En 1941 ya se había horadado la montaña, pero hubo que esperar hasta mayo de 1948 para abrirlo al tráfico, comunicando el valle de Arán con el resto del país. En aquellos tiempos, fue la principal obra de ingeniería realizada en España, y en la actualidad, una de las vías de comunicación existentes entre España y Francia por el Pirineo Central.

Boca sur del antiguo túnel de Vielha, ahora destinado a servicios complementarios, como paso de mercancías peligrosas, transportes especiales y acceso al nuevo túnel
Juan Carlos I.

El viejo túnel de Vielha, construido entre 1925 y 1948, es la principal obra española de ingeniería de la primera mitad del siglo XX

Tiene una longitud de 5.240 metros, dispone de dos carriles de 3 metros de ancho, dos aceras de 0,50 metros y una pendiente media del 5%. El diseño de su trazado es recto, ya que inicialmente estaba proyectado para el ferrocarril, con una orientación aproximada sur-norte.

Retirada de escombros con burros

En su construcción, los escombros eran retirados por burros en pequeñas carretas a modo de mina. En los primeros años de servicio, el túnel se cerraba con portones (el Gobierno adujo motivos de seguridad), pero la fuerza de las ventiscas impedía en ocasiones la apertura de los mismos. Esta circunstancia obligó a ejecutar túneles artificiales en ambas bocas y con directriz curva para evitar los deslumbramientos a la salida del túnel. Hay que destacar que las bocas de túnel se encuentran a altitudes elevadas (la boca sur, a 1.630 metros, y la boca norte, a 1.320 metros), lo que obliga a realizar frecuentemente operaciones de vialidad invernal para mantener un nivel de servicio adecuado.

El 7 de noviembre de 1925 se adjudicaron las obras de la construcción del túnel a la empresa J. E. Segura S.A., de Barcelona, con un presupuesto de adjudicación de 10.693.000 pesetas y el compromiso de finalizar las obras en 1930. El autor del proyecto fue el ingeniero Felipe Cabrero, mientras que el ingeniero jefe de obra fue Juan Montañés.

En 1926 se inicia la carretera de acceso desde Vielha a la boca norte, así como las primeras perforaciones en el túnel. En este mismo año surgen los primeros problemas que pusieron en peligro la pro-



DCE Catalunya

Retirada de escombros del túnel mediante un burro, en una imagen de los años 20 del pasado siglo. Izquierda, imagen del interior del subterráneo.

pia ejecución del túnel. La razón derivaba del desdoblamiento de la Dirección General de Obras Públicas en dos ramas, carreteras y ferrocarriles. El proyecto original contemplaba que el tren pasara por el túnel, uniendo las poblaciones de Pobla de Segur y Vielha. Este hecho motivó que el 26 de enero se reunieran los 18 alcaldes araneses con el diputado provincial, el delegado gubernativo y el contratista, dejando constancia en el antiguo libro de actas del Conselh Generau d'Aran de la frustración general que este cambio comportaba por el hecho que esto implicaba un retraso significativo en la finalización de las obras. En esa época los araneses querían el túnel para uso ferroviario, tal como contemplaba el proyecto inicial de Rouviere.

De ferroviario a carretero

En 1928 la construcción del túnel recibe un doble impulso: por un lado, se construye una central eléctrica en el río Nere que proporciona energía y luz al valle, y por otro, se produce la visita durante el verano del general Martínez Anido, ministro de Gobernación, que decidió que la anchura del túnel se ampliara desde los 4,60 metros a los actuales 7 metros, unas dimensiones que permiten que dos vehículos se crucen.

De esta manera quedó decidido que el uso del túnel fuera para carretera y no para tren, lo que supuso un incremento del coste de las obras. De esta época data el proyecto inicial de los ingenieros Ramón Martínez de Velasco y Felipe Cabrero Muro, que posteriormente dirigió las obras hasta 1948, contando con la ayuda del ingeniero Juan Montañés Pascual.



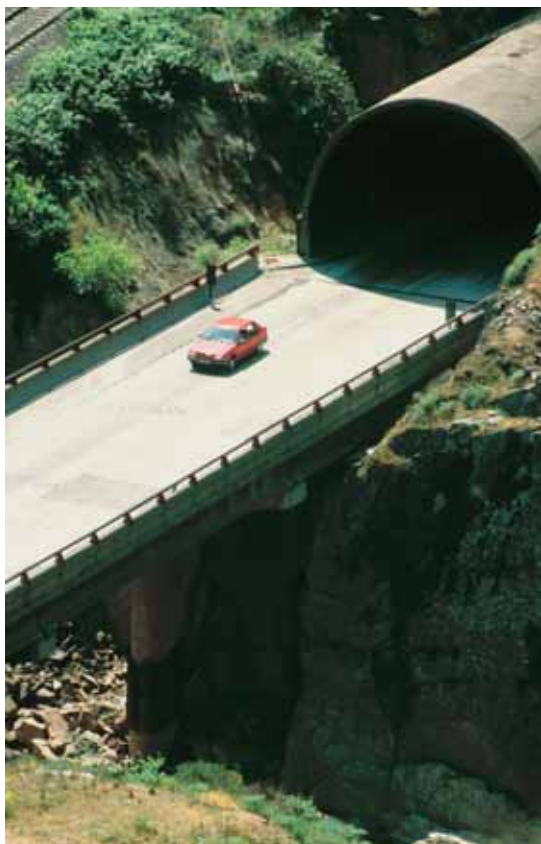
Desde entonces se han ido realizando progresivamente mejoras en sus instalaciones, como la construcción de túneles artificiales curvos en las bocas para reducir la elevada velocidad del aire, que normalmente sopla en dirección norte-sur, producida por el efecto chimenea en condiciones de tiro natural. Asimismo, se construyó una galería de ventilación desde los aledaños de la boca norte, paralela al tubo principal, de 1.476 metros de longitud. Posteriormente se ha revestido el túnel con tela impermeabilizante y se le ha dotado de una potente iluminación y de ventilación longitudinal (8 ventiladores por boca). También se instalaron detectores (y extinción) de incendios, de CO₂ y opá-

El clima social de la República durante los años 30 no favoreció precisamente el desarrollo de las obras. En enero de 1933, el Ministerio de Fomento paralizó las obras, y en Barcelona fue asesinado José Segura, uno de los contratistas de la obra. En julio de 1939, acabada la Guerra Civil, se reanudaron los trabajos con un intenso ritmo, y el 25 de enero de 1941 se produjo el cale del túnel. Sin embargo, pasarían aún siete años, hasta octubre de 1948, para que el túnel entrara en servicio y circularan por su interior los primeros vehículos.

Arriba, túnel carretero excavado en la roca en el siglo XIX. Izquierda, boca artificial de uno de los túneles de la autovía A-4 en el desfiladero de Despeñaperros.

címetros, se implantó la posibilidad de telefonía móvil con cobertura GSM en todo el túnel y un sistema de interfonía (postes SOS) y megafonía, y por último, un circuito cerrado de televisión (CCTV). Igualmente, dispone de un sistema de extinción de incendios y, en caso de incendio, la alarma se transmite al sistema de control, el cual automáticamente cierra el tráfico del túnel siguiendo los protocolos establecidos: primero dispara los semáforos en rojo y al cabo de unos segundos baja las barreras ubicadas en ambas bocas, impidiendo la entrada de vehículos.

Sin embargo, las necesidades actuales del tráfico motivaron que el Ministerio de Fomento promoviera la construcción de un segundo túnel paralelo al anterior, ya que el actual presentaba una gran complejidad para permitir mejoras de diseño y capacidad. Desde la inauguración del nuevo túnel de Vielha-Juan Carlos I, el 4 de diciembre de 2007, el viejo subterráneo se ha destinado para el paso de mercancías peligrosas, transportes especiales y acceso al túnel principal por las galerías de conexión de los servicios de mantenimiento y emergencia.



Utilidades del viejo túnel

Tras la puesta en servicio del nuevo túnel de Vielha-Juan Carlos I, se ha realizado una serie de pequeñas obras de mejora en el viejo túnel, que presta las cuatro funciones básicas:

- Paso para camiones con mercancías peligrosas.
- Paso para vehículos con transportes especiales.
- Galería de servicios para evacuación de heridos (se podrá acceder mediante ambulancia al nuevo túnel), y posibilidad de paso de bomberos mediante las galerías de conexión para extinción de incendios en caso de incidente.
- Posibilidad de salida y evacuación de usuarios del nuevo túnel en caso de incidente.



Túneles de Guadarrama

El 4 de diciembre de 1963 se inauguraba el primer túnel de peaje de España, con un coste de 30 pesetas para los turismos. Con una longitud de 2.800 metros, contaba con una sola calzada de 9 metros que daba paso a la circulación en ambos sentidos, permitiendo ahorros de tiempo para los camiones, en condiciones climatológicas medias, de aproximadamente una hora entre Guadarrama y San Rafael.

Para acceder a Madrid desde el norte es preciso salvar el obstáculo que representa el Sistema Cen-

Arriba, interior del segundo túnel de Guadarrama, abierto en 1972. Debajo, boca del primer túnel, en servicio desde 1963.

tral, para lo que se venían utilizando los puertos de Navacerrada, Somosierra y Guadarrama. Los dos últimos eran, sin duda, los más importantes a efectos del tráfico, y de éstos, el de Guadarrama, por encontrarse a mayor altura, presentaba mayores dificultades invernales. Por ello se decidió en 1960 la construcción y explotación en régimen de peaje del túnel de Guadarrama, que fue concedida a Canales y Túneles, aunque la ejecución de los trabajos preliminares comenzó en febrero de 1962, en colaboración con Dragados y Construcciones y bajo la supervisión de una comisión inspectora.

En ese momento, el tráfico medio aforado en el alto de los Leones era de 3.000 vehículos diarios, de los que el 41% eran pesados. La construcción del túnel significaba, desde el punto de vista económico, la canalización del tráfico del sur y Levante con el noroeste, y viceversa, asegurando la circulación en cualquier época del año. Aparte del ahorro de combustible, se estimaba, en unas condiciones climatológicas medias, una reducción del tiempo de aproximadamente una hora en el recorrido de Guadarrama a San Rafael.

Se trataba de la primera y única concesión en España de este tipo, con un coste superior a los 500 millones de pesetas. Los peajes máximos, establecidos por orden ministerial, eran de 30 pesetas para turismos, 125 para camiones de dos ejes y 200 para los de tres ejes, camiones con remolque y autobuses.

El túnel, de 2.800 metros de longitud, contaba con una sola calzada de 9 metros que daba paso a la circulación en los dos sentidos. Disponía de dos ace-





ras de 0,5 metros, y una altura libre de 4,50 metros. La boca sur, situada a una altitud de 1.195 metros, y la norte, a 1.285, presentan un desnivel de 90 metros. Los accesos a cielo abierto tenían en ambas bocas una longitud aproximada de 1.300 metros, con un ancho de calzada de 7 metros y dos arcones de 3 metros. En el acceso norte, próximo a la entrada del túnel, se encontraban situadas las casetas de peaje.

Las obras

Las obras comenzaron en febrero de 1961, aunque la perforación del túnel se inició simultáneamente en ambas bocas en octubre de 1961, calándose el 4 de mayo de 1963. Los trabajos de ejecución consistieron por tanto, en la excavación y revestimiento de los 2.800 metros del túnel y los accesos correspondientes, que totalizaban 6 kilómetros de carretera. La roca extraída se utilizó para formar los pedraplenes necesarios para los citados accesos.

La excavación se realizó a plena sección, lo que permitía trabajar a un ritmo acelerado (la obra finalizó siete meses antes del plazo fijado) y podía efectuarse el revestimiento con un desfase pequeño respecto a la excavación. No obstante, dadas las características de la roca, para trabajar a plena sección se utilizó un sistema de cosido de la roca con bulones.

El trabajo de excavación se organizó mediante un andamio móvil por cada boca, cuyo desplaza-

Trabajos de ejecución del primer túnel de Guadarrama, a principios de los años 60. Derecha, interior del túnel en fase de ejecución.



miento se efectuaba en camión, lo que permitía trabajar en cuatro niveles, con un total de 25 martillos ligeros Geiss. Acabada la perforación, se cargaba con dinamita, se colocaban los detonadores eléctricos y se efectuaba la explosión. A continuación se efectuaba la limpieza de las paredes y el bulonaje, y se retiraban los escombros con dos palas excavadoras, una en cada boca, y camiones.



Dragados



Dragados

A lo largo del túnel se construyó un falso techo, que separa la zona dedicada al tráfico de la sección utilizada para la ventilación, y se efectuó un revestimiento superficial con baldosas de terrazo de todos los hastiales. El sistema de ventilación era semitransversal, pudiéndose cambiar a transversal sin interrumpir el tráfico. La salida al túnel de aire fresco se efectuaba mediante toberas, usándose cuatro ventiladores con 220 CV que, en una segunda fase, con dos ventiladores de impulsión y otros dos de aspiración, alcanzó una potencia de 660 CV.

El alumbrado interior se efectuaba mediante luminarias especialmente diseñadas y, para la circulación nocturna se dispuso en los accesos un moderno alumbrado con lámparas de vapor de mercurio. Además, se instaló un completo sistema de señalización por semáforos y rótulos indicadores que funcionaban manual o automáticamente. Cada 60 metros se montó en cada banda del túnel un pulsador de alarma, y cada 120 metros, un extintor y un teléfono para accidente o avería, que era atendido desde el puesto de mando y control, situado en la boca norte, desde donde se enviaban los vehículos de taller y socorro.

Segundo túnel en 1972

En 1972 entró en servicio el primer tramo de la autopista Villalba-Adanero, incluyendo el segundo túnel de Guadarrama, mientras que la totalidad de la autopista (69,6 kilómetros) culminó a finales de 1976. Así, el 17 de julio de 1972 se inauguró el primer tramo de la autopista de peaje AP-6 (Villalba-Adanero) entre Villalba y el alto del Caloco. Di-

Los trabajos de ejecución del primer túnel de Guadarrama se realizaron mediante un andamio móvil, que permitía trabajar en cuatro niveles diferentes.

cho tramo incluyó la construcción del túnel II de Guadarrama, destinado al tráfico sentido Coruña, mientras que para el tráfico sentido Madrid se aprovechó el túnel inaugurado en 1963.

Este túnel, de 3.340 metros de longitud, tiene una diferencia de nivel entre sus bocas de 30 metros. La sección tipo está formada por dos hastiales unidos por una bóveda de intradós circular de 6 metros de radio, con una altura libre sobre el eje de 8,40 metros. La anchura libre de rodadura es de 10,5 metros y está dividida por un arcén izquierdo de 1 metro, la calzada de 7 metros, con dos carriles, y el arcén derecho, de 2,50 metros. Está totalmente revestido de hormigón (protegido con pintura de resina), con un espesor de 50 centímetros en la clave y de 92 centímetros en la base de los hastiales. No obstante, la excavación se realizó a sección completa y no se revistió hasta finalizar la misma, por lo que en algunos puntos fue necesario realizar operaciones previas de sostenimiento.

El túnel está provisto de un falso techo, apoyado en vigas transversales de acero, en el que se han practicado unas trampillas regulables que permiten el paso del aire entre la zona de circulación rodada y los conductos superiores de ventilación, dotados de un sistema semilongitudinal.

El 29 de octubre de 1970 se produjo el cale del

El primer túnel de Guadarrama tiene una longitud de 2.800 metros, mientras que el segundo, construido nueve años después, se extiende a lo largo de 3.340 metros



Nevasport



Consorcio Túnel de Bielsa-Aragnouet

túnel y a primeros de junio de 1972, después de nueve años de servicio, se suspendió la circulación por el primer túnel durante 46 días para proceder a la renovación del firme, de la iluminación y del falso techo. Durante este periodo el tráfico discurrió por el nuevo túnel II, hasta que el 17 de julio de 1972 se inauguraba oficialmente el primer tramo de autopista entre Villalba y el alto del Caloco, de 28,2 kilómetros.

El túnel II se dotó del equipamiento de seguridad más avanzado de la época, incluyendo sistemas de iluminación y ventilación controlados por sensores. Extintores manuales, postes SOS, semáforos, megafonía, timbres de alarma y cámaras de televisión en circuito cerrado complementaron las instalaciones de seguridad y control del túnel.

Túnel de Bielsa-Aragnouet

El 5 de noviembre de 1976 se inauguraba el túnel de Bielsa-Aragnouet, con una longitud de 3.070 metros y una pendiente aproximada del 5%, comunicando el valle español del Cinca con el francés de la Neste d'Aure, un trayecto que, durante siglos, se había realizado por el puerto pirenaico de Bielsa.

Los puertos naturales del Pirineo Central, como el de Bielsa en el valle del río Cinca, sirvieron de comunicación desde la más remota antigüedad. De hecho, se tienen noticias de que las tropas cartaginesas, al mando de Aníbal, cruzaron en la península Ibérica a través de esta zona pirenaica. Ambos lados de la frontera han mantenido lazos comerciales, culturales e incluso familiares; de hecho, es fácil encontrar los mismos apellidos en sendos valles.

Fue ya en los años cuarenta cuando se construyó en su tramo final la carretera que parte de Aínsa por el valle del Cinca. Durante muchos años, Bielsa y todo el valle estuvieron comunicados a través de un camino que, partiendo desde Salina, llegaba

Boca francesa (izquierda) y española (derecha y debajo) del túnel de Bielsa-Aragnouet, situadas a una cota de más de 1.600 metros.

hasta la central de Barrosa, una comunicación precaria construida por las hidroeléctricas. De ahí la aspiración de una carretera que enlazara el valle del Cinca con la red viaria española, así como un túnel que facilitara el enlace con el valle francés de la Neste d'Aure, que durante siglos se había realizado por el puerto de montaña.

Convenio internacional

La construcción del túnel internacional de Bielsa-Aragnouet fue acordada mediante un convenio firmado por los dos países y ratificado por sus respectivos parlamentos.

Tras los estudios iniciales, se acordó la ubicación de la boca española en el arroyo Pinarra, en una cota de 1.676 metros, mientras que la francesa se situó a 1.825 metros, en dirección norte-sur. No obstante, estudios posteriores obligaron a bajar la boca española a 1.664 metros para evitar una zona de relleno geológico.

El túnel, en alineación recta, atraviesa el macizo ordoviciense, con una cobertura en su mayor parte de más de 150 metros y un máximo de 800 hacia



Nevasport

La construcción del túnel de Bielsa-Aragnouet, que cruza la frontera pirenaica, fue financiada proporcionalmente por España y Francia en función de la longitud del subterráneo en cada país

la cresta fronteriza. La perforación se realizó mediante una galería de avance, en unos 15 metros cuadrados de sección, ejecutándose posteriormente los ensanches y destroza que permitían dar la sección definitiva al túnel. El sostenimiento provisional se ejecutó con cerchas y blindaje metálico en seis fallas encontradas y mediante bulones sellados con resina en el resto del túnel.

Se realizó un revestimiento de hormigón en masa, previo drenaje en las zonas que lo exigieron y, finalmente, se efectuaron inyecciones de mortero de cemento con carácter general en todo el túnel.

La sección del túnel permite un gálibo de 4,30 metros de altura bajo una bóveda en arco carpanel y dispone de una calzada de 6 metros de ancho con dos aceras de 0,75 metros. Su longitud es de 3.070 metros, con una pendiente aproximada del 5%.

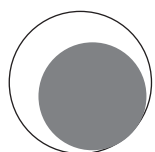
En el interior del túnel se construyó un aparcamiento a mitad de su recorrido, y también dispone de dos galerías exteriores construidas, una en cada boca, para protección de aludes, que, mediante un sistema de aberturas cerradas con pavés de vidrio, facilitan la acomodación visual al entrar y salir de la oscuridad interior.

El túnel se equipó con tres teléfonos de socorro enlazados a los servicios de policía y aduanas de ambos países, así como dispositivos de control de monóxido de carbono conectados con semáforos en las bocas para asegurar el cierre al tráfico, en caso de



Nevasport

Sobre estas líneas, bocas del túnel de la Canda y del túnel de la autovía Madrid-Valencia, dos exponentes de subterráneos carreteros construidos en la segunda mitad del siglo XX.



Acondicionamiento y modernización

En diciembre de 2008 se adjudicó la redacción del proyecto de acondicionamiento y modernización de las instalaciones y equipamientos de seguridad del túnel de Bielsa-Aragnouet, que antecede a las obras de mejora y seguridad para las que la Unión Europea ha concedido casi 11 M€. La ejecución de las obras de modernización comenzará a finales del año 2009 y se desarrollarán previsiblemente hasta finales de 2012. Las actuaciones acordadas el pasado mes de febrero

por el Comité Ejecutivo del Consorcio para la gestión, conservación y explotación del túnel de Bielsa-Aragnouet y sus accesos, están relacionadas con la ventilación, iluminación, medidas contra incendios, alimentación eléctrica, señalización, sistema de vídeo vigilancia y detección de incidencias, sistema de comunicaciones, sistema de gestión centralizada y medidas de obra civil. Las inversiones necesarias ascienden a un total de 16.535.242 €.



superar los límites admisibles. De hecho, se dejaba para más adelante, cuando la evolución del tráfico lo aconsejara, la instalación de la iluminación y ventilación transversal de todo el túnel.

La obra, financiada proporcionalmente por España y Francia de acuerdo con las longitudes del túnel en cada país, costó un total de 427 millones de pesetas, de los que el Estado español aportó 182 millones, junto con los 8,5 millones sufragados por el Ayuntamiento de Bielsa.

Túnel del Cadí

El próximo mes de octubre se cumplirán 25 años de la entrada en servicio del túnel del Cadí, una infraestructura que ha facilitado la comunicación entre las comarcas montañosas catalanas del Berguedà y la Cerdanya, abriendo una nueva vía de comunicación con Andorra y el Alt Urgell. Además, las ha acercado al área metropolitana de Barcelona a través del eje del Llobregat.

La primera referencia a la necesidad de construir un túnel a través de la sierra del Cadí nos hace retroceder un siglo, a octubre de 1908, cuando se presentó al rey Alfonso XIII una solicitud para la construcción de un túnel que facilitara la comunicación entre el Berguedà y la Cerdanya. La petición iba

Boca sur e interior del túnel del Cadí, infraestructura viaria que permite acercar el área metropolitana de Barcelona con Andorra.

acompañada de un proyecto redactado por el ingeniero de Caminos Gonzalo Moragas, muy probablemente director de Obras Públicas de la Diputación de Barcelona. Meses después, en un borrador de carta fechada el 26 de febrero de 1909, el entonces alcalde de Sant Julià de Cerdanyola, Ramón Boixader, se dirigía al capitán general de Cataluña, Arsenio Linares, para solicitar la construcción de una carretera directa con la Cerdanya atravesando el coll de Jou, impracticable por la nieve durante el invierno.





En régimen de peaje

En 1968, coincidiendo con el desarrollo económico de los años sesenta, se constituyó la sociedad Promociones Pirenaicas, SA, y un año después se solicitó al Ministerio de Obras Públicas la concesión de un proyecto de construcción y explotación en régimen de peaje del túnel, así como de sus accesos. Sin embargo, la petición no se aceptó hasta 1973, concediéndose a la citada sociedad la construcción, conservación y explotación en régimen de peaje de un túnel a la sierra del Cadí, con sus accesos desde Bagà (Barcelona), Bellver (Lleida) y Alp (Girona).

En 1980 se creó la empresa Infraestructuras de Catalunya, SA, compañía participada mayoritariamente por diversas cajas de ahorro y otras entidades catalanas, así como por particulares a título individual, y en julio del mismo año se adjudicaron las contratas correspondientes a la obra civil del túnel y accesos. Posteriormente, en junio de 1981, se cambió la denominación social por la de Túnel del Cadí, Concesionaria del Estado, SA (en 1996 la denominación social pasó a ser Túnel del Cadí, Societat Anònima Concessionària).

En septiembre de 1981, la Generalitat de Catalunya asumió el carácter de administración concedente y el ejercicio de las potestades administrativas inherentes. Un año más tarde empezaron los trabajos preparatorios y en enero de 1982 se inició la perforación de la montaña.

El 30 de octubre de 1984 entraron en servicio los

El viaducto de Bac de Diví en Bagà, cerca de la boca sur del túnel del Cadí, ilustra la compleja orografía de la sierra de Moixeró.

5.026 metros de longitud del túnel del Cadí y sus principales accesos. Actualmente, el túnel forma parte de la carretera C-16 (eje del Llobregat), en la que confluyen vehículos procedentes de comarcas industriales, y densamente pobladas, como el Baix Llobregat y el Vallès Occidental, de la ruta europea E09, reforzando el itinerario Barcelona-Tolosa-París. Puede decirse que su construcción ha contribuido decisivamente a la terciarización de un territorio dependiente, hasta entonces, del sector primario. El desarrollo del turismo de montaña, la promoción de deportes de nieve y la proliferación de segundas residencias han transformado la realidad social y económica de esta región.

Seguridad y medio ambiente

Desde sus primeras andaduras como eje viario, los gestores del túnel del Cadí se fijaron dos prioridades:

la mejora constante de la seguridad de los usuarios del túnel y la protección del medio ambiente. Entre las mejoras de seguridad destaca, especialmente, la construcción de la nueva galería de servicios paralela al túnel principal, que entró en funcionamiento en febrero de 2008. Con esta nueva

Los primeros intentos para atravesar la sierra del Cadí con un túnel datan de principios del siglo XX, pero no fue hasta 1984 cuando se inauguró esta moderna infraestructura subterránea



Dragados



galería se ha pasado de 2 a 19 salidas de emergencia, todas ellas presurizadas para evitar la entrada de humos en caso de incendio, con puertas cortafuegos, sistemas de comunicación y extintores.

Asimismo, desde el centro de control -en servicio permanente las 24 horas-, y a través de cámaras de televisión por circuito cerrado, se tiene conocimiento en tiempo real de cualquier incidencia que pueda suceder en el interior del túnel, con el apoyo de sistemas informatizados de gestión. Por otra parte, diferentes paneles alfanuméricos y un servicio de megafonía mantienen informados a los conductores ante cualquier situación de contingencia.

Por otro lado, debido al entorno natural en el que está situado y por ser una vía de circulación que puede tener una incidencia sobre el medio ambiente, el túnel del Cadí ha prestado siempre especial atención al cuidado y la restauración del patrimonio natural. Gran parte de la concesión discurre por el parque natural del Cadí-Moixeró,

Arriba izquierda, interior de uno de los túneles del Garraf, en la autopista C-32 (Vendrell-Barcelona), construido en los años 90; derecha, interior de uno de los túneles de El Padrún. Debajo, maquinaria para construir el túnel asturiano.

un espacio con un elevado valor paisajístico, rico en fauna y vegetación, por lo que el trazado y las instalaciones de la carretera se diseñaron para minimizar el impacto inicial.

En 1987 se construyó una central hidroeléctrica para aprovechar las aguas del cercano río Greixa y las procedentes de afloramientos y filtraciones, pudiendo generar, en un año hidrológicamente favorable y en forma de energía renovable, un elevado porcentaje del consumo eléctrico total del túnel y del resto de instalaciones.

Los túneles del Huerna

Siguiendo la Ruta de la Plata, el paso de la cordillera Cantábrica por la autopista de peaje León-Campomanes o del Huerna (AP-66), y del trayecto



El túnel del Cadí en cifras

- Longitud de la concesión: 29,7 kilómetros
- Longitud del túnel: 5.026 metros
- Longitud galería de servicio: 5.308 metros
- Salidas de emergencia: 19
- Distancia media entre salidas de emergencia: 250 metros
- Altitud de la boca sur (Berguedà): 1.175 metros
- Altitud de la boca norte (Cerdanya): 1.236 metros
- Intensidad media diaria en 2008: 6.853 vehículos



posterior en tierras asturianas por la autovía Ruta de la Plata (A-66), se ha suavizado con la construcción de varios túneles como El Padrún, Pando, El Negrón y Los Barrios.

Túneles de El Padrún

En 1993 finalizaron en la A-66, entre Mieres y Oviedo, las obras de construcción de los túneles de El Padrún, dos tubos casi gemelos, uno para cada sentido de circulación. La sección tipo cuenta con dos carriles y aceras en ambas márgenes y su perfil longitudinal es el clásico, en rampa del 1% hasta su mitad y pendiente, también del 1% en su otra vertiente.

Durante la construcción, en la que se utilizó el nuevo método austriaco, surgieron numerosos puntos del túnel en los que se producía agua, siempre asociada a una falla o en el muro de los conglomerados calcáreos. Aunque se analizó la posibilidad de no revestir los túneles, al final se hizo con hormigón, entre otras razones porque el ahorro no era tan elevado y se consideró que había claras ventajas y garantías del túnel revestido, sobre todo por las incógnitas del comportamiento a plazo medio o largo.

Se trata de dos tubos de 1.784 metros de longitud, de orientación norte-sur, con una alineación prácticamente recta –salvo una curva a la entrada– en el tubo dirección Mieres, y una alineación divergente en entradas y paralela en la zona central, respecto al otro tubo, el de dirección Oviedo. Ambos se encuentran intercomunicados por cuatro galerías.

Por tanto, el túnel de El Padrún consta de un doble tubo con tráfico unidireccional y dos carriles por

Sobre estas líneas, boca de uno de los túneles de El Padrún y labores de ejecución en uno de sus tubos.

sentido de circulación. Las longitudes de los tubos son de 1.784 metros (sentido Mieres) y 1.723 metros (sentido Oviedo).

Cada uno de los accesos a los túneles cuenta con un paso de mediana que permite realizar cambios de sentido y operaciones de *by-pass* en situaciones excepcionales o controladas por el personal de la explotación. Los pasos de mediana pueden ser utilizados asimismo por los servicios de emergencia para acceder a los subterráneos en situaciones de retenciones en las vías.

Cerca de la entrada del lado Oviedo se encuentra el enlace de Olloniego, en una disposición que permite todos los movimientos de entrada y salida desde y hacia la autopista. En el lado Mieres, a unos 300 metros de la salida, se encuentra el enlace de Cardeo, con una disposición que permite la entrada a la A-66 desde la N-630 hacia Mieres y Oviedo, la salida desde la A-66 sentido Madrid hacia la N-630, pero, en cambio, no permite la salida desde la A-66 en dirección Oviedo. Es un detalle importante en caso de congestión o incidente en el tubo dirección Oviedo.

Los datos de tráfico recogidos en las estaciones de aforos revelan una intensidad media diaria de vehículos relativamente alta (15.788, el 18% de vehí-



Dragados



J.L. Rodríguez

culos pesados) y una clara sobrecarga del túnel en vacaciones y domingos estivales. No se contempla la prohibición de paso de ningún tipo de mercancías peligrosas por los túneles, en los que el límite de velocidad es de 90 km/h. El histórico de accidentes registra un nivel de incidencias escaso, siendo los más frecuentes los referidos a las averías, presencia de ciclistas y peatones y trabajos de mantenimiento.

El mantenimiento y explotación de los túneles se realiza mediante un sistema de conservación integral, que incluye entre sus funciones la atención de incidencias desde el centro de control (situado en el lado sur de los túneles), la reparación y conservación de las instalaciones, y la señalización y atención a los incidentes viarios.

La estructura de los túneles corresponde a tubos revestidos de hormigón, que alojan el equipamiento de seguridad y demás elementos estructurales. Desde su inauguración en 1993 han sufrido una importante reforma de tipo estructural que comenzó en

Perforación del túnel de Barrios y bocas del túnel de El Padrún.



septiembre del año 2000 y finalizó en mayo de 2001. Entre otras actuaciones, se ha acondicionado un sistema de recogida de vertidos y el drenaje general del túnel, al tiempo que se construyeron galerías de evacuación y comunicación entre túneles.

AP-66: 17 kilómetros de túneles

La alternativa al puerto de Pajares entre Asturias y la Meseta es la autopista León-Campomanes o del Huerna (AP-66), inaugurada en agosto de 1983 y abierta al tráfico con todos los túneles de la primera calzada, con circulación en doble sentido. En la actualidad, los siete túneles dobles construidos alcanzan una longitud de 16.927 metros, lo que supone el 10% del recorrido total de la autopista.

Los túneles que se localizan en Asturias son los de Entrerregueras (272 y 280 metros), Pando (1.220 y 1.453 metros), Vegaviesga (230 y 236 metros) y parte de El Negrón (4.100 y 4.144 metros), que continúa en León. En esta provincia castellano-leonesa se encuentran también los de Oblanca (650 y 667 metros), Cosera (234 y 227 metros) y Barrios (1.600 y 1.614 metros).

Los trabajos de desdoblamiento de la autopista continuaron durante los años 1986-1988, y en 1989 estaban ya ejecutados los proyectos de construcción de los túneles de Entrerregueras y Oblanca, como fase inicial para el desdoblamiento de la autopista. En junio de 1990 se abrieron al tráfico el segundo túnel de Entrerregueras y el de Oblanca. Las labores de desdoblamiento del resto de los túneles continuaron de forma ininterrumpida hasta 1997, cuando se concluyeron. Todos estos túneles han sido construidos según el nuevo método austriaco.

Túneles de Pando

Los túneles de Pando, con una longitud de 1.220 metros para la primera calzada y de 1.453 para la segunda, tienen una separación entre ejes que oscila entre 20 metros y 55 metros. Atraviesan el macizo del mismo nombre con un recubrimiento sobre clave de 340 metros. El segundo tubo se puso en servicio en noviembre de 1991.

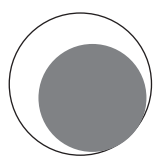
La sección de los túneles es circular, cuenta con dos aceras de 0,8 metros a cada lado y entre ellas



una calzada de 9 metros con dos carriles de 3,5 metros y arcenes de 1,50 y 0,50 metros. El espesor de revestimiento oscila entre 0,3 metros y 1 metro en algunos casos. La sección útil de los túneles de Pando es de 81,6 metros cuadrados, la pendiente es un 1,72% ascendente en el primero de los túneles y descendente al 1,66 % para el segundo.

Labores de ejecución de uno de los tubos de Barrios, que tienen una sección útil de 81,6 metros cuadrados.

Se dispone de un sistema de ventilación longitudinal con sus correspondientes elementos para el control de ambiente, postes SOS con extintor cada 125 metros, circuito cerrado de televisión con una cámara cada 130 metros y cámaras exteriores motorizadas con zoom en las bocas. También cuenta con paneles alfanuméricos de señalización variable



Nuevas medidas de seguridad

En la actualidad se están redactando dos proyectos para adaptar los túneles a las exigencias de seguridad del Real Decreto 635/2006. Abarcan la obra civil relativa a la construcción de apartaderos, galerías de emergencia (vehiculares para servicios de emergencia y peatonales), drenaje separador de líquidos tóxicos e inflamables, etc., así como las instalaciones que velarán por la seguridad de los usuarios en el interior de los subterráneos.

Para los túneles de Pando se han proyectado tres galerías de comunicación entre ambos tubos, dos peatonales y una para vehículos. Las primeras están formadas por un arco de medio punto de 2,05 metros de radio, con centro situado a 1,50 metros de altura desde cota de rasante, con hastiales rectos de 1 metro. La sección se cierra con una solera de 3 metros de ancho interior a cota de rasante. La galería para vehículos tendrá una

sección interior formada por un arco de medio punto de 3,29 metros de radio y con centro situado a 1,5 metros de altura desde la cota de rasante.

La plataforma dispone de 4 metros de ancho y dos aceras de 0,50 metros. Las longitudes de las galerías oscilan entre 30 y 84 metros. Se construirá drenaje separador de líquidos tóxicos e inflamables y un apartadero que coincide con la galería vehicular. También se procederá a adecuar los actuales nichos para los SOS y a ejecutar nuevos nichos para los hidrantes y para las BIE.

Igualmente, se procederá a la adaptación y mejora de las instalaciones existentes y se acometerán otras como red de hidrantes, sistemas de detección de incendios, sistemas de detección de incidencias, alumbrado de emergencia, doble acometida eléctrica, grupos electrógenos, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.



J.I. Rodríguez



y semáforos en los accesos y en el interior. Disponen igualmente de cobertura interior para la telefonía móvil.

Túneles de Barrios

El túnel de Barrios cuenta con dos tubos, el primero de 1.600 metros de longitud y el segundo, de 1.614 metros, que se abrió al tráfico en mayo de 1993. La oscilación de separación en planta varía entre 28 y 45 metros, con un recubrimiento máximo sobre clave de 200 metros y mínimo de 50 metros. Dada la longitud de estos subterráneos carreteros, se les ha dotado de una galería de interconexión ubicada en la mitad de su longitud.

El trazado se ha visto condicionado por la existencia de un coluvión inestable (material que se acumula al pie de una ladera), cercano a sus bocas norte, cuyo pie se ve influenciado por las variaciones del agua embalsada. Los túneles emboquillan al norte del mismo y se separan del borde de la ladera

A caballo entre Asturias y León, la autopista AP-66 tiene a lo largo de su trazado siete túneles dobles, que totalizan casi 17 kilómetros de longitud.

derecha del embalse de Barrios de Luna, pasando a una distancia de 750 metros del estribo de la presa y a 100 metros del borde del deslizamiento. Los materiales atravesados pertenecen al Paleozoico, comprendidos ente el Cámbrico y el Devónico, con una zona uniforme y extensa de 480 metros de materiales pizarrosos.

De sección circular, los túneles disponen de dos aceras de 0,8 metros a cada lado y entre ellas una calzada de 9 metros con dos carriles de 3,5 metros y arcenes de 1,50 metros y 0,50 metros. El espesor de revestimiento oscila entre 0,3 metros y 0,80 metros en algunos casos y la sección útil de los túneles es de 81,6 metros cuadrados. Presentan curva y contra curva, y la pendiente no es uniforme.

Para la adaptación de esta infraestructura a los requisitos mínimos en materia de seguridad, se acometerán dos nuevas galerías para peatones y se ampliará la actual galería existente en el centro del túnel para convertirla en galería para vehículos. Las características geométricas de las mismas son idénticas a las descritas para los túneles de Pando, y su longitud oscila entre 35 y 40 metros.

Se construirá drenaje separador de líquidos tóxicos e inflamables y un apartadero que coincide con la galería para vehículos. También se adecuarán los actuales nichos para los SOS y se ejecutarán nuevos nichos para los hidrantes y para las BIE. Asimismo, se procederá a la adaptación y mejora de las instalaciones existentes y se acometerán otras como red de hidrantes, sistemas de detección de incendios, sistemas de detección de incidencias, alumbrado de emergencia, doble acometida eléctrica, grupos electrógenos, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.



Túneles de El Negrón

Con una longitud de 4.100 metros para la primera calzada y de 4.144 metros para la segunda, están separados en planta entre 32 metros y 65 metros. El recubrimiento máximo sobre clave es de 615 metros. El túnel de la segunda calzada se puso en servicio en junio de 1997.

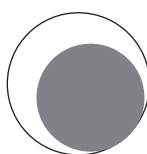
Estos túneles atraviesan el macizo del mismo nombre que constituye la línea divisoria entre Asturias y León. Dada su longitud, están dotados de tres galerías de interconexión de sección circular de radio 1,7 metros con un desarrollo circular de 240 grados que entronca con el piso de hormigón. Las longitudes respectivas de estas galerías son las siguientes: 61,8 metros para la galería norte, 59,5 metros para la central y 59,5 metros para la situada en el sur.

La sección de ambos túneles es idéntica a la de los otros, pero destacan los edificios de ventilación del túnel de la primera calzada, donde se ubican los ventiladores, dos soplantes y uno aspirante por boca, que proporcionan una atmósfera con niveles mínimos de contaminación, conformando una ventilación pseudotransversal. Esto hace que en este túnel la sección útil se vea reducida de 81,6 a 62,8 metros cuadrados al llevar falso techo para la ubicación de los conductos de aire fresco y viciado del sistema de ventilación instalado. Los radios de trazado son muy amplios superando el radio 17.000 y con pendientes ascendente y descendente con un acuerdo vertical en su interior y con valores que no superan el 1,7%

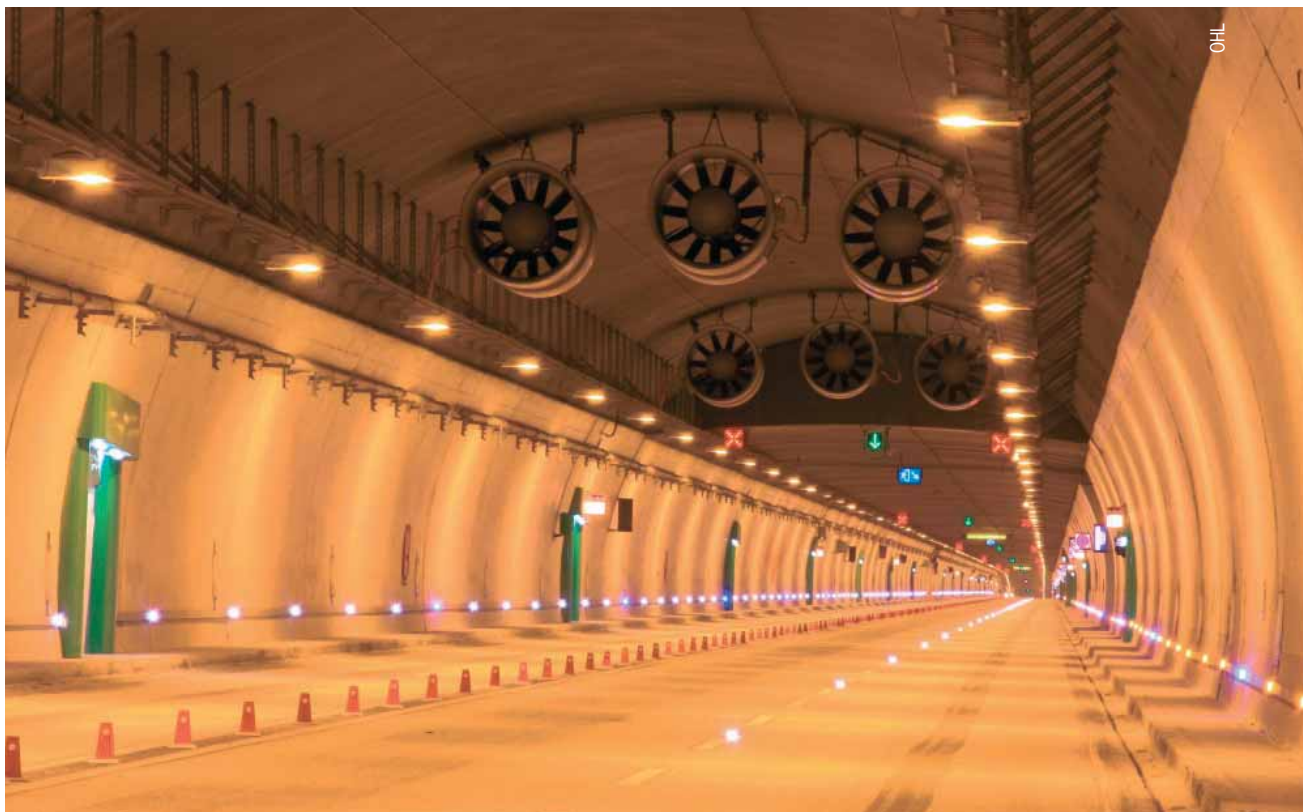
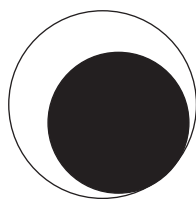
Interior de uno de los tubos del túnel de Barrios, con una longitud de unos 1.600 metros, que se puso en servicio en 1993.

Los edificios frontales de las boquillas de la segunda calzada tienen la misión de servir como centro de servicios para alojar las instalaciones de transformadores y otros, ya que en este caso la ventilación es de tipo longitudinal mediante ventiladores anclados al techo de la bóveda. ■

Más seguridad



Para la adaptación de los túneles de El Negrón a la normativa de seguridad se acometerán ocho nuevas galerías de interconexión, con las mismas características descritas en los túneles anteriores, que se añadirán a las tres actualmente existentes. Se construirá drenaje separador de líquidos tóxicos e inflamables y tres apartaderos que coinciden con las galerías para vehículos. Los apartaderos tendrán una longitud de 24 metros, con dos transiciones de ocho metros y con una altura útil de 5 metros. También se procederá a adecuar los actuales nichos para los postes SOS y a ejecutar nuevos nichos para los hidrantes y para las BIE. Respecto de las instalaciones, se procederá a la adaptación y mejora de las instalaciones existentes y se acometerán otras nuevas, tales como red de hidrantes, sistemas de detección de incendios, sistemas de detección de incidencias, alumbrado de emergencia, doble acometida eléctrica, grupos electrógenos, sistemas de alimentación ininterrumpida, etc.



Los grandes túneles carreteros españoles del siglo XXI

La seguridad, de boca a boca





Izquierda, túnel de Vielha en servicio y túnel de Somport en construcción. Debajo, boca sur del túnel de Somport.

El Ministerio de Fomento está desarrollando un plan para adecuar los túneles de la red estatal a los requisitos de seguridad europeos. De los 405 que componen la red, se actuará sobre los 280 que no cumplen la normativa. La preocupación por la seguridad ha hecho que el diseño, equipamiento e instalaciones de los túneles españoles del siglo XXI esté presidido por esta prioridad. Así se constata en los túneles de Somport, Vielha, Piqueras y el tercero de Guadarrama.

Cuando el 24 de marzo de 1999 un camión se incendió en el interior del túnel del Mont Blanc, provocando la muerte de 39 personas, se constataron muchos fallos. Los graves incidentes ocurridos en éste y en otros túneles de la red transeuropea de carreteras durante finales de los años 90 y principios del año 2000 motivaron la decisión de la UE de adoptar medidas para mejorar su seguridad, que se plasmaron en la Directiva 2004/54/CE “sobre requisitos mínimos de seguridad para túneles de la Red Transeuropea”.

Afecta a todos los túneles de longitud superior a 500 metros de la citada red y establece que se adecuen hasta ofrecer un “nivel de seguridad de servicio y comodidad elevado, uniforme y constante”. Actualmente existen en la red española de carreteras del Estado 405 túneles, que suman una longitud de 214,5 kilómetros y, de aquéllos, 238 pertenecen a la red transeuropea.

Pero es tanto lo que preocupa la seguridad que al hacer la transposición de la directiva europea sobre medidas de seguridad en túneles, recogida en el Real Decreto 635/2006, el Ministerio de Fomento dio un paso más al incluir la totalidad de los túneles de la Red de Carreteras del Estado. En primer lugar, inició el inventario de los túneles existentes para conocer su ubicación, equipamiento, características geométricas y tráfico, al tiempo que comenzaba su inspección para determinar el grado de cumplimiento de la normativa aprobada.

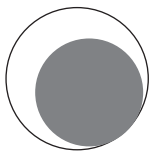
Plan de adecuación de túneles

Fruto de ello ha sido el plan para adecuar los túneles de la red estatal de carreteras a los requisitos mínimos de seguridad establecidos por la nueva normativa, sobre todo en los 280 que no la cumplían.





Las claves de la normativa española



Las medidas de seguridad en los túneles están recogidas en el Real Decreto 635/2006. Éstas son las claves:

Ámbito de aplicación. Todos los túneles de la Red de Carreteras del Estado, sean de la longitud que sean y pertenezcan o no a la Red Transeuropea, lo que supone pasar de los 113 exigidos por la Directiva europea a un total de 405 túneles.

Contenido. Define el equipamiento e instalaciones de seguridad necesarias para cada túnel en función de su longitud, tráfico y tipo de vía.

Plazo. Se establece que los túneles situados en la Red Transeuropea estén adecuados antes del 31 de abril de 2014, y para el resto, el 31 de diciembre de 2019.

Controles. Se establecen los procedimientos para la reapertura y entrada en servicio de túneles, inspecciones periódicas cada 5 años, informes cada 2 años sobre accidentes e incendios y la organización de simulacros periódicos.

Un responsable. Se crea la figura del "responsable de seguridad del túnel" encargado de todas las medidas encaminadas a proteger a los usuarios, al personal que explota el túnel y a la propia infraestructura; entre otras, coordinar los servicios de explotación con los servicios exteriores de emergencia, participar en la organización de los simulacros, en la evaluación de cualquier incidente o accidente significativo y proponer el cierre o restricción al tráfico por razones de seguridad.

Arriba, ejecución de dos de las 19 galerías de evacuación de que consta el túnel de Somport. Debajo, equipamiento del mismo túnel.

Este plan exigirá una inversión de 357 M€ para mejorar el equipamiento de los túneles, sobre todo en salidas de emergencia, instalaciones contraincendios, adecuación de estructura, alumbrado, instalaciones de control y señalización. En la pasada legislatura se acondicionó ya la señalización de 35 túneles, y en la actual está previsto adecuar 48 túneles, con una inversión de 81 M€, quedando para la siguiente legislatura la licitación de los 232 túneles restantes, con una inversión de 276 M€.

A continuación se detallan la historia, los procesos constructivos y las normas de seguridad de los principales túneles carreteros que han entrado en servicio en España en el siglo XXI.

Túnel de Somport

El puerto de Somport, en el Pirineo oscense, es un paso natural utilizado desde la antigüedad. Aunque a principios del siglo XX se construyó un túnel ferroviario que enlazaba por ferrocarril las





ciudades de Jaca y Pau, se clausuró en 1970, quedando la carretera como única vía de comunicación; y con el inconveniente de franquear un puerto, a una cota de 1.640 metros de altitud, que limitaba el paso al tráfico rodado durante los meses invernales.

Ya en 1987 los Gobiernos español y francés incluyeron la construcción de un túnel dentro de la planificación viaria de la frontera pirenaica. Dos años después se constituyó una comisión hispano-francesa para iniciar los estudios previos del proyecto técnico y en 1990 la Unión Europea lo incluyó en el Plan de Infraestructuras dentro del itinerario europeo E-7, integrado en el eje Madrid-Zaragoza-Somport-Pau-Toulouse, y eslabón del eje Valencia-Zaragoza-Somport-Pau-Burdeos. Finalmente, en abril de 1991 se firmó el convenio para la construcción del túnel.

1994: comienzan las obras

En enero de 1994 dieron comienzo las obras. En julio de 1997 los operarios españoles y franceses se encontraron bajo la cordillera pirenaica y, ya en el año 2000, se emprendieron los trabajos de equipamiento del túnel, aunque la obra se ralentizó debido a las revisiones de seguridad llevadas a cabo tras los accidentes registrados en varios túneles alpinos en 1999 y 2000.

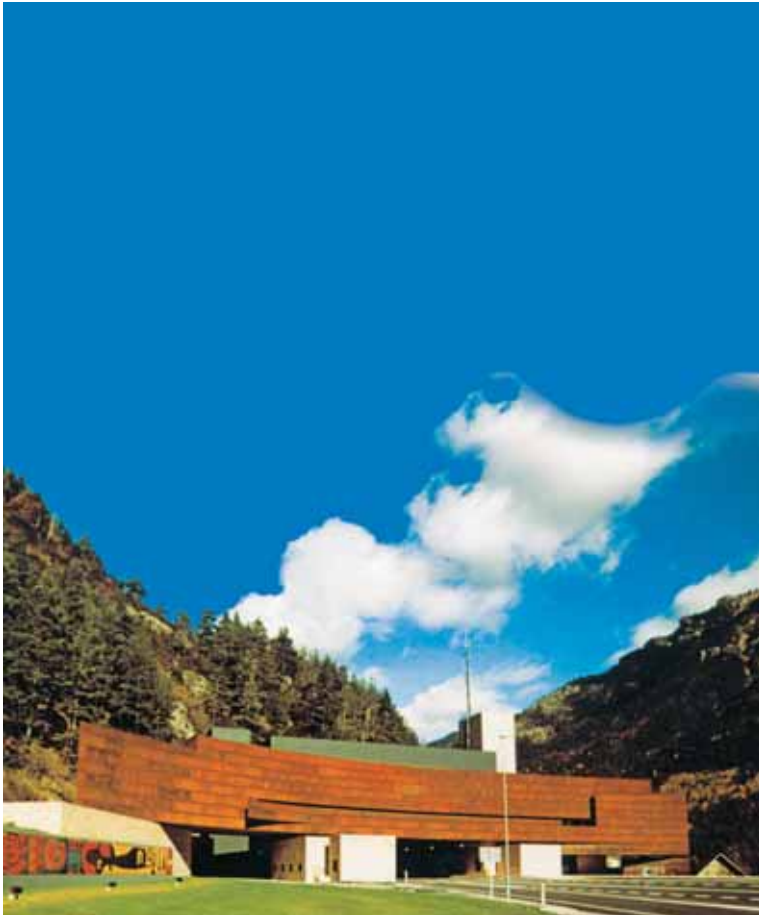
El túnel de Somport, de 8,6 kilómetros de longitud, tiene una sección libre de 78 m², con una anchura de 10,5 metros.

Así, tras ocho años de obras, en las que no se ahorraron esfuerzos para diseñar una infraestructura que evitara accidentes y consecuencias tan dramáticas como los registradas en Montblanc (39 muertos), Tauern y San Gotardo, el túnel de Somport fue inaugurado el 17 de enero de 2003.

Esta carretera subterránea, alternativa a la circulación de vehículos por los pasos de Irún y La Junquera, ha permitido rebajar la cota del puerto desde 1.632 a 1.183 metros, con la consiguiente mejora en la validez invernal, además de acortar los tiempos de recorrido de los vehículos pesados en 25 minutos. Se trata de un túnel de 8,6 kilómetros de longitud, de los que 5.758 se horadaron en territorio español, construido utilizando el nuevo método austriaco, simultaneándose la excavación en cinco frentes: en la boca francesa, en la española, dos intermedios y un quinto mediante la construcción de una galería piloto.

La superficie útil de la sección transversal del túnel es de 78 metros cuadrados, divididos por un falso techo curvo de 64 metros cuadrados, dedicados a la circulación de los usuarios; y otros 14 metros cuadrados de la parte superior para el movimiento del aire de ventilación.

El ancho del túnel es de 10,5 metros, divididos en dos carriles de 3,5 metros que están separados por una mediana de un metro, con bandas laterales de 1,25 metros y dos aceras de 0,75 metros.



Preocupación por la seguridad

Las instalaciones de seguridad y el equipamiento denotaron la preocupación por la seguridad. El túnel cuenta con 86 nichos de seguridad y contraincendios, situados cada 200 metros y enfrentados. Los nichos y refugios cuentan con postes SOS para facilitar la llamada de auxilio en caso de incidente, así como extintores.

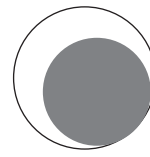
Cuenta con 19 galerías de evacuación cada 400 metros, para lo que se aprovechó la existencia y proximidad del túnel ferroviario que discurre casi paralelo. Dieciséis de ellas están conectadas al túnel ferroviario y las otras dos al exterior, con el fin de posibilitar la evacuación de emergencia de los usuarios en caso de siniestro.

Por otro lado, se procedió a una iluminación especial en las puertas de los refugios y en las aceras de sus tramos inmediatos para hacerlos más visibles en caso de humo denso y se incorporó el denominado “hilo de Ariadna”, un sistema de seguridad consistente en una barandilla colocada en el hastial donde se ubican los refugios, que sirve de guía visual y táctil para salir del túnel cuando no hay visibilidad.

El túnel de Somport, con una boca en España y otra en Francia, se excavó a partir de cinco frentes de ataque siguiendo el nuevo método austriaco

Boca sur del túnel de Somport, en el lado español.

Edificios auxiliares

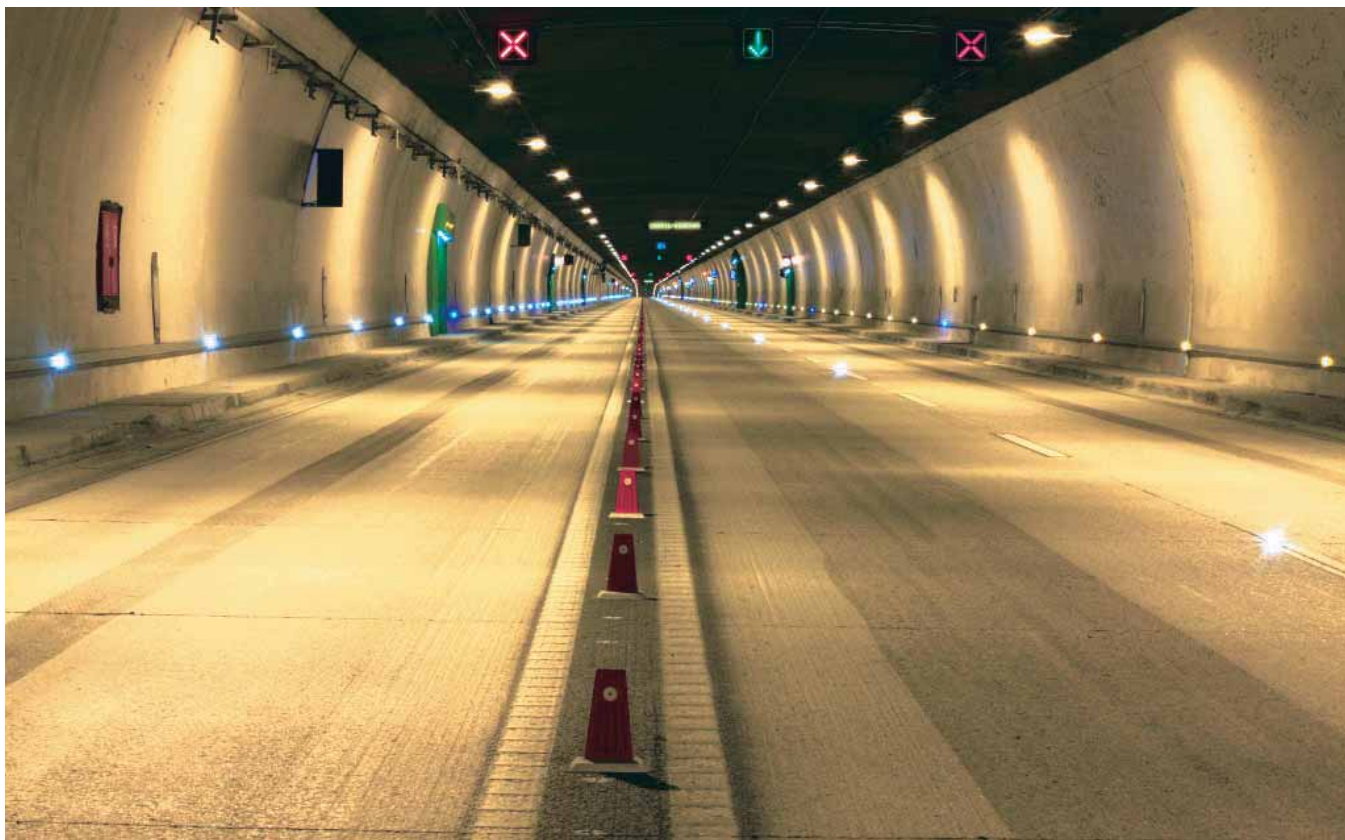


Para dar servicio al túnel de Vielha–Juan Carlos I se han construido tres edificios funcionales de arquitectura singular, integrados en el entorno y el paisaje propio del valle de Arán. El primero de ellos es la estación de ventilación en la boca sur. La estación de ventilación de la boca norte se ha integrado en el espacio que queda entre el estribo del puente al borde del barranco del Port y la pared vertical de roca del emboquille del túnel. En su interior se han instalado la sala de ventiladores del túnel y conductos, las salas de media y baja tensión, la sala del grupo electrógeno, aseos, la sala de bombas de presión de la red de agua contra incendios y un depósito de agua de 120 m³. El tercero de los edificios es el de explotación y mantenimiento y sirve de centro de control de los dos túneles, el viejo y el nuevo, y como base para los equipos de explotación y mantenimiento. Tiene una superficie total construida de 2.810,80 m² y se ha integrado en el entorno con edificaciones en dos plataformas a diferentes alturas paralelas a las curvas de nivel.

Asimismo se implantó un dispositivo luminoso, mediante luces azules situadas cada 100 metros, que permite a los conductores percibirse de la distancia que les separa del vehículo precedente. El sistema de iluminación interior está regulado para que funcione dependiendo de si hay pleno sol, el día está cubierto, o si es de día o de noche. Además, cuenta con una iluminación de refuerzo durante el día para evitar deslumbramientos en las zonas de entrada del túnel y lograr la adaptación progresiva a la iluminación interior.

Para conseguir que el interior esté bien ventilado, se dispone de un sistema que impulsa aire fresco al interior del túnel a través de los conductos que discurren por el falso techo y que evacuan el aire viciado al exterior por las bocas. En caso de incendio se cierran las trampillas de la zona donde se ha localizado la emergencia, permaneciendo sólo abiertas en los 600 metros más próximos al foco con el fin de extraer el humo a través del falso techo.

Se ha dotado a la calzada de una mediana central de un metro de ancho para conseguir una mayor operatividad y permitir el cruce de vehículos aunque haya alguno parado. En cuanto a la señalización vertical, cuenta con semáforos cada 200 metros en el interior del túnel y en las bocas, paneles de mensaje variable y paneles indicativos de nichos, refugios y galerías de retorno.



OHL

Cámaras cada 100 metros

El circuito cerrado de televisión del túnel tiene como objetivo visionar el subterráneo en toda su longitud, por lo que se instalaron cámaras cada 100 metros, que se monitorizan en la sala de control central situada en España; desde allí se envían al centro de control del lado francés todas las imágenes que recojan las cámaras situadas en su parte. El circuito de televisión cuenta, además, con un sistema de detección automática de incidentes para proporcionar al centro de control la información y alarma de todo incidente que se produzca.

La red de telefonía conecta las salas interiores del túnel con los edificios de los centros de control de ambas bocas. Además, se dispone de teléfonos de marcación directa para comunicar con los servi-

El túnel de Vielha, de 5.230 metros de longitud, está equipado con los más modernos sistemas de seguridad. Debajo, una de las puertas de emergencia del túnel.

cios de seguridad, bomberos y ambulancias. A esto hay que añadir un sistema de radiocomunicaciones al servicio del personal de explotación y de los equipos de emergencia.

Las estaciones de bombeo, situadas en ambas bocas, garantizan el suministro de agua contra incendios, y para ello se dispone de un depósito de 125 metros cúbicos e hidrantes situados en un lateral de los nichos, cada 200 metros.

Para el control de las distintas instalaciones y equipamientos se ha implantado un sistema de Gestión Técnica Centralizada que actúa sobre el conjunto y que permite, por ejemplo, proponer al operador una secuencia predefinida ante una situación de emergencia. La sala de control se encuentra en la boca del túnel del lado español, aunque en el lado francés existe otra para tareas de observación y seguimiento.



OHL

Túnel de Vielha

El túnel de Vielha se encuentra situado en la provincia de Lleida, en la carretera N-230, de Tortosa a Francia por el valle de Arán, entre las poblaciones de Vilaller (boca sur) y Vielha (boca norte). Aunque a lo largo de la historia del viejo túnel de 1948 se fueron realizando progresivamente mejoras en sus instalaciones, incluidos sistemas de ventilación, telefonía móvil, postes SOS, circuito cerrado de TV, sistemas de detección y extinción de incendios, etc., resultaba imposible seguir progresando en otras mejoras de diseño y capacidad.



diana de 0,50 metros delimitada por lengüetas de goma rebasables. Dispone de arcones de 0,50 metros y aceras de 1,00 metros.

El trazado del nuevo túnel, tanto en planta como en alzado, ha mantenido prácticamente el paralelismo al del viejo túnel con el fin de aprovechar la excavación de la galería de ventilación del viejo túnel, así como para disponer galerías de conexión entre ambos, repartidas cada 400 metros en toda la longitud del trazado.

Existen dos enlaces que, a distinto nivel, conectan el viejo túnel con el nuevo en ambas bocas. En el primero, en la boca sur, el tronco principal entra en la formación montañosa a unos 170 metros a la derecha del viejo túnel. Se dispone de un ramal de salida del tronco hacia el viejo túnel, y un ramal de incorporación de las mercancías peligrosas desde el viejo túnel al tronco de la CN-230. Entre estos ejes y el tronco se dispone de dos áreas de cambio de cadenas para el tronco principal, consistentes en plataformas de 5 metros con hilo radiante bajo las mismas para prevenir el hielo.

La boca norte (lado Vielha) se dispone coincidiendo con la galería de ventilación del viejo túnel, y a continuación se encuentra una estructura de 15 metros de túnel artificial que separa el edificio de ventilación de la ladera escarpada de la montaña, continúa con la estructura del *plenum* de ventilación del túnel, y por último, el viaducto de 100 metros para salvar el barranco del Port.

El procedimiento constructivo utilizado en el túnel de Vielha sigue los principios básicos del nuevo mé-

todo austriaco, que supone la colocación de sostenimientos ligeros y flexibles para aprovechar la capacidad autoportante de la roca, compatibilizando la excavación con la auscultación de los tramos de túnel ejecutados, de forma que asegure la idoneidad de los sostenimientos instalados.

Seguridad

De acuerdo con la normativa europea, se han dispuesto recintos de emergencia (nichos de seguridad y contraincendios) cada 200 metros y enfrentados entre sí. Igualmente, se han construido 12 refugios situados cada 400 metros, coincidentes con las galerías de conexión con el túnel actual. Además, cada 550 metros se han habilitado apartaderos, cuatro en cada lado, de 37,50 metros de longitud.

Desde cada una de las bocas se ventila aproxi-

Por ello, el Ministerio de Fomento promovió la construcción de un segundo túnel paralelo al anterior, con la idea de que el antiguo quedara destinado para el paso de mercancías peligrosas, transportes especiales y acceso al nuevo túnel por las galerías de conexión de los servicios de mantenimiento y emergencia. El Ministerio de Fomento abrió el túnel al tráfico el 10 de diciembre de 2007, tras una inversión de algo más de 200,7 M€.

Tres carriles

La sección del nuevo túnel de Vielha-Juan Carlos I, de 5.230 metros de longitud, consta de tres carriles de 3,50 metros cada uno, de los que dos están destinados al tráfico en sentido Lleida –con una pendiente del 4,57%– y el otro, en sentido Francia. Los sentidos de circulación están separados por una me-

Arriba, el centro de control del túnel de Vielha gestiona, activa y controla todas las medidas a realizar en el subterráneo. Debajo, boca del mismo túnel.

El nuevo túnel de Vielha se construyó en paralelo al antiguo, ahora destinado para transportes especiales y como acceso de los servicios de mantenimiento y emergencia



madamente la mitad de la longitud del túnel. Cada boca cuenta con dos conductos de ventilación situados sobre la losa del falso techo del túnel. Se trata de un sistema de ventilación semi-transversal reversible, que permite confinar un incendio en el interior del túnel con extracción en la zona próxima al incendio e impulsión en las zonas anexas para crear una sobrepresión en ellas.

El túnel dispone de un sistema lineal de detección de incendios y las señales se envían al centro de control del túnel, donde se gestionan, activan y controlan las medidas de intervención a realizar en cada situación. El sistema de detección de incendios se complementa con pulsadores de disparo y de bloqueo de la extinción, sirenas de pre-alarma de activación de la extinción y letreros luminosos de extinción disparada.

Para la extinción del fuego se dispone de un sistema de boquillas colocadas en el hastial derecho del túnel capaz de cubrir toda la superficie del mismo, dividida en tramos de 50 metros cada uno, controlados por una válvula de diluvio accionada a distancia desde la G.T.C. (Gestión Técnica Centralizada). Se cuenta, además, con un camión de bomberos para uso exclusivo del túnel, que cuenta con apartador de obstáculos, cámaras de infrarrojos para visión nocturna, resiste temperaturas de hasta 400° C y está dotado de sistema de aire autónomo, tanto para los usuarios como para el motor.



El túnel de Vielha se ejecutó siguiendo el sistema del nuevo método austriaco.

En cuanto a la señalización, tanto los semáforos como las luminosas fijas y las señales de tráfico están dotados de tecnología LED. Dispone de paneles gráficos y de mensaje variable con señalización acústica, sistemas de control de gálibo mediante barrera de infrarrojos instalada en columnas y mediante espiras inductivas bajo el pavimento. Además, está equipado con un sistema de fibra óptica para la transmisión de señales de control de los distintos elementos.

Cuenta con señales luminosas que indican la ubicación de las salidas de emergencia por las galerías de conexión, de preseñalización de las salidas del túnel de posicionamiento de los apartaderos y de preseñalización de los apartaderos. Y resina fotoluminiscente para señalar las puertas de acceso al re-



fugio, a través de los cuales se tendrá acceso a las vías de evacuación por las galerías.

El túnel dispone de un circuito cerrado de TV y para las radiocomunicaciones se ha instalado un sistema de cable radiante con tres estaciones de radio y redundancia de señal en túnel que garantiza la comunicación, incluso si el cable se daña. Está equipado igualmente con una red de telefonía para facilitar el mantenimiento y explotación del túnel, al tiempo que se sirve para dar soporte de auxilio y socorro a los usuarios del túnel.

En refugios, nichos y apartaderos se han instalado postes SOS y puestos de videoconferencia, extintores y pulsador de alarma de incendios. Dispone de un sistema de megafonía para retransmitir mensajes de voz desde el centro de control con información de ayuda, aviso y precaución a los usuarios de esta moderna infraestructura subterránea.

El túnel de Vielha dispone también de un sistema que realiza una detección automática de incidencias a través del procesamiento de la señal de las cámaras del circuito cerrado de televisión. Una vez se ha producido una incidencia, el sistema guía al controlador, ayudándole a tomar la mejor decisión posible para subsanarla.

Boca sur del túnel de Piqueras, en el lado soriano, puesto en servicio en octubre de 2008.

Túnel de Piqueras

Aunque ya a finales de los años cuarenta del siglo pasado se planteó la posibilidad de horadar el macizo montañoso que separa la provincia de Soria y La Rioja para dar continuidad a la carretera CN-111, habría que esperar 60 años para materializar la idea. El 3 de octubre de 2008 el Ministerio de Fomento inauguró el túnel de Piqueras, una galería de 2.444 metros de longitud que salva en gran medida el viejo puerto de Piqueras, un auténtico escollo en época invernal. La carretera antigua alcanza una altitud máxima de 1.710 metros y los 12 kilómetros que ahora evita el túnel discurren por un trazado muy sinuoso.

El nuevo trazado, que discurre por el municipio soriano de La Póveda y el riojano de Lumberas, presenta unas notables condiciones de calidad, seguridad y confort, a lo que hay que añadir un importante ahorro de tiempo, que se estima en unos 10 minutos para los turistas y de 20 minutos para los vehículos pesados.

El tramo completo, con una inversión de 75.368.738€, tiene una longitud total de 4.680 me-



tros, aproximadamente, con una pendiente máxima del 3,21% en el exterior y del 1,08% en el túnel, con una velocidad específica de 100 km/h.

Viaducto hacia el túnel

Los trabajos se iniciaron en el kilómetro 260 y, apenas a 50 metros, el trazado se desvía de la carretera para entrar en el viaducto del Barranco Hondo, de 210 metros de longitud; a unos 500 metros del viaducto aparece la boca sur del túnel, situada en el lado soriano, en una zona de alto valor ambiental, pues está catalogada como Zona de Especial Protección de Aves (ZEPA). En el lado sur se sitúa también el centro de control, cuya misión principal es la gestión del tráfico, tanto en situación normal como de emergencia.

Pero sin duda, la estructura principal del tramo son los 2.444 metros del túnel de Piqueras, con una sección de excavación de aproximadamen-

El túnel de Piqueras presenta una sección libre de 80 m², con una anchura de 12 metros donde se insertan dos carriles.

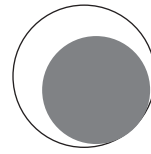
El túnel de Piqueras incluye una galería de evacuación paralela con amplitud suficiente para el tránsito de vehículos de emergencia

te unos 100 m², que se reducen a unos 80 m² de sección libre, una vez hormigonado y con la rodadura concluida. Tiene una anchura de 12 metros, dispone de dos carriles de 3,5 metros cada uno, dos arce- nes de 1 metro y una mediana, también de 1 metro, además de las aceras. El gálibo mínimo a borde de arcén es de 5 metros. Las instalaciones y equipamientos de seguridad son, entre otros: sistemas de evacuación de vertidos y filtraciones, postes SOS, dispositivos de detección y extinción de incendios, ventilación, iluminación y circuito cerrado de TV.

El método de excavación empleado ha sido en su mayor parte el tradicional de perforación y voladura, habiéndose utilizado más de 200.000 kilogramos de explosivos para el arranque del material. En zonas de terreno blando se recurrió a métodos de arranque mecánicos. Para el sostenimiento se han utilizado bulones, hormigón proyectado y cerchas metálicas en zonas de calidad geotécnica baja, todo ello de acuerdo a las premisas del nuevo método austriaco de construcción de túneles. Los terrenos atravesados han sido areniscas y limolitas en su mayor parte, salvo unos 400 metros en la parte de La Rioja donde el material estaba compuesto por lutitas y arcillas.



Galería de evacuación



La galería de emergencia del túnel de Piqueras conecta con los refugios presurizados existentes en el túnel principal y sirve como medio de evacuación. Para ello se ha dispuesto un trazado paralelo al túnel principal, con una separación de 35 metros y una longitud total de 2.505 metros. La sección libre de la galería es de 21,32 m², con una anchura útil de 4,60 metros y un marco de gálibo de 3,50 x 3,50 metros, que permite la circulación de vehículos especiales de emergencia. Conecta transversalmente con los refugios presurizados existentes en el túnel principal a través de galerías de conexión de 16 metros de longitud. Además, se ha duplicado el número de salidas de emergencia reduciendo la distancia entre las mismas a 200 metros. Para ello se han diseñado seis nuevas cámaras de presurización con sus galerías de conexión correspondientes.



Paraje de alto valor ambiental

La boca norte del túnel corresponde al lado de La Rioja y se ubica también en un paraje de alto valor ambiental, dentro del parque natural Sierra de Cebollera, en la comarca de Tierra de Cameros.

Las instalaciones y equipamientos de seguridad previstos inicialmente contaban, entre otros, con sistemas de evacuación de vertidos y filtraciones, postes SOS, dispositivos de detección y extinción de incendios, ventilación, iluminación y circuito cerrado de televisión. Sin embargo, la transposición de una directiva europea, el Real Decreto 635/2006, de 27 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en túneles de carreteras del Estado, obligó a reforzar los dispositivos ya existentes y a crear otros nuevos. Ello implicó, entre otros aspectos, la cons-

Arriba, galería de evacuación del túnel en la fase final de ejecución. Debajo, vista de la boca del túnel de Piqueras y de la sinuosa carretera de 12 kilómetros a la que ha relegado.

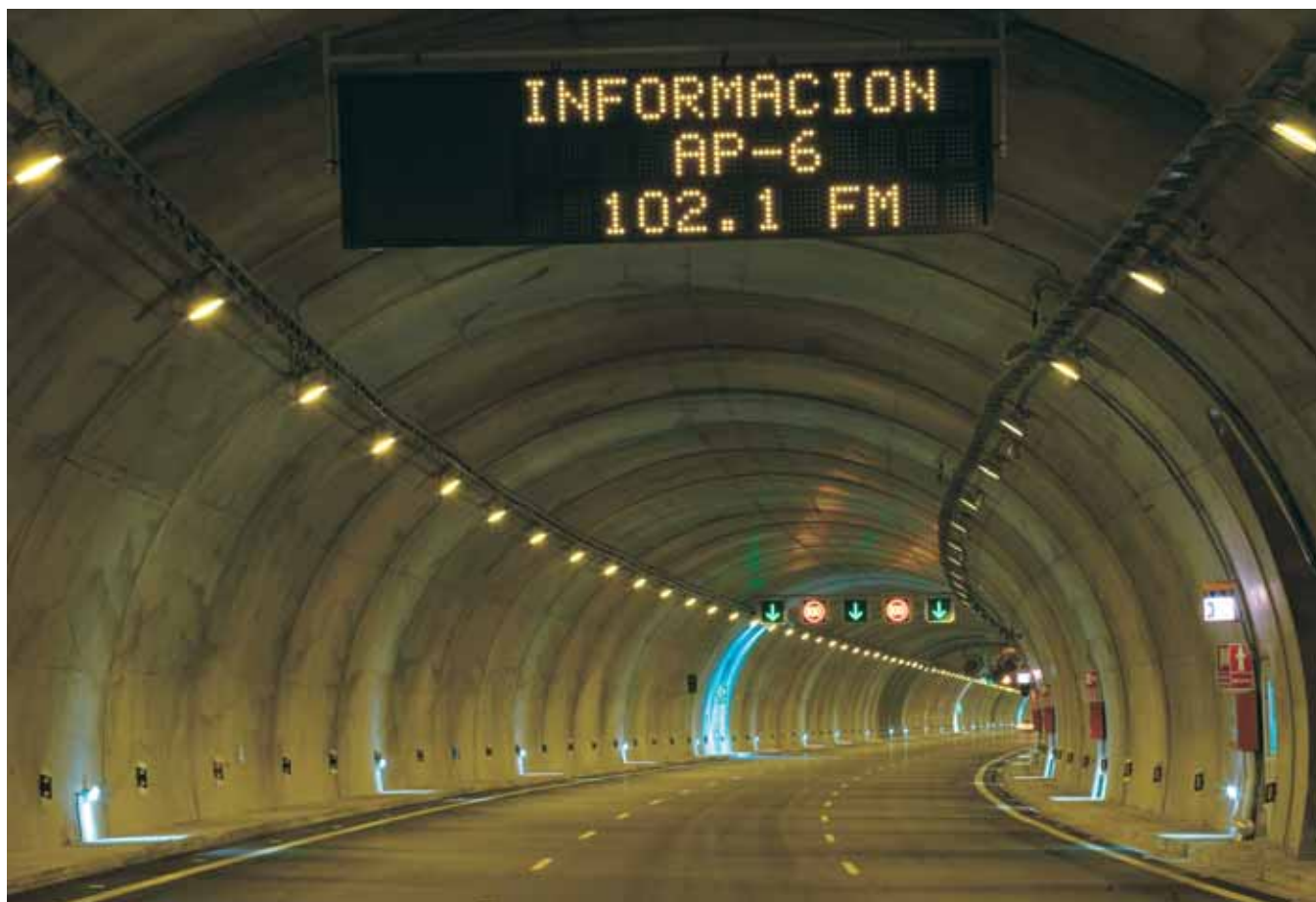
trucción de una galería de evacuación paralela al túnel principal, con amplitud suficiente para el tránsito de personas y vehículos de emergencia, equipada con dispositivos de iluminación, ventilación, detectores de movimiento y circuito cerrado de televisión, entre otros.

Precisamente, para suministrar la energía necesaria a todos los equipos instalados, se construyó una línea eléctrica de 45 kilovoltios y 23 kilómetros de longitud, que parte del parque eólico de Portelrubio y llega a la subestación situada en la explanada próxima a la boca sur del túnel. La línea eléctrica necesitó una Declaración de Impacto Ambiental independiente al resto de la obra, además de un estudio arqueológico de todo su trazado y otras actuaciones ambientales significativas, como la presencia de unos 4.700 dispositivos salva-pájaros, que previenen posibles impactos de las aves contra el tendido.

Instalaciones de seguridad

Cuenta con un sistema de iluminación normal y de emergencia para guiado, señalización de emergencia (señales fotoluminiscentes), ventilación de servicio en galería, así como presurización en refugios, circuito cerrado de TV y megafonía, puertas de acceso a la galería monitorizadas desde el centro de control de túnel, así como postes SOS y bocas de incendio equipadas en cada refugio.

Dispone, además, de un sistema de Detección Automática de Incidentes (DAI), un sistema de radiocomunicaciones en el interior del túnel y unas barreras exteriores para el cierre efectivo de en-



trada al túnel en caso de emergencia. De igual manera, se han adecuado los sistemas de señalización aumentando el número de captafaros y de hitos de arista en el túnel, nuevos carteles de aproximación, paneles aspa-flecha, paneles de velocidad variable, así como la inclusión de zonas gráficas en los paneles de mensaje variable. También se ha dotado a las marcas viales continuas del interior del túnel de rugosidad a base de resaltos que avisen al conductor de un posible cambio involuntario de carril.

El tercer túnel de Guadarrama ha venido a solucionar los problemas de congestión de la AP-6 en la zona de la sierra entre Madrid y Segovia. Debajo, galería auxiliar de seguridad del túnel.



Tercer túnel de Guadarrama

Después de tres años de obras, el Ministerio de Fomento inauguró en marzo de 2007 el tercer túnel de la autopista AP-6, que pasa bajo la sierra de Guadarrama. Se solventaban así los problemas que afectan a una de las principales vías de acceso a Madrid desde Castilla y León a través de dos tubos, el primero de los cuales se remonta a 1963.

A los dos túneles unidireccionales de 2.870 metros y 3.340 metros, respectivamente, se ha añadido el tercero, inaugurado a finales de marzo de 2007, con una longitud total de 3.148 metros. De esta manera se ha podido proceder a la remodelación del túnel I, inaugurado en 1963, y así convertirlo en reversible para usarlo en uno u otro sentido dependiendo de las necesidades del tráfico y para acometer las operaciones de mantenimiento.

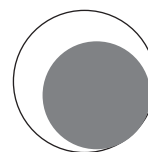
Razones para el túnel número 3

Los importantes crecimientos porcentuales del tráfico desde finales de los años 80 en la autopista Villalba-Adanero dieron lugar a graves problemas de congestión a finales de los años 90, sobre todo en el primer tramo de la autopista AP-6, entre Villalba y el enlace de San Rafael, en el que se incluyen los túneles de Guadarrama.

Esta situación motivó que Iberpistas, concesionaria de la autopista AP-6, estudiara varias alterna-



Principales instalaciones de Guadarrama III



Ventilación. De tipo longitudinal, para asegurar el mantenimiento de la calidad del aire y el control de los humos en caso de incendio. Cuenta con sensores de opacidad y de concentración de emisiones.

Detección de incendios. Cable termosensible, complementado por un sistema de Detección Automática de Incidentes y por el nivel de vigilancia permanente de los túneles.

Extinción de incendios. Red de distribución de agua para uso de bomberos, hidrantes cada 125 metros, grupo de presión, aljibe en la boca norte de 150 m³ y extintores portátiles en los puestos SOS del túnel 3, en las galerías de emergencia y en los cuartos técnicos.

Iluminación. Además de la iluminación de servicio, cuenta con un sistema de emergencia y guiado, auxiliado por un sistema de control mediante sensores de luminosidad.

Señalización variable. Consta de paneles de mensaje variable y semáforos en los accesos y a la salida del nuevo túnel que, junto con el sistema de megafonía, permite informar sobre incidencias.

Circuito cerrado de TV, con cámaras cada 125 metros asociadas a los puestos de comunicación SOS, incluyendo la instalación de un sistema de Detección Automática de Incidentes mediante tratamiento de señal de vídeo.

Puestos SOS. Cada 125 metros, para la comunicación entre el usuario con el centro de control. Tienen asociada una cámara TV, y el sistema de megafonía.

Centro de control. Todos los sistemas están integrados en el centro de control.

tivas para la ampliación de la autovía A-6, entre ellas la construcción de un tercer túnel bajo la sierra de Guadarrama. Esto implicaba la ejecución de unos nuevos accesos independientes al nuevo túnel y la consideración de explotar la nueva infraestructura aprovechando la presencia de tres calzadas en un tramo de unos 13 kilómetros, de manera que la que soportaba el tráfico en sentido Madrid (el túnel 1, inaugurado en 1963) fuera acondicionada para su funcionamiento reversible y preferentemente para vehículos ligeros, según la demanda, y fuera sustituido por el nuevo túnel para el tráfico con dirección a la capital. Posteriormente, y a raíz de la reforma normativa europea, el proyecto de construcción del túnel sirvió para diseñar un proyecto de seguridad integral para los tres túneles.

Imagen de la construcción del túnel, ejecutado según el nuevo método austriaco, y de una de las bocas durante la fase de obras.



Adjudicada la nueva concesión a Iberpistas, y tras un largo proceso de tramitación ambiental, las obras de la ampliación de las autovía A-6 y la autopista AP-6 se iniciaron en el verano de 2004, culminándose la ampliación durante el año 2007.

La operación con tres calzadas sólo está prevista en casos de necesidad, y únicamente para el tráfico de vehículos ligeros. Además, el túnel 1 sirve como galería de evacuación y de acceso de vehículos de emergencia en caso de accidente, así como para las operaciones rutinarias de mantenimiento, ya que está conectado con el nuevo túnel, y a través de éste con el túnel 2, por un sistema de galerías.

El nuevo túnel se emboquilla al oeste de los túneles actuales, con un trazado sensiblemente paralelo al túnel 2 y cruzando sobre el túnel 1 a unos 250 metros. A partir de aquí discurre prácticamente equidistante en planta y alzado entre los túneles existentes, lo que posibilita la disposición alternada de galerías auxiliares de seguridad de vehículos y peatonales.

El túnel está dotado de un sistema de drenaje de calzada mediante caz de recogida de vertidos con arquetas-sifón bajo arcén y drenes puntuales, para evitar la propagación de incendios a través de vertidos inflamables. Bajo las aceras se disponen además las canalizaciones de desagüe del sistema de drenaje del túnel, alimentación de energía,

Vista de la boca sur del tercer túnel de Guadarrama, situada a pocos metros de la torre de ventilación y de la boca del segundo túnel.

El trazado del tercer túnel estuvo condicionado por la necesidad de conectarlo con los ya existentes a través de galerías

comunicaciones y red de agua a presión para el sistema de extinción de incendios, todos registrables con arquetas en la propia acera. Para la alimentación local de equipos e iluminación se han diseñado bandejas portacables en el tercio superior de la sección.

Así se ejecutó

En la ejecución de los emboquilles se dispusieron paraguas pesados de micropilotes para proteger la excavación en la zona más delicada. La excavación del túnel se proyectó y se ha ejecutado mediante perforación y voladura, siguiendo el procedimiento del nuevo método austriaco en avance y destroza.

A lo largo del trazado del nuevo túnel se localizaron algunos puntos conflictivos, como son el cruce bajo la N-VI y sobre el túnel 1 en la boca sur, y el cruce bajo el ferrocarril y bajo la calzada existente sentido Madrid en la boca norte, con recubrimientos de entre 10 y 15 metros, que se han resuelto mediante la disposición de secciones singulares de paso, reforzadas mediante paraguas de micropilotes, ejecutados desde el interior del nuevo túnel excepto en el caso del paso bajo la calzada de la AP-6 sentido Madrid, donde se ejecutó un abanico de micropilotes, con longitudes de entre 25 y 40 metros y espaciados algo menos de 1 metro entre sí.

La auscultación de la excavación de los emboquilles se llevó a cabo mediante hitos de nivelación topográfica, dianas de auscultación en los taludes frontales e inclinómetros, detectándose movimientos máximos absolutos de unos 20 milímetros. En el interior del túnel se instalaron estaciones de con-



vergencia, cada 5 metros en las zonas de emboquille y cada 25 metros en el resto del túnel, con mediciones diarias hasta su estabilización y posteriormente controles mensuales, con movimientos nunca superiores a los 5 milímetros.

Sistema de galerías

La dotación de instalaciones de seguridad en los tres túneles de Guadarrama se adapta a los requisitos mínimos exigidos por la normativa. La elección del nuevo trazado estuvo condicionada por la necesidad de conectarlo con los ya existentes para dotarlo de un sistema de galerías de seguridad que interconecten los tres tubos, considerando longitudes y pendientes razonables. Se proyectó un sistema de trece galerías auxiliares de seguridad que unen el nuevo túnel 3 con los túneles 1 y 2 y una más que une los dos túneles antiguos. El conjunto de galerías suma una longitud total de 2.211 metros, siendo la distancia media entre salidas de emergencia de menos de 190 metros en el nuevo túnel, de 360 metros en el primer túnel y de 380 metros en el segundo. Las galerías de vehículos (de servicio y emergencia) y peatonales se alternan en los túneles 1 y 2, comenzando por una galería de vehículos a partir del em-

Arriba, carámbanos de hielo surgidos durante la construcción del tercer túnel. Debajo, ejecución de una galería de seguridad.

boquille sur, totalizando siete de cada tipo. Esto da lugar a que en el túnel 3 la alternancia sea por parejas de tipos de galerías.

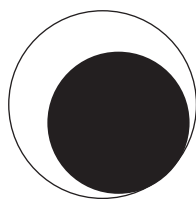
La sección tipo para las galerías es abovedada, de 5 metros entre paramentos y unos 3,5 metros de gálibo para las de vehículos, y de 2,3 metros entre paramentos y un gálibo de unos 2,6 metros para las peatonales. Además, todas las galerías están dotadas de vestíbulo de acceso, una estación de emergencia SOS en cada extremo, iluminación de emergencia, presurización para el control de entrada de humos en caso de incendio y control de accesos mediante detectores de presencia.

Cuenta con cuatro apartaderos, dos de ellos situados frente a los accesos a las galerías de conexión, que coinciden con los centros de transforma-

ción ubicados en el interior del túnel, lo que implica grandes ventajas para las operaciones de conservación y mantenimiento, y proporciona una seguridad adicional en caso de averías y retirada de vehículos.

En el túnel 2 existe también un apartadero en la zona central del túnel, coincidiendo con el acceso a la estación central de ventilación. Los apartaderos van dotados de detección de presencia, un puesto de emergencia SOS, y una cámara de CCTV móvil. ■





Túnel de Cercanías entre Atocha y Chamartín

En el corazón de la capital

Las estaciones de Atocha y Chamartín quedaron unidas el 9 julio de 2008 a través de un túnel ferroviario de 8,4 kilómetros de longitud que permite recorrer el eje urbano de Madrid sin necesidad de transbordar. Con la reciente entrada en servicio de la estación de Sol, el servicio de Cercanías puede acceder directamente al corazón de la capital.





PEPA MARTÍN

El objetivo para el que se proyectó en los años 90 el nuevo túnel de Cercanías entre las estaciones madrileñas de Chamartín y Atocha, con una inversión total de 550 M€, era resolver el problema de la capacidad limitada del llamado *túnel de la risa*, junto al que discurre en paralelo, y cuya construcción data de la etapa de Indalecio Prieto al frente del Ministerio de Fomento, en el año 1933.

La Guerra Civil española y la crisis económica de la posguerra impidieron retomar la construcción de ese túnel urbano, que empezó a la vez que se diseñaba la estación de Chamartín como alternativa a la estación del Norte, pero que no culminó hasta 1967. Su apertura sirvió para dar servicio a los enlaces ferroviarios entre Madrid y ciudades como Zaragoza, Burgos e Irún.

Posteriormente, con la creación de la red de Cercanías madrileña, el *túnel de la risa* acogió los tráfico de las líneas creadas, aumentando año tras año el volumen de trenes que por él circulaban, llegando al borde del colapso. Para evitarlo se proyectó la construcción de este segundo túnel por el que actualmente circulan desde su entrada en funcionamiento en julio de 2008 los trenes de las líneas C-2, C-7, C-8a, C-8b y C-10, además de algunos de media distancia regionales y de largo recorrido.

Con este nuevo túnel, con estaciones intermedias en Puerta del Sol y Nuevos Ministerios, no sólo se han solucionado los problemas de movilidad y funcionalidad de la estación de Atocha —donde confluyen 560 trenes diarios que transportan a casi medio millón de personas—, sino que se ha producido una importante evolución en el servicio de Cercanías de Madrid que utilizan diariamente alrededor de un millón de viajeros, al ver reducidos los tiempos de viaje entre las zonas situadas al norte y al sur de la ciudad.

La entrada en funcionamiento de este túnel ha hecho posible el acceso directo sin transbordos al eje de la Castellana a través de las estaciones de

El túnel Atocha-Chamartín se ha convertido en un gran complemento del viejo 'túnel de la risa'. En las imágenes, interior del túnel, estación de Nuevos Ministerios, imágenes del cale y de la construcción de uno de los pozos.





Galería de emergencia, en fase de ejecución.



Dovelas de hormigón para revestimiento del túnel en la boca norte del túnel.

Nuevos Ministerios, donde se construyó un nuevo intercambiador, y Chamartín. Desde finales de junio de 2009, también permite la llegada de los trenes de Cercanías al corazón de la ciudad a través de la estación de Sol.

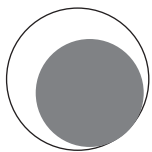
La construcción del túnel se realizó en dos tramos: Atocha-Nuevos Ministerios, adjudicado a la unión temporal de empresas formada por Dragados Obras y Proyectos y Tecsra por 95.605.970 €, y Nuevos Ministerios-Chamartín, cuya construcción recayó en Ferrovial-Agromán por un importe de 83.197.234 €. La última parte ha sido la construcción de la estación de Sol.

Un obra muy compleja

La construcción de esta infraestructura ha sido todo un reto en materia de ingeniería civil teniendo en cuenta que atraviesa el corazón de la ciudad de lado a lado. Esto obligó a realizar las obras del nuevo enlace ferroviario manteniendo unos elevados niveles de seguridad durante su ejecución –se utilizaron, por ejemplo, tuneladoras de doble escudo, el método actual más seguro para horadar túneles–, aunque pensando también en su explotación.

Se realizaron estudios exhaustivos previos del subsuelo de Madrid, un inventario con los edificios con nivel de protección y una clasificación de los servicios existentes bajo tierra, además de catas y sondeos periódicos. A esto hay que añadir un plan de auscultación previo con la colocación de más de 1.900 elementos de control, como bases de nivela-

Las ventajas del túnel



Antes de la entrada en servicio de este túnel, la conexión entre Atocha –donde confluyen todas las líneas de Cercanías de Madrid– y el eje del paseo de la Castellana y la zona norte de Madrid se realizaba a través del ‘túnel de la risa’, al que sólo accedían los trenes de las líneas que procedían del este de Madrid desde Alcalá de Henares y Guadalajara.

Esto obligaba a los viajeros de Cercanías del sur que se dirigían al centro y norte de Madrid desde Aranjuez y Parla a realizar un transbordo que ahora se ahorran diariamente 250.000 viajeros debido a que el trayecto de los trenes de las líneas C-3 y C-4 no finaliza en Atocha, sino que continúa hasta Alcobendas. De esta forma se han descongestionado las pasarelas y andenes y se han eliminado numerosas incomodidades, como las

aglomeraciones que sufrían los usuarios en hora punta.

Otro problema solucionado es que se estaba llegando a un punto crítico en la capacidad del túnel para absorber más circulación en el sentido Atocha-Nuevos Ministerios. Ahora se ha podido duplicar la frecuencia de servicios en dirección al eje de la Castellana en Atocha, con lo cual se han reducido los tiempos de espera, de transbordo y de viaje de los usuarios.

Su entrada en funcionamiento ha hecho posible el acceso directo sin transbordos al eje de la Castellana a través de las estaciones de Nuevos Ministerios, donde se construyó un nuevo intercambiador, y Chamartín, permitiendo desde junio de 2009 llegar al centro de la ciudad a través de la nueva estación de Sol.

Este recorrido puede realizarse a través de dos de las líneas de Cercanías que anteriormente

finalizaban en Atocha, por lo que se han suprimido la mayor parte de los transbordos que se hacían en esta estación al permitir que las líneas C-3 (Aranjuez) y C-4 (Parla) sean pasantes. A los cerca de 150.000 pasajeros de estas dos líneas que realizaban estos transbordos se suman los 100.000 de la línea C-5, que los realizarán más rápido al aumentar la frecuencia de trenes.

Se calcula que un número importante de los viajeros que utilizan la estación de Atocha han reducido en 20 minutos su tiempo de viaje, además de mejorar la interconexión con la red de metro al disminuir los problemas que había en la línea 1. Estas ventajas son aún mayores desde la puesta en servicio del nuevo intercambiador de Sol, que facilite el transbordo directo con seis líneas de metro.



El túnel discurre a una profundidad máxima de 25 metros, salvo en zonas de vaguada o cercanas a estaciones, donde se sitúa a unos 15 metros

ción, hitos, inclinómetros, fisurómetros, electroniveles, etc., a lo largo del túnel para tomar datos de la excavación y comprobar su corrección y el impacto en el entorno. En el caso puntual de la Puerta del Sol, este control de medidas se seguirá realizando durante años.

Otras medidas destinadas a mantener unos elevados estándares de seguridad de la obra fueron los 13.000 metros de inyecciones de consolidación y protección realizados en el túnel para proteger edificios o líneas de metro y evitar posibles deformaciones en aquellas zonas más sensibles en las que el trazado subterráneo cruza con otras estructuras urbanas. Estas actuaciones generaron una superficie tratada superior a los 10.000 metros cuadrados, y las áreas de compensación –inyecciones de mortero a presión para sostener el terreno–totalizaron 4.600 metros cuadrados en el túnel y 15.000 metros cuadrados en la Puerta del Sol.



Paisaje de obras del túnel en la plaza del Embarcadero, en la estación de Atocha, y boca sur del túnel, aún en ejecución.

Se han construido pozos cuyo equipamiento de seguridad está dotado de ventilación por compensación y forzada, detección de intrusión con circuito cerrado de televisión, interfonía y columna seca para extinción de incendios.

El proyecto de construcción incluía un estudio específico de ruidos y vibraciones que establecía la aplicación de medidas correctoras precisas en el caso de que el paso del tren superara los umbrales máximos de ruido permitidos: 50 dB(A) en horario



nocturno y 60 dB(A) en horario diurno, tanto durante la fase de obras como la de explotación. Esto ocurrió, por ejemplo, durante la fase de explotación en las bocas de ventilación, especialmente en el paseo de la Habana, paseo de Alcalá y en la calle María de Molina.

Para evitar estos niveles en la fase de explotación hay que destacar la instalación de vía en placa de hormigón con carril embebido en material elástico, que amortigua la transmisión de vibraciones y ruidos, y cuya necesidad de mantenimiento queda reducida casi totalmente. Además, este sistema permitiría una rápida evacuación a pie de los viajeros hacia las salidas de emergencia en caso de necesidad. El sistema de vía en placa, al contrario que en una vía convencional, permite la circulación de vehículos de socorro que acceden a la plataforma de vías mediante rampas situadas en Atocha, Chamartín y Nuevos Ministerios, estación esta última en la que es posible porque dispone de un andén abatible.

Atocha-Nuevos Ministerios

Iniciado en julio de 2004 y finalizado trece meses más tarde, el trazado de este túnel tiene origen en la actual estación de Cercanías de Atocha. El tramo se inició con el arranque de la tuneladora bajo la plaza del Embarcadero, siguiendo dirección no-

*Explanada de Nuevos Ministerios, bajo la cual se ejecutó la estación del mismo nombre. De-
recha, interior de la estación durante su construcción.*



La vía en placa instalada en el túnel amortigua las vibraciones, apenas requiere mantenimiento y permite una rápida evacuación a pie

roeste hacia la calle Atocha y girando en la plaza de Antón Martín para pasar por el subsuelo de la calle Carretas hasta llegar a la Puerta del Sol, donde ya está en servicio la nueva estación. El recorrido gira hacia el norte bajo la calle Fuencarral en dirección a la plaza de Alonso Martínez, y siguiendo el trazado de la calle Zurbano alcanza el patio de Nuevos Ministerios, donde se construyó otra nueva estación, en paralelo a la existente.

Este tramo tiene una longitud total de 5 kilómetros, de los cuales 4.557 metros corresponden a túnel de doble vía ejecutado mediante una tuneladora integral (TBM) con control de presión de tierras, denominada *Excavolina*. Esta máquina perforó y revistió el tubo con dovelas de hormigón armado de alta resistencia atornilladas entre sí de 32 centímetros de espesor, con una velocidad de perforación de 400 metros al mes. La superestructura se ejecutó mediante vía en placa con carril embutido para

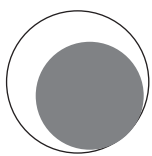


Boca norte de acceso al túnel, en 2005.



Trabajos de la tuneladora 'Excavolina' en el interior del tubo.

Estación de Nuevos Ministerios



El proyecto de construcción de este nuevo túnel llevaba aparejada una nueva estación de Cercanías en

Nuevos Ministerios, que se situó entre la zona de aparcamiento, donde estaba la anterior, y los edificios, con una superficie de 12.000 metros cuadrados, cuatro niveles de altura y una longitud de andenes de 245 metros, que ha quedado integrada en el intercambiador.

Para su construcción fue necesario levantar el losado de granito que había bajo las arcadas de Nuevos Ministerios, conservándolo para su reposición al finalizar la obra. La ejecución de la obra se llevó a cabo en un recinto cerrado entre pantallas de varios

espesores que se construyeron previamente, así como los pilares principales de la estación contruidos como pilas-pilote desde superficie.

Una vez terminadas las pantallas, se hormigonó sobre terreno la losa de cubierta, que se dividió para su ejecución en varias fases, resueltas con losas macizas de hormigón pretensado, con el fin de reponer en el menor plazo posible el tráfico y los usos de la superficie, objetivo que se cumplió. El vaciado y la construcción de los forjados intermedios y la losa de fondo se realizó desde el interior.

Los cuatro niveles se comunican por escaleras fijas y móviles y ascensores que facilitan el acceso a personas con movilidad reducida. Los dos niveles superiores sirven como distribuidores y están enlazados con

la estación actual mediante dos conexiones. En el tercer nivel se sitúan los andenes de la propia estación, mientras que en el más profundo se han realizado los enlaces con las líneas 10, 8 y 6 de metro. La nueva estación permite la parada de tres composiciones de tres coches.

En el equipamiento de la estación destacan sus 28 escaleras mecánicas, dos ascensores, plataforma basculante en el andén para acceso a vías, la rampa de acceso de vehículos de emergencia, cancelas de entrada, dos centros de transformación de energía, equipos de detección y extinción de incendios, circuito cerrado de televisión, megafonía e interfonía, telefonía móvil, detección de intrusión, centro de control local y señalética.



hacer posible la circulación por el túnel de vehículos de emergencia, disponiendo para ello de un ascensor especial hasta el nivel de vías.

En su parte más alta, este tramo del túnel, con un diámetro interior de 8,43 metros, se encuentra a una profundidad de 20 a 25 metros, dimensiones que equivalen a un edificio de entre siete y ocho plantas,

Mezanina sobre las vías en uno de los niveles del vestíbulo de la estación de Sol.

menos en las zonas de vaguada o cercanas a las estaciones, donde desciende a 15 metros (un edificio de unas cinco plantas) y, en general, a 10 ó 12 metros más de profundidad que el *túnel de la risa*.

En su avance, la tuneladora tuvo como principales obstáculos una mezcla de arenas y arcillas que conforman el suelo madrileño. Aparte del terreno,

Estación de Puerta del Sol

El 27 de junio pasado entró en servicio el último gran elemento del túnel Atocha-Chamartín, la estación de Puerta del Sol, un intercambiador modal que permitirá el acceso directo del servicio de Cercanías al centro de Madrid y que enlazará con el metro. De acuerdo a las previsiones, más de 70.000 viajeros emplearán esta estación a diario.

Adjudicada a una unión temporal de empresas formada por FCC y Contratos y Ventas por importe de 80 M€, la estación se sitúa bajo la calle Montera y el pasaje de la Caja de Ahorros, y su único signo en superficie es la gran cúpula de cristal que sirve como acceso. En el interior consta de dos volúmenes: un enorme vestíbulo de

7.500 metros cuadrados y seis niveles, desde donde se permite el acceso a la estación y se conecta con el metro; y, bajo el vestíbulo, la nave de andenes, a una profundidad de 27 metros, con una longitud de 240 metros y una anchura de 20 metros, que es recorrida longitudinalmente sobre las vías por una pasarela para viajeros.

En la nueva estación tendrán parada las líneas de Cercanías C-3 (Aranjuez-Chamartín) y C-4 (Parla-Alcobendas), poniendo las estaciones de Atocha y Chamartín, con servicio de AVE, a 3 y 7 minutos de Sol, respectivamente. Asimismo, se podrá conectar con las líneas 1, 2 y 3 del metro.



la extensa trama de servicios que fue necesario desviar, como colectores, galerías, viajes de agua, vías telefónicas, etc., así como la cercanía de edificios protegidos o de líneas de metro.

Por ello se realizaron inyecciones de consolidación y protección transversales al eje del túnel para proteger edificios o líneas de metro, de forma que su paso se ha realizado sin producir movimientos en las vías, teniendo en cuenta que se ha llegado a pasar a apenas un metro bajo la línea 7. Asimismo, se realizaron inyecciones de compensación, estando toda la obra sometida a un plan de auscultación para controlar su avance.

En su interior, la nueva infraestructura está dotada de un cable sensor fibroláser para la detección de incendios y de un hilo radiante para telefonía móvil. Para garantizar la ventilación y extracción de humos en situaciones de emergencia existen nueve pozos de ventilación, cada uno de ellos con un canchero que permite el acceso exterior desde ambos sentidos de la vía.

A estas medidas de seguridad hay que sumar ocho salidas de emergencia, situadas aproximadamente cada 600 metros, y que en el exterior están perfectamente integradas en el entorno, incorporando una rampa elevadora a nivel de calle en Ato-

Tren de Cercanías en la nueva estación de Sol y reloj con el anagrama de Cercanías imitando al de la Puerta del Sol.





cha, Antón Martín, plaza del Angel, Augusto Figueroa, Zurbarán, Eduardo Dato, General Martínez Campos y Bretón de los Herreros.

Nuevos Ministerios-Chamartín

El trazado del segundo tramo, Nuevos Ministerios-Chamartín, nace en el patio de Nuevos Ministerios, recorre el subsuelo en dirección al paseo de la Castellana en paralelo a la línea 10 de metro hasta llegar a la plaza de Cuzco, tramo en el que cruza por encima de la línea 9 y por debajo de la 10. Luego se desvía en sentido este pasando por Doctor Fleming, plaza de la Madre Molas y Mateo Inurria, para terminar en la estación de Chamartín.

El tramo tiene una longitud total de 3.380 metros, 500 de ellos a cielo abierto entre el emboquille norte y la cabecera sur de Chamartín, y los 2.603 metros restantes corresponden a túnel de doble vía ejecutado con la tuneladora de escudo de presión de tierras EPB Herrenknecht, S-299 fabricada expresamente para esta obra. Estos dos puntos estaban a diferentes niveles, por lo que se tuvo que nivelar el terreno para conectar la vía con las líneas de Cercanías 1 a 5 de Chamartín.

La sección tipo de túnel es circular de 9,38 metros de diámetro de excavación y un diámetro interior de 8,43 metros. Cuenta con un revestimiento



En la ejecución del túnel se realizaron 13.000 metros de inyecciones de consolidación para proteger edificios y líneas de metro



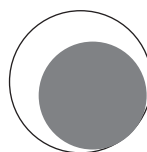
formado por anillos de 1,5 metros de longitud que se componen de 7 dovelas prefabricadas de 0,32 metros de espesor. Al igual que en el tramo anterior, la superestructura incluyó vía en placa.

Asimismo, esta parte del túnel también dispone de un cable sensor fibroláser para la detección de incendios y de hilo radiante para telefonía móvil. Cuenta con cuatro salidas de emergencia situadas aproximadamente cada 600 metros, y para asegurar la ventilación y extracción de humos en situaciones de emergencia tiene cinco pozos de ventilación.

En la cabeza sur de la estación de Chamartín se sitúa el pozo de ataque. En el inicio del túnel se pasa con poca cobertura bajo los sótanos de los edificios, por lo que se emplearon inyecciones de compensación para el control de asentamientos. Como pozo de extracción se utilizó el pozo de ventilación que estaba situado antes del cruce con la calle Raimundo Fernández Villaverde. Desde aquí hasta la estación de Nuevos Ministerios fue necesario realizar 83 metros de túnel por el método tradicional del metro de Madrid.

La tuneladora inició su labor en junio de 2005, con una media de avance baja en los primeros meses dado el desgaste que la composición inicial del terreno –arena de miga y, sobre todo, zonas de granos de sílice y cuarzo– provocó en las herramientas

Página opuesta, interior del túnel Atocha-Chamartín y sala de control de la tuneladora. Sobre estas líneas, ejecución de la estación de Nuevos Ministerios, con cuatro niveles.



Otros túneles

Los trenes de la red de Cercanías de Madrid transitan también por otros túneles de importancia, como son el de Puente de Alcocer (2.079 metros), en la línea Madrid-Atocha-Villaverde Alto por Orcasitas. En la misma línea se sitúan los túneles de 12 de Octubre (1.668 metros) y de Méndez Alvaro (1.763 metros). Otros destacados son el de Madrid-Atocha-Príncipe Pío (4.071 metros) y el de Getafe (2.553 metros) en la línea Atocha-Parla, así como el de la línea Madrid-Atocha-Móstoles-El Soto (9.664 metros).

de la cabeza de corte. Luego aumentó el ritmo, alcanzando unos 400 metros al mes.

En su trayecto se realizaron inyecciones de compensación de mortero o lechada de bentonita y cemento bajo la urbanización de Los Cármenes y un tratamiento local de seguridad –micropilotes– a su paso sobre la línea 10 de metro.

Señalización

Uno de los aspectos más novedosos de este túnel ferroviario ha sido la instalación de un sistema de señalización que se encuentra entre los más modernos de Europa en Cercanías, y que permite alcanzar unos niveles máximos de seguridad y una alta frecuencia de servicios.

Se trata de los sistemas ERTMS/ETCS (*European Rail Traffic Management System/European Train Control System*) niveles 1 y 2, utilizados en las líneas de alta velocidad, y la señalización lateral ASFA entre la cabecera sur de la estación de Chamartín y la cabecera norte de la de Atocha, así como entre los tramos de vías de Cercanías que dan acceso al túnel en cuestión hasta las estaciones de Parla (línea C-4), Aranjuez (C-3), Colmenar Viejo-Alcobendas (C-7 y C-1) y Villalba (C-8). ■



Tres imágenes de la antigua y la nueva estación de Nuevos Ministerios.



Las vicisitudes del 'túnel de la risa'

El proyecto de conclusión de los enlaces ferroviarios de Madrid y su previsión de adaptación a los grandes crecimientos se elaboró en los años 30, durante la segunda República española.

Indalecio Prieto, entonces ministro de Obras Públicas, diseñó un plan de comunicación entre las estaciones de la zona sur de la capital con la zona norte en el que planteaba la construcción de un túnel de 7 kilómetros de longitud que llegaría hasta lo que entonces era un pueblo llamado Chamartín de la Rosa, donde ideó la ubicación de una gran estación. Se sentaban así las bases de lo que sería la comunicación de los trenes hacia la

zona norte de España y a las comunicaciones con Francia y Europa a través del conocido como "directo" a Burgos.

Pero este plan quedó paralizado durante la Guerra Civil debido no sólo a los efectos de la contienda, sino a la fusión de las distintas compañías ferroviarias que existían en España, a la gravísima situación económica y a los planes de la dictadura, entre cuyas prioridades no estaba la de comunicar España con Francia. De esta forma, el proyecto de la futura estación de Chamartín cayó en el letargo, y con él la construcción del túnel que la uniría con Atocha.

Tuvieron que pasar más de 30 años para que el citado túnel se

hiciera realidad, ya que no fue hasta 1967 cuando se inauguró el conocido popularmente como 'túnel de la risa'. Su denominación se debe a la similitud que presentaba con una atracción de feria así llamada, muy exitosa en la época en la que se proyectó. Consistía en un tubo que había que atravesar mientras giraba alrededor del eje longitudinal del mismo. La prensa de la época contraria al Gobierno se mofaba de la nueva construcción, bautizándola con el nombre que ha llegado hasta nuestros días.

Su apertura coincidió con la inauguración de la estación de Chamartín y con los enlaces ferroviarios de ésta con la línea Madrid-Zaragoza y la línea Imperial



o General del Norte (Madrid-Irún), y un año después fue inaugurado el ferrocarril directo Madrid-Burgos.

El túnel proyectado discurre bajo los paseos del Prado, Recoletos -donde se construyó la estación del mismo nombre para dar servicio al centro de Madrid- y de la Castellana, donde se ubicó la estación de Nuevos Ministerios, en un área financiera en desarrollo. Finalmente, separándose del eje del paseo de la Castellana y bajo diferentes calles del distrito de Chamartín, llega al antiguo pueblo de Chamartín de la Rosa, donde sale a superficie, para terminar en la actual estación de Chamartín.

Con la creación de la red de Cercanías de Madrid, este túnel

acogió al principio los tráficos de cinco líneas: C-1, C-2, C-7, C-8a y C-8b, aumentando año tras año el volumen de trenes que por él circulaban, alcanzando frecuencias de paso similares a una línea de metro. En la actualidad circulan por él las líneas C-2, C-7, C-8a, C-8b, y C-10, además de algunos trenes de media distancia regionales y de largo recorrido. Debido a su saturación, en 2008 se puso en servicio un nuevo túnel con un recorrido paralelo para descongestionarlo del tráfico.

En la actualidad, ambos túneles son recorridos exclusivamente por trenes de viajeros. Por una parte, de Cercanías o regionales cadenciados, paran en todas las

estaciones, con intervalos de paso entre trenes similares a los de una línea de metro; y por otra, trenes de media distancia y largo recorrido con origen en Chamartín y destinos meridionales o largo recorrido norte-sur y sur-norte. A excepción de los regionales cadenciados, que siempre circulan por el túnel Este y efectúan parada en Recoletos y Nuevos Ministerios, los demás pueden circular alternativamente por un túnel u otro según las necesidades de regulación en el puesto de mando. Los de largo recorrido circulan indistintamente por el túnel Este o el túnel Oeste según las necesidades de regulación en el puesto de mando.

Túneles de alta velocidad

Desde la puesta en servicio en 1992 de la línea Madrid-Sevilla, la red española de alta velocidad ha crecido hasta superar los 1.600 kilómetros, y actualmente se ejecutan nuevos corredores en todo el ámbito peninsular que convierten a España en el primer país del mundo en construcción de líneas de alta velocidad. A lo largo de todas estas líneas se encuentran en servicio, se construyen o están proyectados más de 350 túneles ferroviarios de distintas longitudes, tipologías, emplazamientos y sistemas constructivos que, si se unieran unos detrás de otros, sumarían más de 550 kilómetros por los que el AVE circula/circulará bajo tierra. Desde los dos grandes túneles de base de Guadarrama y Pajares, que superan los 24 kilómetros de longitud, pasando por los tubos mayores de 7 kilómetros (San Pedro, A Madroa, Pertús, La Cabrera, Abdalajís o Sorbas), hasta la multitud de subterráneos de menores dimensiones pero igualmente valiosos, los túneles españoles de alta velocidad conforman un rico y variado conjunto que muestra el elevado nivel alcanzado por la ingeniería ferroviaria en nuestro país, situado a la cabeza mundial en este campo. En los siguientes reportajes se realiza una aproximación a estos modernos subterráneos, encuadrados en sus respectivos corredores de alta velocidad.







*La construcción de los
túneles del Corredor Sur*

Atravesando la Bética

En su avance desde Madrid hacia el sur, la alta velocidad sorteó en 1992 el complicado paso de Sierra Morena para llegar a Sevilla y en 2007 la difícil orografía de la cordillera Bética para alcanzar Málaga. Este último logro fue posible gracias a los túneles de Abdalajís, que con más de 7 kilómetros de longitud son los más largos de Andalucía. Su construcción ha sido todo un reto para la ingeniería.



Tuneladoras atacando las bocas de los túneles. Derecha, uno de los tubos de Abdalajís ya en estado de operatividad.



BEGOÑA OLABARRIETA

a línea de alta velocidad hacia la Costa del Sol, enlazando Córdoba con Málaga, se inauguraba 15 años después de aquel primer AVE que llegó en 1992 desde Madrid a Sevilla tras sortear Sierra Morena. La construcción de ese tramo tuvo que afrontar las enormes dificultades que planteaba el paso por la cordillera Bética, con una orografía y composición tectónica que supuso todo un reto técnico.

Fue necesaria una gran obra para abrir una línea que atraviesa 19 municipios de Córdoba, Sevilla y



Málaga, con trenes atravesando una zona montañosa a 300 km/h. Este corredor hacia el sur tiene además la misión de ampliar las conexiones de la red andaluza, enlazando con Córdoba, Sevilla, Málaga y Algeciras, y con el futuro eje transversal Sevilla-Bobadilla-Granada.

Todo ello en una actuación contemplada en el Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT) del Ministerio de Fomento, con una inversión total de 2.539 M€ y con una contribución de la Unión Europea a través de los Fondos FEDER de 853 M€.

Cruzando la sierra

En total, la línea de alta velocidad Córdoba-Málaga mide 155 kilómetros y está dividida en 22 tramos, con una sucesión de túneles entre los que destacan los de Abdalajís, que desde la cercana estación de Bobadilla y al oeste del embalse de Guadalhorce atraviesan la sierra.

El primer tramo de esta conexión se abrió en diciembre de 2006 uniendo Córdoba y Antequera. Más tarde, y en su avance a través de la cordillera Bética, se completó el recorrido Antequera-Mála-

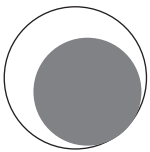


Bocas de los túneles del Humilladero (izquierda) y de Gibralmora (arriba).

ga, un tramo de 54,5 kilómetros que se adentra en una cadena montañosa de abrupta orografía, que obligó a construir 8 túneles y 18 viaductos. Los túneles de este tramo son los de Adbalajís (casi 7.300 metros), Gibralmora (3.217 metros), Cártama (2.424 metros), Espartal (2.002 metros), Gobantes (1.792 metros), Tevilla (957 metros) y Álora (854 metros). Unidos, suman 25,8 kilómetros, casi la mitad de los que tiene el recorrido Antequera-Málaga.

Además, la entrada de la alta velocidad a la ca-

Túneles menores: Álora y Espartal



En comparación con la gran obra de los túneles de Adbalajís, el resto de los túneles del tramo (Gibralmora, Cártama,

Espartal, Gobantes, Tevilla y Álora) son menores. Destacan los de Álora y Espartal, en el tramo XVI, que, a diferencia de los gemelos de Adbalajís, están formados por un único tubo, con capacidad para albergar los dos sentidos de la circulación.

Estos subterráneos en el interior de la montaña atraviesan el Complejo Maláguide con una estructura tectónica singular: un vasto anticlinorio que constituye una ventana tectónica: el Anticlinorio de Sancti Petri, situado dentro de los términos municipales de Cártama, Álora, Arroyo Ancón y el Monte Sancti Petri.

En la construcción de estos dos túneles se siguieron las pautas marcadas por el nuevo método austriaco, que marca tres momentos de ejecución: el primero, de excavación, tipos de

sostenimientos y primera auscultación; el segundo, de impermeabilización y nueva auscultación, y el tercero, de revestimiento.

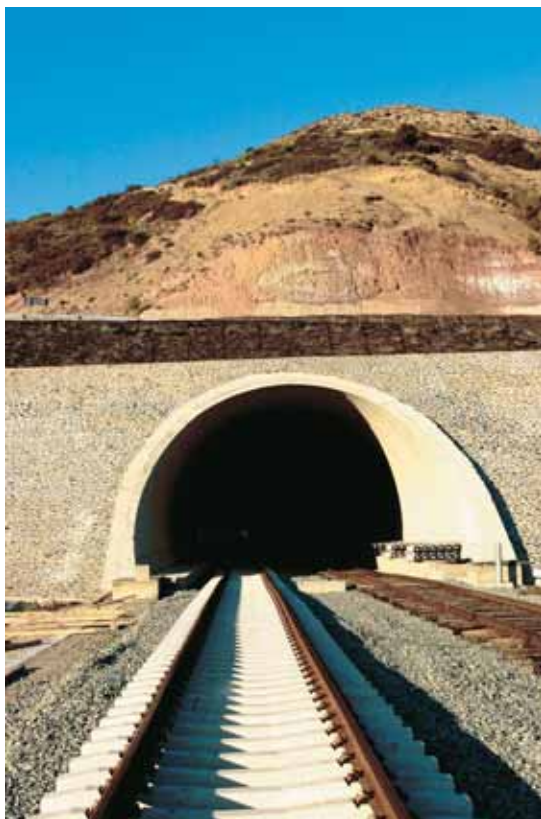
En la primera fase se comenzó la excavación de las cuatro bocas utilizando medios mecánicos: un martillo hidráulico de 2.800 a 3.500 kilogramos montado sobre el brazo de una retroexcavadora de 40 toneladas y 420 CV. Igualmente se usaron medios mixtos: voladuras con cartuchos de goma 2, mientras que la excavación, perfilado y recorte de la parte superior se llevó a cabo con medios mecánicos.

El avance en ambos túneles tampoco estuvo exento de los problemas causados por el terreno. Así, debido a la intensa tectonización existente en el macizo rocoso y a la presencia de agua en algunas zonas, con tendencia a circular hacia áreas colindantes, se corría el riesgo de que se produjeran plastificaciones bajo el apoyo de los hastiales. En este caso, el problema se solucionó con

la construcción de una contrabóveda en ambos túneles (de 110 m² en el de Álora y de 85 m² en el de Espartal).

En la segunda fase, la de impermeabilización y nueva auscultación, se avanzó aún más en captar y conducir las filtraciones de agua hacia los conductos de drenaje, eliminando goteos que pudieran deteriorar los revestimientos y evitando la formación de agujas de hielo que hicieran peligrosa la circulación por el interior de los túneles.

Por último, en la tercera fase, de revestimiento, se optó por un hormigón en masa HM25, que se apoya directamente sobre la impermeabilización actuando como terminación definitiva de los túneles. Este revestimiento cumple una doble función: la de cobertura estética y la de evitar en la medida de lo posible las turbulencias de aire generadas por la velocidad del tren con las irregularidades que tendría éste si no se revistiese.



ADIF



ADIF

pital de la Costa del Sol se realiza mediante un túnel urbano de 1.932 metros, lo que suma un total de 27,7 kilómetros de tramos subterráneos en esta parte del trayecto.

Abdalajís: contra los elementos

Las sierras del valle de Abdalajís y de Huma se alzaron como un muro que parecía casi insalvable a la hora de modernizar las comunicaciones y el tráfico de viajeros hacia el Mediterráneo meridional. La excavación de dos grandes túneles paralelos, los de Abdalajís, gracias a la utilización de dos tuneladoras de doble escudo, hicieron posible romper este aislamiento.

Los túneles de Abdalajís son dos tubos gemelos, de 7.270 metros el Este y de 7.297 el Oeste (incluyendo los falsos tubos de los accesos), con un radio mínimo en planta de 6.900 metros, comunicados entre sí por 19 galerías con una longitud total de 500 metros. Su extensión los convierte en los túneles de alta velocidad más largos de Andalucía y los quintos de toda España.

Estos pasos se corresponden con los tramos XII y XIII de la línea Córdoba-Málaga y se erigen como la principal obra de ingeniería de la misma debido a su dificultad y la cantidad de medios técnicos y humanos del máximo

Boca del túnel de Gobantes, acceso soterrado a la estación de Córdoba y boca del túnel del Humilladero.

Los túneles de Abdalajís han constituido un verdadero reto porque el terreno donde se perforaron es de los más complicados de cuantos se han ejecutado en España

nivel que se necesitaron para conseguir culminarla con éxito.

La complejidad de la obra fue tal que tan sólo en completar la excavación del túnel Este, el primero en calarse, se invirtieron 26 meses, a los que se suman otros 10 meses de obras complementarias para acondicionarlo para su explotación ferroviaria, entre ellas el montaje de vía y la superestructura de electrificación, señalización y comunicaciones.

El perfil del terreno donde se perforaron los túneles de Abdalajís es de los más complicados de cuantos se han ejecutado en España. Por eso, desde el inicio, el paso de la alta velocidad por la zona suponía un desafío.

Trasladándonos en el tiempo, hace 142 años, cuando se buscó un camino para atravesar las sierras montañosas y los valles de Abdalajís, se optó por un camino menos difícil de construir a través del desfiladero de Los Gaitanes. Esta opción no permitía el paso de la línea tal y como se había proyectado, dado que las curvas en su trazado no permitirían desarrollar velocidades superiores a los 70 kilómetros por hora, muy lejos de los 300 esperados. La solución para la línea de alta velocidad fue



atravesar los términos municipales de Antequera y Álora (Málaga), cerca de la estación-nudo de Bobadilla.

Así, el tramo Gobantes-Salida del Túnel de Abdalajís, que incluye los túneles gemelos de ese nombre, discurre entre los pk 800+000 y 808+970, con una longitud de 8.970 metros, incluyendo las partes perforadas a través de las sierras del valle de Abdalajís y de Huma, y 1.670 metros a cielo abierto (920 metros en la boca norte y 750 metros en la sur).

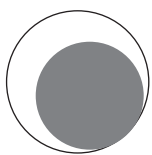
Una vez decidida la zona de paso, atravesar esta sierra suponía enfrentarse a estructuras geológicas diversas: fallas, cabalgamientos y otras zonas karstificadas. En su caso, los túneles de Abdalajís

Interior de uno de los túneles ya revestidos de Abdalajís, todavía en la fase de ejecución.

pasan a través de la cordillera Bética, que se divide en Unidades Internas y Externas, que a su vez se subdividen en los Complejos Alpujárride, Maláguide (Unidades Internas) de edad Paleozoica, y el Penibético (perteneciente a las Unidades Externas) del Mesozoico.

Todo ello contando, además, con la existencia de varios acuíferos en la sierra de Huma y en la sierra de Abdalajís, que, a pesar de que los estudios previos no detectaron este problema, derivarían en afloramientos de agua y caudales de unos 400 litros por segundo en el túnel Este y de 200 litros por segundo en el túnel Oeste, lo que hizo todavía más compleja la obra.

Protección del medio ambiente



La obra de los túneles de Abdalajís no podía concluirse sin un trabajo en la recuperación y regeneración del entorno natural afectado por la envergadura de la misma. Adif destinó 12,8 M€ para garantizar la integración ambiental durante los trabajos, con medidas de protección de la fauna, la vegetación y el sistema hidrológico, así como otras para la recuperación ambiental y la integración paisajística.

Sistema hidrológico

- Las instalaciones auxiliares se localizaron fuera de las zonas de

mayor permeabilidad y del área de influencia de los arroyos y líneas de drenaje.

- Se proyectó un drenaje transversal que garantiza el paso de las aguas.

- Se diseñaron dos balsas de decantación para recoger las aguas que salían del túnel, usadas para facilitar la limpieza de lodos del fondo.

- En el programa de vigilancia ambiental se contempló el seguimiento analítico de la calidad de las aguas contenidas en las balsas de decantación.

- Tratamiento y gestión de residuos contaminantes (aceites, lubricantes, etc.) generados durante las obras.

- En el programa de vigilancia ambiental se incluyeron los trabajos de vigilancia y control necesarios para realizar el seguimiento del comportamiento del acuífero, atendiendo tanto a los aspectos de cantidad del recurso como de su calidad.

Recuperación ambiental e integración paisajística y ecológica

- La construcción de los túneles siguió las directrices del estudio informativo de la LAV Córdoba-



La obra

El proyecto se dividió en dos tramos. Por un lado, el tramo XII, que comprendía la construcción del túnel Este, contemplando también la adecuación de una superficie de unos 125.000 m² para ubicar el vertedero, las instalaciones y los servicios auxiliares de las tuneladoras, que posteriormente quedaron como explanada de emergencia.

Por otro lado, el tramo XIII englobaba la perforación del túnel Oeste con otra explanada de emergencia, ésta de 30.000 m² sobre el arroyo Salado, el viaducto sobre el arroyo Higuérón, de 125 metros de longitud y un desmante de 300 metros de longitud y 45 de altura.



La tuneladora 'La Alcazaba' asoma por la boca norte de los túneles de Ab-dalajís. Izquierda, otra vista de una de las bocas.

Málaga y la Declaración de Impacto Ambiental.

- En las medidas de integración paisajística, encaminadas al tratamiento de las zonas visualmente más frágiles, se tuvo en cuenta la visibilidad resultante desde puntos estratégicos y exteriores al tren y la incidencia de los distintos elementos de la obra (falso túnel, vertedero, etc.).

- Para la revegetación de taludes se siguieron los criterios fijados en el estudio de impacto ambiental, clasificando los taludes en varias tipologías de vegetación en función de elementos tales como pendiente,

tipo de sustrato, microclima existente, entre otros, de forma que para cada clase se definieron las especies óptimas y el método más adecuado.

- Para reducir al máximo el volumen de materiales destinados al vertedero, se definieron y valoraron ambientalmente todos los aspectos relativos a la gestión de las tierras sobrantes de la excavación, aprovechando su utilización en la propia obra.

Fauna

- Estudio faunístico que detalló las principales zonas de reproducción,

alimentación y cría de las distintas especies, así como los corredores por donde la fauna efectúa de forma habitual sus desplazamientos.

- Elaboración de un calendario con limitaciones temporales para las labores de voladuras, limpieza y desbroce del área para evitar afecciones a los animales durante los periodos de cría y nidificación (enero-agosto).

- Medidas destinadas a preservar las especies animales protegidas y las zonas de interés faunístico, áreas de nidificación, refugio o campeo, de las afecciones inherentes a la fase de obras.



Túnel de la línea Madrid-Sevilla, en el límite entre Ciudad Real y Córdoba.

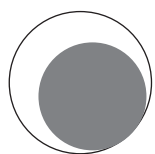


Para la construcción de cada uno de ellos se utilizó una tuneladora de doble escudo para roca dura, de 10 metros de diámetro, con un diámetro interior libre de 8,80 metros.

Los túneles, un enorme hueco en la montaña realizado gracias a más de 800 operarios y a las dos tuneladoras, se construyeron con una orientación de sur a norte aprovechando así la pendiente del trazado (16,02 mm/m de máxima, descendente en dirección Málaga).

Fue en la boca sur donde se iniciaron los traba-

Del túnel de Piedras la Sal al de Sorbas



De Jerez a Almería y de Granada a Málaga, la red de alta velocidad andaluza tiene algunas líneas ya en servicio y está desarrollando otras, con una longitud actual de túneles construidos de unos 35 kilómetros. La línea de AVE más antigua, Madrid-Sevilla, con 16 kilómetros subterráneos, tiene en el límite entre Ciudad Real y Córdoba la mayor concentración de túneles de Andalucía, 12 (que suman 10.220 metros), tres de ellos mayores de 1.000 metros: Piedras la Sal (2.568 metros), Loma del Partidor (1.881 metros) y Piedras Blancas (1.647), que datan de 1992. A ello se suma el pasillo soterrado en Córdoba.

Además de la línea Córdoba-Málaga, con más de 27 kilómetros discurriendo por subterráneos (incluidos los 1,9 kilómetros de los tubos soterrados en Málaga), en la línea Antequera-Granada, de 119 kilómetros, actualmente en ejecución, se han proyectado más de media docena de túneles, entre los que sobresalen los de Quejigares (3.343 metros), del tramo Arroyo de la Viuda-Quejigares, y Archidona (2.170 metros, de ellos 1.880 excavados en mina), del tramo Archidona-Arroyo de la Negra, ambos en ejecución según el nuevo método austriaco.

En la línea Murcia-Almería, perteneciente al Corredor Mediterráneo, a principios de 2009

se ha adjudicado el tramo almeriense Sorbas-Barranco de los Gafarillos, que incluye la ejecución del túnel de Sorbas, que con 7,5 kilómetros de longitud está llamado a ser el más largo de Andalucía. Este túnel, que atraviesa el Lugar de Interés Comunitario (LIC) Sierra Cabrera-Bédar, estará formado por dos tubos de vía única de 52 m² de sección libre, interconectados por galerías cada 400 metros, y se construirá mediante tuneladora durante 5,9 kilómetros, ejecutándose el resto con medios convencionales. En el tramo contiguo, Barranco de los Gafarillos-Los Arejos, también se ejecutará el túnel del Almendral, con 100 m² de sección libre y 1,1 kilómetros de longitud.



jos de perforación y donde se levantó una pantalla de pilotes anclada (con 113 pilotes de 20 metros de longitud y 800 milímetros de diámetro, con una separación entre ejes de un metro), disponiendo cinco filas de anclajes con longitudes superiores a 20 metros.

Antes de que las tuneladoras comenazaran a actuar, se construyeron dos falsos túneles de 30 metros de longitud cada uno y un diámetro similar al de la cabeza de la máquina para que ésta pudiera empezar a excavar. Una vez contruidos, las tuneladoras se montaron en estos emboquilles y se introdujeron empujando con los cilindros auxiliares contra las dovelas base.

Con la máquina ya introducida, se utilizó una estructura de reacción auxiliar, situada en el exterior del emboquille, para avanzar hasta el frente colocando anillos en modo de escudo simple. De hecho, el revestimiento del túnel está formado por anillos de siete dovelas prefabricadas de hormigón armado, de 45 centímetros de espesor y 1,50 metros de ancho.

Para montar el anillo, la tuneladora utilizó un erector de dovelas que está situado en el escudo de cola de la máquina, y que las sujeta con una ventosa situada en la cara interior de la misma. Cuando se establece en la posición correcta, la dovela se mantiene con ayuda del empuje de los cilindros auxiliares contra el anillo anterior hasta conformar el anillo completo. Las dovelas se unieron mediante tornillos galvanizados de 40 centímetros, y la fijación de los anillos se realizó con conectores.

Cada 350 metros los túneles están conectados mediante galerías transversales de seguridad para permitir la rápida evacuación en caso de accidente. Igualmente, para salvaguardar la seguridad, se habilitó una acometida de agua contra incendios y otra de aire exterior para ventilación en caso de emergencia.



Dragados

Trabajos en una de las bocas de los túneles de Abdalajís. Sobre estas líneas, imágenes de las dovelas de hormigón armado empleadas como revestimiento de los túneles.

Tuneladoras de última generación

Para la perforación se utilizaron dos tuneladoras gemelas: *La Alcazaba* y *La Mezquita*, ambas de doble escudo (diseñadas por Mitsubishi Heavy Industries Ltd. y The Robbins Company), fabricadas en las instalaciones de Duro Felguera en Asturias y trasladadas posteriormente hasta la zona de obras.

Ambas máquinas son adaptables a terrenos de distinta naturaleza, como es el caso de la litología en Abdalajís. A su paso, perforan el túnel al tiempo que realizan el sostenimiento de la excavación y el revestimiento del túnel, siendo capaces de simultanear ambas labores al operar con doble escudo, disponiendo de una coraza que sirve de sostenimiento provisional del terreno hasta que se coloca el anillo de dovelas.

Esta forma de trabajar, la más segura para los operarios, hace posible que mientras los cilindros de empuje principal empujan el escudo de cabeza hacia delante y la rueda de corte realiza la excavación, el escudo trasero vaya montando los nuevos anillos de sostenimiento.



En este caso, el doble escudo se habilitó en aquellos tramos en los que el terreno era capaz de resistir la presión que transmitía, mientras que en las zonas en las que el terreno no podía resistir la presión de los *grippers*, la tuneladora funcionó con un solo escudo, ya que no se podía simultanear la excavación con el montaje del anillo de dovelas, usando cilindros auxiliares sobre el último anillo colocado.

Problemas con el gas y el agua

El avance de las tuneladoras no estuvo exento de dificultades. La excavación tuvo que afrontar la presencia de gas metano en una zona de unos 800 metros, lo que complicó la perforación, ya que la tuneladora, habilitada con un dispositivo de seguridad con detectores de gas, se paraba automáticamente cuando la concentración era superior a límites prefijados: en este caso, el 20% del Límite Inferior de Explosividad (LIE). Para poder avanzar se hizo necesario rebajar el límite LIE al 10%, lo que hizo que se aumentaran de forma considerable los sistemas de ventilación.

El segundo enemigo estaba dentro del propio terreno. La mayor parte del trazado subterráneo está situado bajo el nivel freático, atravesando tres acuíferos principales: Huma, Valle de Abdalajís y Sierra Llana, de elevada permeabilidad en las zonas fracturadas y karstificadas, y con una conexión hidráulica muy débil entre ellos. La columna de agua

Arriba, galería de conexión entre tubos, situadas cada 350 metros. Debajo, el trayecto Córdoba-Málaga incluye siete túneles, que suman 25,8 kilómetros de longitud.

La excavación de ambos túneles fue llevada a cabo por dos tuneladoras de doble escudo para roca dura, diseñadas expresamente para esta obra





Dragados



Dragados

Tres imágenes de las tuneladoras (y el 'back up') que han horadado los tubos, con una cabeza de corte de 10 metros de diámetro.

sobre la clave de los túneles podía llegar a alcanzar hasta 300 metros en el primero de ellos.

Para afrontar este contratiempo, antes de comenzar la excavación se estableció una red de control hidrogeológico compuesta por tres pozos en los que se realizaron ensayos de bombeo que confirmaron los datos de permeabilidad del proyecto. Igualmente se instrumentaron los sondeos, pozos y manantiales de la zona, se preparó el sistema de control de caudales a instalar en las bocas de los túneles, y se perforó un piezómetro en la zona de los pozos de Abdalajís.

Estos tres pozos se emplazaron en las tres escamas que corrían riesgo de verse afectadas por la excavación: Valle de Abdalajís, Capilla Tajo del Cuervo y sierra Huma.

Fue en marzo de 2005, en el ecuador de la excavación, cuando se produjo en el túnel Este la primera entrada de agua. Rápidamente se impermeabilizó la zona y se evacuó el líquido que corría por el túnel, mediante una canaleta, hacia el arroyo del



Los poderes de 'La Alcazaba' y 'La Mezquita'

- **Cabeza de corte:** 10 metros de diámetro, accionadas por 14 motores eléctricos. Potencia total instalada de 5MW. Con rueda de corte de 69 cortadores de disco de 17".

- **Escudo delantero:** 9.930 m/m. Parte móvil de la máquina cuando funciona con doble escudo. Alberga los 'grippers' estabilizadores.

- **Escudo telescópico:** 9.830 m/m de diámetro, permite el movimiento relativo entre los escudos y posibilita el trabajo como doble escudo.

- **Escudo trasero:** 9.830 m/m de diámetro. Alberga las zapatas que fijan la tuneladora al terreno, los cilindros auxiliares y el erector de dovelas.

- **Empuje principal:** con 16 cilindros que unen ambos escudos.

- **Empuje auxiliar:** con 27 cilindros en el escudo trasero.

- **Instalaciones auxiliares:** sondas de perforación de sondeos de reconocimiento, sistemas para la ejecución de paraguas de micropilotes, elementos de inyección de aguas y espumas, sistemas de detección de gases.

- **Cada tuneladora arrastra el 'back up',** que aloja cabina de mandos, transformadores, sistemas de ventilación, materiales para el relleno del trasdós de las dovelas, cinta transportadora del material extraído de la excavación (capacidad de 1.500 toneladas/hora a una velocidad de hasta 3.2 metros por segundo), enfermería y comedor, aseos, y cámara estanca de seguridad para 25 personas.

El conjunto del escudo y el 'back up' supera los 110 metros, siendo la longitud del escudo de 11,89 metros. El escudo pesa 1.300 toneladas, con 10 metros de diámetro y una potencia total instalada de 6.400 KW.



Quinto, no sin antes haber sido depurada por decantación.

Una vez tomadas las primeras medidas, se realizó un modelo hidrogeológico para evaluar el impacto causado por la construcción de los túneles y el drenaje de agua sobre el acuífero y a través de ellos. Así se calculó la respuesta del medio hidrológico ante distintas situaciones: evolución de los niveles freáticos, caudales de descarga y productividad o vida útil en los recursos hidrogeológicos explotados, así como la entrada de agua en los túneles.

Esta simulación permitió ver cómo iba a comportarse el acuífero ante diferentes supuestos de llu-

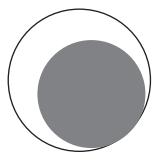
Arriba, vista de las bocas de los túneles, con las tuneladoras encajadas en los tubos y el parque de dovelas que las alimenta en su parte posterior. Debajo, uno de los tubos ya revestido, preparado para la obra de superestructura.

via intensa, normal o sequía, e incluso se pudo proyectar el comportamiento del mismo en el caso de que se cortaran nuevas zonas de falla permeables durante la excavación.

Ante las entradas de agua que ya se estaban produciendo se trabajó en varios frentes. Por una parte, se consiguió disminuir el ingreso de agua en los túneles mediante la inyección en el macizo rocoso de una lechada de cemento-bentonita, y se mejoró el contacto revestimiento-terreno con inyecciones adicionales en el hueco entre las dovelas de hormigón y el terreno.

Por otra parte, hubo que construir un anillo de refuerzo para cada túnel –de 1.130 metros en el Este y 1.165 en el Oeste–, diseñado para resistir cargas de agua de 200 a 300 metros, mientras que entre las dovelas y el anillo se colocó una barrera de impermeabilización compuesta por un geotextil y una lámina de PVC.

Asimismo, se garantizó la ausencia de elementos contaminantes depurando las aguas y canalizando las procedentes del macizo hacia las balsas de decantación construidas para ello en las bocas de los túneles. Este agua drenada desde los túneles al arroyo del Quinto, una vez depurada, se aprovechó para regadíos y para recargar el acuífero de la



Una complicada composición tectónica

En sus más de 7.000 metros, los tubos de Abdalajís cruzan las complejas formaciones geológicas de las sierras del valle de Abdalajís y Huma en la cordillera Bética. El terreno que atraviesan se compone de:

- Areniscas y lutitas de la formación Algeciras.
- Superposición de hasta seis escamas cabalgantes, en las que hay unidades de distintas edades geológicas [comprendidas entre el Triásico y el Cretácico]. Además, el frente de cada escama está marcado por un conjunto de tres unidades compactas de calizas y dolomías denominadas Formación Jarastepar, Formación Endrinal y Formación Torcal.
- En este tramo hubo que afrontar las fallas del puerto de Ramos, del Cortijo, de Sierra Llana central, de Sierra Llana sur, del Tajo Ballesteros, del Salto de la Zorra y la meridional de la Sierra del Valle de Abdalajís.
- Entre los pk 806+077 y 806+520 se atraviesa la formación flyshoide de las Arcillas Variegadas, una estructura sinforme compleja con materiales de mala calidad: argilitas verdes y rojizas con intercalaciones de areniscas y calcarenitas.

Algo más al sur, el túnel atraviesa las filitas y cuarcitas de la Formación Tonosa, pertenecientes al Complejo Alpujárride de las zonas internas; y en los flancos, las formaciones Morales, compuesta por pizarras y areniscas, Sanctipetri, por calizas tableadas y masivas, y Almogía, por grauvacas, conglomerados, liditas y pizarras, pertenecientes al complejo Málagaide.





Dragados



Izquierda, la tuneladora en el momento del corte de uno de los tubos. Debajo, boca de uno de los túneles construidos en el trayecto Córdoba-Málaga.

cuenca del Guadalhorce, muy castigado por la sequía en los últimos años.

Para paliar los efectos en la población, una vez se produjo la afección, el Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (Adif) aseguró las necesidades de suministro de agua a la localidad de Valle de Abdalajís por medio de camiones cisterna, en torno a los 450.000 litros diarios. En el marco de un convenio firmado en diciembre de 2007 con el Ayuntamiento, Adif construyó dos nuevos pozos y una infraestructura hidráulica, compuesta

por una tubería de 10 kilómetros de longitud, un depósito de regulación de bombeo, una estación potabilizadora y otras instalaciones adicionales, que garantizan el suministro de agua potable a esta localidad y a la barriada de La Fresneda. El convenio, por importe superior a 5 M€, que contemplaba un control permanente de Adif sobre los acuíferos de la zona, también preveía la recuperación de las carreteras locales dañadas por las obras y la restauración de la villa romana del municipio.

Cuando se inició la excavación, se estimó que las tuneladoras perforarían a un ritmo aproximado de 20 metros diarios. Sin embargo, las dificultades del terreno y los contratiempos surgidos durante la perforación ralentizaron la marcha de los trabajos, que en algunas jornadas avanzaban escasos metros.

La excavación se alargaría hasta los 26 meses, a los que se añadieron otros 10 para el acondicionamiento de los túneles: galerías de seguridad, colocación de centros de suministro de energía eléctrica, impermeabilización, ventilación, andenes para albergar las líneas de comunicaciones, control y telemando, además de las vías y la catenaria. Finalmente, los túneles entraron en servicio en diciembre de 2007, al igual que el resto de la línea Córdoba-Málaga. ■





La línea de alta velocidad a Valencia discurrirá durante más de 54 kilómetros bajo tierra

Túneles hacia Levante

Los pasajeros que viajen en AVE entre Madrid y Valencia el próximo año lo harán por un nuevo trazado ferroviario por las provincias de Madrid, Toledo, Cuenca y Valencia que atraviesa zonas medioambientalmente protegidas, obstáculos montañosos y la trama urbana de la ciudad del Turia, escenarios que han exigido la construcción de 34 túneles cuya longitud supera los 54 kilómetros. El más destacado es el bitubo de La Cabrera, que con sus 7.252 metros es el más largo de la línea y el sexto de España.



Comisa



RAQUEL SANTOS

Con una longitud de 939 kilómetros, la línea de alta velocidad Comunidad de Madrid-Castilla La Mancha-Comunidad Valenciana-Región de Murcia, o Corredor de Levante, es la más larga que se construye actualmente en el mundo. En un trazado tan extenso, las estructuras necesarias para tender la línea, como los túneles, son numerosas, totalizando 47 subterráneos a lo largo del Corredor. Y eso que en su camino primero hacia Valencia y luego hacia Alicante y Murcia no encuentra los



grandes obstáculos montañosos de otras líneas, como las que se dirigen al noroeste o al norte.

La línea de Madrid a Valencia por Motilla del Palancar, que como parte más adelantada del Corredor de Levante se pondrá en servicio el próximo año, no afronta en su trazado grandes cadenas montañosas que obliguen a construir numerosos túneles. No obstante, en su trazado de 360 kilómetros, generalmente llano, se suceden zonas medioambientalmente protegidas, zonas geográficas abruptas, alguna cadena montañosa y una importante zona urbana en Valencia que requerirá del soterramiento de la traza.

Arriba, boca del lado Madrid de uno de los tubos del túnel de la Cabrera, que con más de 7 kilómetros de longitud es el más largo de la línea. A la izquierda, ejecución del falso túnel de Torrent, en el tramo Aldaia-Picanya (Valencia).

Todo ello ha obligado a la ingeniería a construir 34 túneles, con una longitud total superior a los 54 kilómetros, convirtiendo a la línea directa Madrid-Valencia en la parte del Corredor de Levante con mayor número de túneles. A continuación se describen los túneles de esta línea.

Trayecto por Toledo y Cuenca

Los primeros 223 kilómetros de la línea directa a Valencia, entre Torrejón de Velasco y Motilla del Palancar, discurren por el sur de Madrid, el este de



Toledo y por la provincia de Cuenca, encontrando a su paso un terreno llano sin apenas obstáculos geográficos para el tendido ferroviario. En este trayecto se construyen un total de 19 túneles, con una longitud total de 22.107 metros.

Los primeros subterráneos se encuentran en la provincia de Madrid, en el tramo Torrejón de Velasco-Seseña. Se trata de los túneles artificiales de Naves Altas (730 metros) y Cabeza de Gato (190 metros), de tipología similar al primero de más de 1.000 metros de la línea, el de Dehesa Nueva del Rey (1.439 metros), en el tramo Seseña-Aranjuez. Este tipo de túneles se construyen en tres fases: primero se excava hasta dejar al aire libre la zona que ocupará el túnel, luego se construye la contrabóveda (suelo) y bóveda, con emboquilles diseñados en forma de pico de flauta en ambos lados, y finalmente se realiza el relleno del terreno y de la estructura concluida.

El tramo contiguo, Aranjuez-Ontígola, incluye uno de los túneles más singulares de la línea, El Regajal, de 2.437 metros (2.080 metros excavados en mina y 23 y 334 metros correspondientes a los emboquilles), con una complicada ejecución y un gran valor medioambiental. Este túnel de planta curva se proyectó para minimizar la afección al humedal Mar de Ontígola, rico en flora y fauna y con una especie de mariposa endémica muy amenazada.

El túnel se ejecutó según el nuevo método austriaco, con una primera fase de avance (excavación de la zona superior de la sección) y una segunda de destroza (excavación de la parte inferior de la sec-



Interior y boca del túnel de Horcajada (Cuenca), de 3.957 metros y 11 metros de altura de gálibo.

ción), para lo cual se emplearon máquinas rozadoras, voladuras y medios mecánicos. Las malas condiciones de un terreno poco consistente, con materiales del Mioceno inferior (arcillas, glaubenitas y halitas), provocaron en diciembre pasado un desprendimiento cerca de la boca de Aranjuez, que ahora se subsana con una solución consistente en la ejecución en mina de un falso techo, luego recubierto, que no alterará el plazo de recepción del tramo.

El trazado continúa por terrenos llanos hacia el este, donde se encuentran el túnel artificial de Los Rincones (372 metros), ya terminado, y dos pasos



Acciona Infraestructuras

Arriba, trabajos en el interior del túnel de El Regajal, de 2.427 metros, en el límite entre Madrid y Toledo. Debajo, cale con rozadora del túnel de Horcajada (Cuenca), producido el 18 de junio de 2008.

inferiores bajo la autovía A-40 ejecutados como túneles artificiales (1.090 metros) antes de alcanzar la sierra de Altomira, en Cuenca, que es atravesada con un túnel de 769 metros, ejecutado según el nuevo método austriaco y ya terminado. Por dificultades en el terreno, este túnel del tramo Uclés-Campos del Paraíso requirió la construcción de un pre-túnel alrededor de la excavación.

Ya en el tramo Horcajada-Naharros aparece el túnel de Horcajada, que con 3.957 metros (3.877 excavados en mina y los 80 restantes de túneles artificiales en ambas bocas) es el segundo más largo de

la línea, constituyendo la práctica totalidad del tramo. El túnel fue perforado en enero de 2009, según el nuevo método austriaco, excavando primero la zona superior de la sección, con una altura de gálibo de 6,90 metros, y luego la zona inferior, con 4,70 metros. La perforación fue realizada por dos máquinas rozadoras de 120 toneladas, una por boca, que excavaron materiales del Terciario. Ahora se procede a su revestimiento e impermeabilización.

Poco después, en el tramo Torrejuncillo-Abia de la Obispalía, se han ejecutado dos túneles artificiales: Las Higuieruelas (254 metros) y Alto del Molino (280 metros). Más adelante, en el entorno de Cuenca, se han construido sendos túneles mayores de 2.000 metros. Se trata del túnel de Cabrejas, de 2.020 metros (1.620 excavados en mina y los 400 restantes de emboquilles), que atraviesa la sierra del mismo nombre, cuya perforación acabó en abril, y de La Loma del Carrascal, de 2.198 metros (2.164 en mina y 34 de emboquilles), calado en octubre de 2008 y ya revestido. Ambos tubos, con una sección útil de 85 m², se han construido según el nuevo método austriaco, con el empleo de explosivos simultáneamente desde ambas bocas: los porcentajes de excavación mediante voladuras se situaron en el 96% en el primero y en el 80% en el segundo. Cerca del de Cabrejas se ha ejecutado otro túnel artificial, El Hoyazo (290 metros), acabado en marzo.

Antes de alcanzar Mottilla del Palancar, donde la línea de alta velocidad se bifurca en dirección a Valencia y a Albacete, se han ejecutado otros cinco tú-



neles. Se trata de El Cubillo (1.364 metros, 1.080 de ellos excavados en mina, con una sección libre de 100 m²), perforado en diciembre pasado; La Atalaya (335 metros, artificial); Lo Hueco (157 metros, artificial); Tendero (1.097 metros), y El Bosque (3.128 metros, 2.912 de ellos excavados en mina), que fue calado en junio pasado. Los dos mayores se ejecutaron según el nuevo método austriaco.

El embalse de Contreras

En Motilla del Palancar, la línea directa a Valencia se desvía hacia el este y avanza sin dificultades hasta su destino final en la capital del Turia sal-

De arriba abajo, bocas de los túneles de Hoya de Roda y Umbría de los Molinos. Centro, casi todo el trazado por el embalse de Contreras discurre por túneles y viaductos. En la imagen, túnel de Umbría de los Molinos y, a su salida, viaducto sobre el embalse.

vo en dos puntos: el embalse de Contreras y el descenso hacia la Hoya de Buñol, que incluye el paso por la sierra de la Cabrera. Ambos enclaves son importantes obstáculos geográficos con fuertes condicionantes medioambientales para el trazado ferroviario, lo que ha obligado a ejecutar en esos puntos una serie de túneles y viaductos. En total, en los 139 kilómetros de este gran tramo se han construido 15 túneles que suman 32.345 metros.

En este tramo, el trazado sigue en parte en paralelo a la autovía A-3; de hecho, esta infraestructura se cruza por debajo mediante un túnel de 746 metros cerca de

Miglanilla. En esta zona se ha excavado otro túnel de 520 metros. Al llegar a las Hoces del Cabriel, en el límite entre Cuenca y Valencia, el corredor ferroviario y carretero afronta un terreno cada vez más abrupto, modelado por los ríos en forma de profundas gargantas, que encuentra su máxima dificultad en el embalse de Contreras. Es aquí, en el tramo Embalse de Contreras-Villagordo del Cabriel, donde la línea ha afrontado uno de sus mayores retos desde el punto de vista técnico y medioambiental, como lo prueba el hecho de que 5,5 de los 6,5 kilómetros del tramo sean viaductos y túneles.

De los tres túneles aquí ejecutados, dos son notables por sus dimensiones y por estar situados en



UTE Embalse Contreras



UTE Embalse Contreras

zonas de difícil acceso. Se trata del túnel de Hoya de la Roda, de 1.997 metros, construido por procedimientos mecánicos según el método de avance, destroza y contrabóveda, que incluye una salida de emergencia a mitad de su recorrido; y el de Umbria de los Molinos, de 1.522 metros y sección útil de 85 m², construido según el nuevo método austriaco, y en el que se ha instalado vía en placa.

Con todo, el de menores dimensiones, el del Rabo de la Sartén (367 metros), es el que mayores dificultades ha entrañado al estar situado en una península de roca caliza del embalse muy cerca del túnel de la autovía A-3, del que le separan 10 metros entre hastiales, lo que condicionó su ejecución. Su perforación ha combinado retroexcavadoras con martillos hidráulicos de gran tonelaje y microvoladuras controladas para minimizar las vibraciones en el túnel carretero, utilizándose en sus emboquilles micropilotes con tubos de acero de 20 metros de longitud. Para el seguimiento de la excavación, terminada en febrero de 2008, se ha instalado un completo equipo técnico compuesto por sismógrafos para registrar vibraciones, equipos de medición de deformaciones de roca e instrumentos de auscultación en varias zonas.



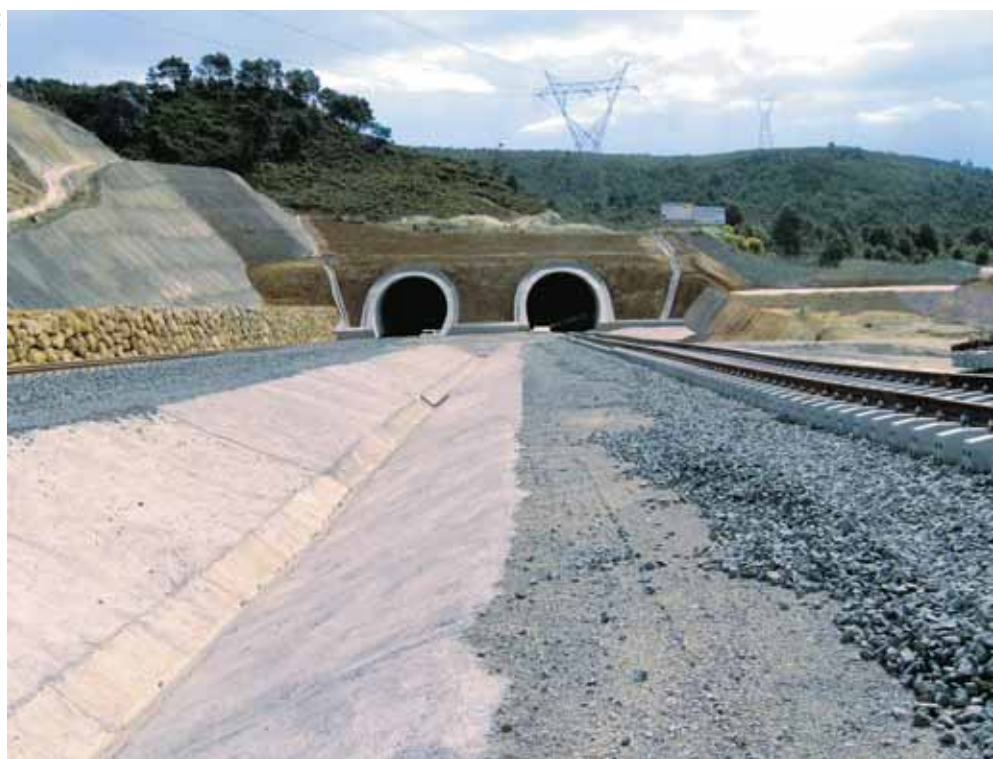
UTE Embalse Contreras

Arriba, excavación de una boca del túnel del Rabo de la Sartén separada unos pocos metros del túnel carretero de la autovía A-3. Debajo, boca opuesta del mismo túnel, ya perforado.

En el siguiente tramo, Villagordo del Cabriel-Venta del Moro, perteneciente a la misma zona geográfica, ya en Valencia, está concluido desde principios de año el túnel de Villagordo del Cabriel, de 3.108 metros (2.880 excavados en mina y 192 y 36 de emboquilles), ejecutado según el nuevo método austriaco, en el que se ha instalado vía en placa. También ha sido recepcionada la plataforma del tramo Requena-Siete Aguas, que incluye el túnel de la Rabosera, de 1.462 metros (1.350 en mina, ejecutado según el nuevo método austriaco), y un falso túnel de 290 metros.



La tuneladora que horadó los dos tubos del túnel de la Cabrera ha batido en seis ocasiones el récord mundial de avance con este tipo de máquinas, con 92,8 metros en un solo día



del tramo corresponde a tres túneles: La Cabrera (7.252 metros), Siete Aguas (424 metros, ya finalizado) y Buñol (1.858 metros).

El túnel de la Cabrera es, por su longitud, el más largo de la línea y el sexto de España. Dada su magnitud, los planificadores optaron inicialmente por emplear una pareja de tuneladoras de escudo simple para ejecutar los dos tubos de que consta, pero a la vista del buen rendimiento alcanzado por las tuneladoras de doble escudo en los túneles de alta velocidad de Guadarrama, las empresas adjudicatarias finalmente contrataron una única tuneladora de este tipo para ejecutar ambos tubos. Sería, pues, la primera ocasión en que una máquina de este tipo se empleara en la Comunidad Valenciana.

Túnel de la Cabrera

Unos 40 kilómetros más adelante en dirección Valencia aparece el segundo gran obstáculo geográfico de la línea, una zona de transición entre la llanura de Requena y la Hoya de Buñol, con un terreno montañoso cruzado por barrancos que salva una desnivel de 244 metros. Este complejo perfil orográfico de la sierra de la Cabrera, donde se construye el tramo Siete Aguas-Buñol, ha obligado a ejecutar importantes obras de ingeniería, como lo refleja el hecho de que 9,9 de sus 11 kilómetros discurren por túneles o viaductos. De hecho, el 85%

Arriba, la tuneladora 'Unax' frente a una de las bocas. Debajo, bocas del lado Madrid del túnel bitubo de la Cabrera, con las vías ya instaladas.

El ataque al macizo de la Cabrera se inició por métodos convencionales desde las dos bocas del lado Madrid en octubre de 2006, desde donde se debían construir 1.157 metros por tubo, así como otros 93 metros de tubo artificial en ambas bocas, quedando reservada para la tuneladora la excavación de unos 6.000 metros por tubo. La tuneladora S-373, fabricada expresamente en Alemania para esta obra, entró en acción el 27 de julio de 2007 desde una boca del lado Valencia, perforando en un diámetro de 8,75 metros la roca que encontraba a su paso, básicamente materiales carbonatados (calizas, dolomías y marcocalizas). Desde el inicio se constató que la tuneladora, bautizada con el nombre de *Unax*, se



Sando-FCC

Interior de uno de los tubos del túnel de la Cabrera, con la vía en placa ya instalada. Izquierda, traslado de dovelas de hormigón para revestimiento del túnel.

adaptaba perfectamente al terreno, y su rendimiento fue tan elevado que comenzó a batir récords mundiales de avance, pasando de los 65,6 metros por día a los 83,2 metros en este tubo, que fue calado el 24 de enero de 2008. *Unax* había invertido, pues, seis meses en perforar los 6.000 metros del primer tubo, batiendo hasta cuatro veces el récord mundial de avance.

En el segundo tubo, donde *Unax* comenzó a perforar el 2 de mayo, los rendimientos fueron aún superiores, logrando excavar hasta 92,8 metros y colocar 58 anillos en una sola jornada, cifras que establecían el récord mundial vigente de avance con este tipo de tuneladoras. El calado del segundo tubo con los trabajos por métodos convencionales se produjo el 25 de septiembre de 2008, por lo que la tuneladora empleó cuatro meses y medio en perforarlo.

Una vez calados los dos tubos se inició una nueva fase, consistente en la ejecución de soleras, andenes y aceras como paso previo al montaje de la vía en placa. Asimismo, se ultima el revestimiento de las galerías de interconexión entre tubos, excavadas cada 400 metros durante el avance de la tuneladora. En marzo de 2009 concluyó el montaje de las vías en uno de los tubos, esperándose la próxima instalación en el segundo, como paso previo a la instalación de la catenaria y de los sistemas de seguridad y comunicaciones en esta gran infraestructura subterránea.

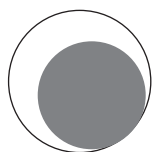


Comsa



En el tramo asiguiente, Buñol-Cheste, se ha concluido ya otro túnel, el de Chiva, de 663 metros de longitud. Y ya cerca de Valencia, en el tramo Aldaia-Picanya, se ha construido otro túnel singular, el de Torrent, que con sus 2.290 metros de longitud es el subterráneo ferroviario artificial

Otros túneles del Corredor de Levante



El Corredor de Levante incluye, además de la línea a Valencia por Motilla del Palancar, otros itinerarios en los que se han construido, se construyen o se construirán una docena túneles que suman más de 12.000 metros.

Así, en el recorrido entre Fuentes y Albacete, se han ejecutado el túnel de Los Cubillos (1.500 metros), en Cuenca, y otros dos más en el recorrido Villagordo del Júcar-La Gineta, de 640 y 208 metros.

El importante nudo de la Encina, donde la línea procedente de Albacete se bifurca hacia Valencia y hacia Alicante, incluye en el

subtramo Nudo de la Encina-Mogente, adjudicado en diciembre, el nuevo túnel de Mogente (885 metros) y la adecuación para doble vía del túnel de Santa Bárbara, que ampliará su sección de 27 a 75 m². Y en el recorrido entre Xátiva y Valencia, ya recepcionado, se ha construido un doble tubo a la altura de L'Enova con 728 metros para la línea de ancho UIC y 739 metros para la vía de ancho ibérico.

En la provincia de Alicante, en la línea procedente de La Encina están finalizados ya los túneles de Las Barrancadas (2.890 metros y sección libre de 120 m²), ejecutado según el nuevo método austriaco en el tramo Sax-Elda, y de Las Águilas (1.231 metros, con una sección

libre de 95 m²), del tramo Monforte del Cid-La Alcoraya, además del túnel de la Serreta Larga (333 metros), del tramo La Alcoraya-Alicante. Y en la capital provincial, a la primera fase del soterramiento de vías mediante muros pantalla (770 metros, terminada en 2005), se sumará, tras su licitación, la segunda fase, consistente en otro tramo de 1 kilómetro parcialmente soterrado hasta la estación.

En dirección a Murcia, a mediados de 2008 se adjudicaron tres tramos entre Monforte del Cid y El Carrús donde se construyen los túneles de La Temerosa (485 metros), Murón (1.730 metros) y Elche (1.288 metros), a ejecutar por medios convencionales.



más largo de España. Este falso túnel atraviesa el barranco de Torrent y discurre bajo la carretera entre Torrent y Alaquás, que tuvo que cortarse para su ejecución. Se ha construido primero mediante la ejecución de una profunda trinchera y luego colocando la bóveda y la contrabóveda (suelo), por medio del procedimiento de bóveda ejecutada in situ. El falso túnel tiene una altura de 9,2 metros y una sección de 110 m².

Soterramiento en Valencia

La llegada de la alta velocidad a Valencia supondrá la remodelación de la red arterial ferroviaria de esta ciudad, una actuación en marcha de una enorme complejidad técnica, con una importante vertiente urbanística, que prevé el soterramiento por medio de falsos túneles de la mayor parte de las líneas férreas, en superficie desde el siglo XIX. Esta operación liberará una enorme cantidad de suelo para futuros equipamientos y permeabilizará la trama urbana, hasta ahora dividida por las líneas del tren.

El futuro trazado se inicia una vez superado el cauce antiguo del Turia, al suroeste de la ciudad, y discurre hasta la estación provisional, de ubicación céntrica, a través de dos tramos: el Nudo Sur, donde conectarán las líneas de alta velocidad procedentes de Cuenca y Alicante con otras convencionales, y el canal de acceso, dividido en dos fases,

Página opuesta, dos momentos del proceso constructivo del falso túnel de Torrent, primero con el tubo ya ejecutado y luego recubierto. Sobre estas líneas, construcción en una trinchera de los túneles artificiales del Nudo Sur de Valencia.

que conduce hasta la estación. La mayor parte de este trayecto discurrirá bajo tierra.

En el Nudo Sur, de 1.710 metros de longitud, la traza discurrirá entre el tanatorio y el bulevar sur mayoritariamente por debajo de las actuales vías de penetración, y lo hará durante 1.094 metros en túnel artificial y durante los 616 metros restantes en superficie, albergando en el futuro subterráneo hasta seis líneas (dos de ancho UIC, dos de ancho ibérico y dos de mercancías de ancho mixto) en dos niveles para separar los tráficos según los anchos de vía. En este tramo, adjudicado en junio de 2007, se trabaja ya en la construcción de los muros-pantalla laterales de hormigón armado, de una profundidad media de 20 metros y un espesor de 1 metro, sobre los que se colocará la losa (bóveda) del futuro túnel, para después excavar en su interior y recubrirlo.

El canal de acceso, de 1.500 metros de longitud, situado en la avenida García Lorca entre el bulevar sur y la estación provisional, contempla también el soterramiento con muros pantalla y cubierta de losa de la mayor parte de la traza, por debajo de las líneas actuales. En este tramo, ya adjudicado, que se ejecuta en dos fases, también habrá un doble nivel en los túneles, el superior para las vías de ancho UIC y el inferior para las convencionales. Recientemente se han iniciado los trabajos para construir los muros pantalla perimetrales de los futuros túneles que llevarán hasta la estación provisional del AVE. ■



El túnel del Pertús, entre España y Francia, es con sus 8,3 kilómetros por tubo el más largo de la línea entre Madrid y la frontera gala.

La construcción de subterráneos en la línea Madrid-Barcelona-Francia

Buscando la frontera

La línea de alta velocidad Madrid-Barcelona-frontera francesa, que actualmente ejecuta su último tramo entre la Ciudad Condal y Figueres, encuentra a su paso obstáculos montañosos y travesías urbanas que ha sido o será preciso salvar por medio de túneles. Cuando esté acabado, este corredor de 804 kilómetros tendrá 94 túneles, entre los que destaca el del Pertús, que cierra la línea salvando los Pirineos.



TP Ferro



TP Ferro



TP Ferro

JOSÉ IGNACIO RODRÍGUEZ

El 20 de febrero de 2008 se inauguraba la línea Madrid-Barcelona (664 kilómetros) del Corredor Nordeste de alta velocidad. Este corredor, que enlazará Madrid con la frontera francesa en 2010 mediante un *by pass* provisional y en 2012 de forma definitiva, ha terminado el tramo Figueres-Perpiñán y ejecuta actualmente el último, Barcelona-Figueres, para su conclusión final. Cuando eso ocurra, se habrá completado un trazado de 804 kilómetros en cuyo recorrido se habrán construido 94 túneles que suman un centenar de kilómetros.

De los que están en servicio, los más importantes por su magnitud son los de Paracuellos (4.672 me-

tros), Tenor Fleta (4.056 metros), Las Hechiceras (2.835), Bubierca (2.433 metros) y Sagides (1.821 metros), situados entre Madrid y Zaragoza, así como los accesos a Barcelona (que suman 9 kilómetros), aunque el más largo de todos es el que finaliza la línea al otro lado de la frontera francesa, El Pertús (8.300 metros por tubo). A ellos se unirán los que actualmente se construyen en el tramo Barcelona-Figueres, entre ellos la futura conexión urbana de Sants y La Sagrera (5.640 metros), el falso túnel entre La Sagrera y el nudo de la Trinitat (4.240 metros), el de Montcada (3.709 metros) o los túneles urbanos de Girona (2.861 metros entre los dos). A continuación se detalla el proceso constructivo de algunos de estos túneles ya en servicio.



Túnel de Sagides

El subtramo Arcos de Jalón-Santa María de Huerta, de 14,7 kilómetros, que discurre por los términos de Arcos de Jalón y Santa María de Huerta (Soria), presenta un perfil longitudinal muy abrupto, principalmente en los 9 primeros kilómetros, lo que obligó a construir el túnel de Sagides, de 1.821 metros de longitud. En realidad, todo el trazado está surcado por arroyos que nacen en las sierras Ministra y de Chaorna, entre ellos el arroyo Madre de Sagides; además, las cotas del terreno varían entre la 1.196 metros al inicio y la 900 al final del tramo.

De la longitud total del túnel, solo 1.731 metros son perforados, con recubrimiento medio de 53 metros, un máximo de 73 y un mínimo de 32 metros con pendiente uniforme de 25 milésimas. La sección libre del túnel es la necesaria para que los trenes puedan circular a la velocidad prevista. Para la longitud de este túnel, la condición determinante es la de seguridad/salud, cuando en su interior se cruzan dos trenes de 400 metros de longitud a 350 km/h, suponiendo que el sistema de estanqueidad de un tren está averiado. Con esas hipótesis, la sección libre necesaria es de 100 m².

La sección tipo adoptada tiene un radio de 6,86 metros interior y centro en el eje del túnel, a 1,83 metros sobre la cota de raíles. El ancho resultando, a cota de raíl, es de 13,223 metros.

El túnel atraviesa terrenos jurásicos y miocenos, con estratificaciones subhorizontales. Los materia-



Tuneladora 'Tramontana', que ejecutó uno de los tubos del Pertús. Debajo, túnel de Paracuellos, primero construido en España con tuneladora-ensanchadora.

les son de alternancias duras y blandas, de tipo calcáreo o conglomerados y areniscas en las bocas oeste y este, respectivamente, lo que planteó el arranque mediante voladuras. En su parte central se atraviesan terrenos de arcillas y yesos arcillosos, que por sus características de poca competencia y cohesión se perforaron mediante rozadoras previa ejecución de paraguas de emboquille y viga de atado de los mismos.



El sostenimiento básico es autoportante mediante cerchas (TH-29), gunita y hormigonado de clave en una primera fase, así como contrabóveda de hormigón en las secciones que las convergencias y tipología del terreno indiquen su necesidad para evitar también subpresiones en solera.

La impermeabilización se ha llevado a cabo mediante una lámina de PVC y una lámina geotextil drenante interpuestas entre el sostenimiento y el revestimiento del túnel, y, finalmente, el túnel se ha revestido de hormigón con un espesor de 30 centímetros.

Túnel de Paracuellos

El subtramo Calatayud-Ricla atraviesa la sierra de la Cocha, en el Sistema Ibérico, lo que ha obligado a realizar desmontes y túneles para poder superar los importantes y frecuentes accidentes geográficos que crean los numerosos valles, sierras y ríos transversales al trazado de la línea proyectada, como es el caso del túnel de Paracuellos, de 4.672 metros de longitud, cuya boca sur se encuentra en el término municipal zaragozano de Calatayud, a unos 6 kilómetros de la estación, y la boca norte en el término de Paracuellos de la Ribera.

Este tramo es el que más dificultades ha causado desde el punto de vista constructivo por causa de las malas condiciones del terreno. Sus 32 kilómetros de longitud incluyen nueve túneles, como el de Marivella, de unos 580 metros de longitud y 7 metros de radio de bóveda.

De los 94 túneles de la línea Madrid-Barcelona-Frontera francesa, el de Paracuellos es actualmente el más largo, teniendo en cuenta que el del Pertús discurre en gran parte en territorio francés y que la conexión Sants-La Sagrera no está construida, y es el primero en España donde se ha utilizado una máquina tuneladora-ensanchadora para su construcción. La longitud de perforación fue de 4.635 metros, a los que hay que sumar el falso túnel de la boca sur (lado Calatayud), lo que totaliza 4.740 metros. Esto lo ha convertido durante años en el túnel más largo del tramo total del AVE y en el segundo de Es-



El recorrido entre Madrid y Zaragoza incluye más de 20 túneles, que datan de 2003.

paña en el conjunto de túneles ferroviarios, tan sólo superado por el del Padornelo, de la línea Madrid-A Coruña.

El túnel de Paracuellos tiene su boca sur a la cota 574, asciende a 577 (0,8%) y desciende luego con el 1.65% hasta la boca norte situada a la cota 522. En planta representa una curva de radio 7.050 metros, adecuada para una velocidad de recorrido de 350 km/h. La sección libre, de 74.15 m², es circular, con un diámetro de 11.64 metros, con lo que la sección mínima de excavación fue de 100 m².

El túnel discurre por materiales pertenecientes al Precámbrico y Paleozoico (Cámbrico). Gracias a la galería piloto que se realizó, se observó una intensa fracturación de los materiales, que habían ocasionado hasta 40 fallas atravesadas por el túnel. La sucesión estratigráfica del Precámbrico aflora en la boca norte, tratándose de una unidad fundamentalmente pizarrosa, que recibe el nombre de pizarras de Paracuellos, que, dadas sus características grafi-



tosas, generó serias dificultades para su sostenimiento mediante enfilajes de paraguas, cerchas pesadas, bulones de 4 metros, mallazo de acero y hormigón proyectado con espesores de hasta 50 centímetros.

Proceso constructivo

El sistema de excavación se acomodó a las características del terreno, de mala calidad, con tiempos cortos de estabilidad que exigieron el uso de excavadoras de ataque puntual con martillo (ITC), con pases inferiores a 1 metro y avance en dos fases con la colocación de cerchas TH en cada una. En las zonas con roca dura, se excavó mediante perforación y voladura, en avance y destroza o a sección completa, con *jumbo* robotizado por la boca sur.

Mención especial merece la excavación realizada con TBM de roca dura de la galería piloto por la boca norte, la cual sirvió para los pertinentes estudios geológicos y como guía de la otra TBM ensanchadora de roca dura, que amplió la excavación a sus dimensiones proyectadas.

La excavación de la galería piloto se inició por ambas bocas a primeros de marzo de 1997, después de abrir las bocas por métodos convencionales de avance y destroza, y se caló en septiembre de 1998. Esta perforación, de 4,7 metros de diámetro, sirvió de guía, desagüe y ventilación para los trabajos pos-

Un tren AVE se dirige hacia la boca del túnel de Savinán, en Zaragoza.

teriores de ensanche y para el reconocimiento del terreno. El trabajo total de la microtunneladora fue de 3.465 metros excavados, una parte de los cuales se realizaron por métodos convencionales con excavadora ITC a sección completa.

Desde la boca norte, y en una longitud proyectada de 509 metros, se comenzó el ensanche de la galería piloto por métodos convencionales con arranque mecánico, debido a la mala calidad de las pizarras del terreno. La excavación se protegió con un paraguas de micropilotes en la bóveda y hastiales, y el sostenimiento se completó con hormigón proyectado vía húmeda con espesores mínimos de 20 centímetros y armado con fibra metálica.

En febrero de 1999 se iniciaron los trabajos de ensanche con la TBM. Tras el paso de la tuneladora-ensanchadora, de más de 12 metros de diámetro

y 650 toneladas de peso, el túnel quedó prácticamente finalizado, con sostenimiento, contrabóveda, drenaje y relleno de la parte inferior hasta la cota del subbalasto, con un rendimiento medio de avance de 250 metros/mes. Y

La línea de alta velocidad Madrid-Barcelona-Francia incluye a lo largo de sus 804 kilómetros un total de 94 túneles de diversas dimensiones

tras el paso de la TBM se realizaron las tareas de impermeabilización, con la colocación de la lámina de PVC y la lámina drenante según zona. Finalmente se procedió al hormigonado interno.

Túnel de Las Hechiceras

El subtramo V del tramo Zaragoza-Lleida, de 20 kilómetros entre Cadasnos y Ballobar, presenta un único túnel, el de Las Hechiceras, en el término municipal oscense de Ballobar, a unos 25 kilómetros al oeste de Lleida.

Tiene una longitud de 2.937 metros, de los que unos 90 metros son en falso túnel (69,7 en la boca de Zaragoza y 19,7 en la de Lleida). Unos 35 metros presentan una estructura en voladizo o pico de flauta (18 y 17 metros en cada boca, respectivamente) y 2.812 metros en túnel propiamente dicho.

La sección transversal de excavación fue de 100 m², que, una vez revestida, se redujo a 80 m², lo que permite una capacidad de dos vías de ferrocarril más dos aceras de servicio, una a cada lado, y una pendiente uniforme del 2% en sentido Lleida.

Las obras se iniciaron en mayo de 1997 por la boca de Lleida y en agosto por la de Zaragoza, con lo que los trabajos de avance finalizaron en febrero de 1998 y los de destroza a mediados de agosto de ese mismo año, mientras que los trabajos de impermeabilización, el hormigonado del revestimiento y soleras concluyeron a mediados de 1999.

El trazado del túnel penetra por una estratificación horizontal de diferentes espesores, formada por areniscas poco cementadas, arcillas y margas arcillosas, calizas y margocalizas tableadas, margocalizas con yesos y margas compactas. La mayoría de los materiales son impermeables, por lo que los problemas relacionados con el agua han sido escasos.



Arriba, túnel de Las Minas, de 326 metros, en Morés (Zaragoza). Debajo, boca del túnel de Las Hechiceras, de 2.937 metros, en Ballobar (Huesca).

La excavación del túnel se abordó desde las dos bocas a la vez en dos fases: avance o calota, de 50 m² de sección, y con una destroza de la misma superficie de sección en una sola fase. La totalidad de la excavación se efectuó por medios mecánicos mediante dos minadores continuos de ataque puntual. En el avance, el pase medio fue de 4 metros, cerrándose el ciclo en 12 horas. La destroza, por su parte, fue de 5 metros y el sostenimiento se realizó mediante hormigón proyectado.



Trayecto bajo tierra en Cataluña

Si el largo tramo entre Madrid y Lleida (481 kilómetros) presenta en su trazado 28 túneles cuya longitud suma casi 26 kilómetros, los dos siguientes tramos de la línea, Lleida-Tarragona y Tarragona-Barcelona (que totalizan 189 kilómetros), registran una proporción muy superior, ya que en su recorrido se han construido un total de 37 túneles que totalizan 27 kilómetros de longitud.

Hasta alcanzar la Ciudad Condal, los túneles más largos en suelo catalán son los de Lilla (2.065 metros), La Riba (1.971 metros) y el bitubo de Serra Llarga (1.802 y 1.794 metros), destacando por su dificultad añadida los tres de Montblanc, donde el hinchamiento de la solera debido a la presencia de materiales expansivos obligó a reforzarlos con un revestimiento de hormigón. Pero la actuación más compleja, debido a que es un trazado urbano y a que hubo que compatibilizar las obras con las circulaciones de ancho convencional, ha sido el acceso soterrado a Barcelona. Este tramo ha requerido la construcción de un recorrido urbano de 12,5 kilómetros que discurre en su mayor parte bajo tierra (unos 9 kilómetros), por un trazado que sigue la línea convencional hasta la estación de Sants, destino final actual de la línea procedente de Madrid.

En este recorrido periurbano se han construido sendos túneles de 2,3 y 1,8 kilómetros, respectivamente, en los tramos Sant Joan Despí-Sant Boí de Llobregat (4,1 kilómetros de longitud) y Sant Boí-L'Hospitalet de Llobregat (3,7 kilómetros), ejecutados por métodos convencionales. Entre L'Hospi-

Un tren AVE sale de un túnel de la línea en Zaragoza. Debajo, la tuneladora que perfora el túnel en Montcada i Reixac, a la salida de Barcelona.

talet y La Torrassa se construyó un falso túnel entre pantallas de 2,7 kilómetros, que conecta con el último tramo totalmente subterráneo, un túnel de 1,8 kilómetros, construido parte en mina y parte entre pantallas, que atraviesa en su recorrido final bajo las líneas de Cercanías hasta su destino en la remodelada estación de Sants.

A partir de esta estación se construye actualmente el que será el último gran tramo de la línea entre Barcelona y Figueras, de 132 kilómetros, que





En la ciudad de Barcelona, al recorrido soterrado hasta Sants, ya en servicio, se unirá un nuevo túnel urbano de 5,4 kilómetros hasta la estación de La Sagrera

Arriba, uno de los túneles urbanos de acceso a Barcelona. Debajo, carro para refuerzo del revestimiento ante la boca de uno de los túneles de Montblanc, en Tarragona.

incluye la mayor proporción de túneles de todo el recorrido desde Madrid, ya que aquí se están ejecutando un total de 26 subterráneos que sumarán más de 34 kilómetros. Destaca especialmente por su complejidad el tramo urbano soterrado por Barcelona y su salida norte.

El túnel más emblemático es el que conectará las estaciones de Sants y La Sagrera, en un recorrido de 5,6 kilómetros de longitud bajo el subsuelo urbano barcelonés. La obra, adjudicada por 179,3 M€ y un plazo de 35 meses, será ejecutada por la tuneladora *Barcino*, fabricada en Alemania, que deberá horadar próximamente un terreno formado por arena, grava y arcilla dura.

En el tramo contiguo, La Sagrera-Nus de la Trinitat, se está ejecutando un falso túnel entre pantallas de hormigón de 4,2 kilómetros de longitud. Y en el siguiente, Nus de la Trinitat-Montcada, otra tuneladora ha comenzado ya a perforar otro largo túnel a la salida de Barcelona, entre Fonte Freda y Montcada i Reixac, que tendrá 3,9 kilómetros (692 metros se ejecutarán mediante pantallas).

En el recorrido hasta Girona se construyen actualmente 14 subterráneos según el nuevo método austriaco. En Girona está previsto el próximo inicio de la construcción de dos túneles urbanos, Girona I y Girona II, de una longitud conjunta de 3,6 kilómetros, que serán perforados por la tuneladora *Gerunda*, diseñada en Alemania. El recorrido hasta Figueres, donde enlazará con el tramo final Figueres-Perpiñán, ya ejecutado, incluye otros ocho túneles en construcción, destacando los de Sarrià (3.042 metros) y Les Cavorques (2.939 metros).





Túnel del Pertús

El 23 de noviembre de 2007, la enorme tuneladora *Tramontana* completaba en suelo francés la perforación de uno de los dos tubos, de 8,3 kilómetros de longitud, del túnel del Pertús a través del Pirineo catalán. El otro tubo había sido perforado un mes antes, después de que las obras se iniciaran en el mes de julio de 2005.

Los Gobiernos español y francés adjudicaron a TP Ferro (participada al 50% por las constructoras ACS y Eiffage) en diciembre de 2003 la concesión para el proyecto, construcción, explotación y mantenimiento de la sección internacional Figueres-Perpiñán de una nueva línea ferroviaria de alta velocidad entre España y Francia por un periodo de 50 años, plazo que incluía los cinco años para su cons-

Trabajos preparatorios para la perforación del túnel del Pertús en la vertiente española.

El tramo del túnel transfronterizo del Pertús es el primer proyecto de ferrocarril financiado con participación privada en España

trucción. Se trataba del primer proyecto de ferrocarril financiado con participación privada en España y el segundo en Europa.

Los orígenes de este proyecto se remontan a las cumbres comunitarias de Corfú y Essen en 1993 con la aprobación de los 14 proyectos prioritarios de la Red Transeuropea de Transportes.

La terminación del tramo, realizada a principios de 2009, ha marcado un hito en la historia de las comunicaciones transfronterizas. Por primera vez, dos redes ferroviarias que hasta la fecha tenían distinto ancho han quedado conectadas directamente, sin necesidad de trasbordo o cambio de ancho. La línea Figueres-Perpiñán tiene, además, una dimensión europea de gran calado, pues va a permitir la conexión de las redes ferroviarias de alta velocidad española y francesa. Y, a través de esta última, el enlace de la península Ibérica con el resto de Europa.

El proyecto ha consistido en la construcción de una nueva línea de alta velocidad en ancho internacional UIC (1.435 mm) en doble vía entre Figueres y Le Soler (cerca de Perpiñán) de aproximadamente 44,4 kilómetros de longitud (19,8 kilómetros en



TP Ferro

España y los 24,6 restantes en Francia) apta para el tráfico mixto de trenes de viajeros y mercancías y sus conexiones en vía única con la red clásica existente en Le Soler.

El diseño del trazado se ha realizado con parámetros propios de una velocidad máxima de circulación de 350 km/h y una velocidad mínima de 200 km/h para los trenes de viajeros, mientras se establece una velocidad mínima de circulación para los trenes de mercancías de 120 km/h.

8,3 kilómetros bajo tierra

El túnel del Pertús, de 8,3 kilómetros de longitud (7,3 kilómetros en Francia y 1 kilómetro en España), es la obra más significativa del tramo que permitirá franquear los Pirineos. Consta de dos tubos paralelos independientes, uno para cada sentido de la circulación, con una sección interna de 8,50 metros de diámetro. La infraestructura cuenta con los últimos avances en materia de seguridad, entre ellos la existencia de 41 galerías de comunicación entre tubos provistas de puertas cortafuegos, situadas cada 200 metros, y cuatro galerías destinadas a equipamientos, espaciadas a 1.600 metros.

Su construcción se ha realizado mediante sendas tuneladoras de doble escudo telescópico (TBM) de última generación —con un diámetro de 9,96 metros cada una, un peso de 2.300 toneladas y una longitud de más de 150 metros— especialmente diseñadas para excavar las rocas de esta parte del Pirineo.



TP Ferro

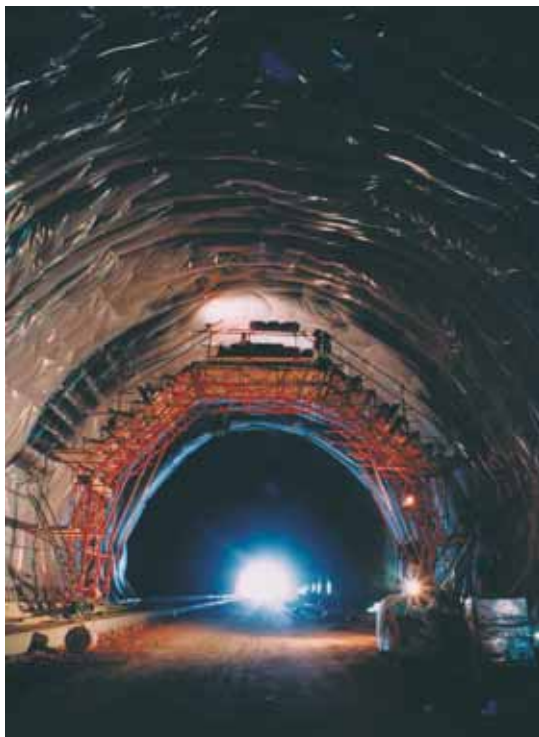
Los túneles del Pertús tienen una sección circular interna de 8,5 metros, y cuentan con 41 galerías de conexión entre tubos.

El diseño de las tuneladoras, realizado de acuerdo con las condiciones geológicas detectadas, ha permitido mantener unos ritmos de avance de la excavación elevados y superar las zonas conflictivas con el mínimo retraso. El ataque se realizó desde la boca sur, en el lado español, donde se disponía de un buen acceso y una amplia plataforma donde ubicar las instalaciones que este tipo de máquinas requieren.

Asimismo, se construyó una galería de acceso intermedio de 445 metros de longitud para acceder



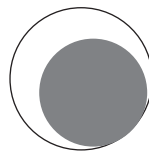
ellos la vía en placa de hormigón, que permite un fácil acceso a los servicios de auxilio, la instalación en el túnel de todos los equipamientos de seguridad recomendados por las comisiones de seguridad (detectores, opacímetros, bocas de agua, ventilación), la utilización del sistema de señalización ERTMS nivel 1 con redundancia de los equipamientos de control (puesto de control central en Barcelona y puesto de control local a la entrada del túnel) y de la alimentación de energía para los sistemas de seguridad, instalación de detectores de “cajas calientes”, planos en las ruedas, gálibos y



Túnel falso a la salida de uno de los tubos del Pertús. Debajo, trabajos de revestimiento e impermeabilización de una de las galerías.

pantógrafos, que permitirán detener los trenes antes de que entren en el túnel y la adaptación de las embocaduras de los túneles para reducir los efectos del boom sónico de los trenes.

Cada una de las bocas del túnel dispone de instalaciones de auxilio, con accesos directos, aparcamientos, helipuertos y zona de cruce de vía, así como de un sistema de control de intrusión. En el diseño de la línea se ha considerado además la influencia de los vientos cruzados, disponiéndose una estación meteorológica. ■



Estructuras singulares

Con una longitud total de 44,4 kilómetros de trazado (repartidos entre España 17,8 kilómetros y Francia 24,6 kilómetros), los elementos más significativos del tramo de alta velocidad Figueras-Perpiñán, además del túnel del Pertús, son:

- 2.228 metros de los 6 viaductos en España.
- 983 metros de los 4 viaductos en Francia.
- Dos falsos túneles de 180 y 189 metros de longitud.
- El 'salto de carnero' para inversión del sentido de circulación, que consiste en un cruce de las dos vías a desnivel, que permitirá a los trenes circular por la derecha en España y por la izquierda en Francia.
- 14 puentes ferroviarios y 11 puentes carreteros.
- 9 pasos inferiores y 61 obras de fábrica hidráulicas.
- Las dos vías sencillas de enlace en Perpiñán, de 2,9 y 4,6 kilómetros.

a la zona central de los túneles y construir una galería paralela a los mismos, de 1.100 metros de longitud, para reconocimiento y eventual tratamiento del terreno en la zona más complicada desde el punto de vista geotécnico.

El túnel del Pertús concentra las mayores medidas y dispositivos de seguridad del tramo, entre



Túneles de Guadarrama, Pajares, San Pedro y A Madroa, los cuatro grandes de España

Colosos del noroeste

Las líneas que extenderán la alta velocidad por el cuadrante noroeste peninsular, la mayoría de ellas en construcción, incluyen los mayores túneles ferroviarios de España, dos de ellos ya en servicio. Por encima de todos brillan los tubos dobles de Guadarrama y Pajares, con 28 y 24 kilómetros de longitud por galería respectivamente, lo que convierte a estos hitos de la ingeniería nacional en los subterráneos ferroviarios más largos de España y entre los mayores del mundo. Otros dos túneles notables en ambos extremos de este cuadrante son los de San Pedro, en la línea Madrid-Valladolid, y A Madroa (en ejecución), en el Eje Atlántico.

RAQUEL SANTOS

El Corredor Norte-Noroeste de alta velocidad comenzó a extenderse desde el centro peninsular en 2007, con la puesta en servicio de la línea Madrid-Segovia-Valladolid, y ahora progresa en dirección norte para enlazar con el País Vasco, Asturias y Galicia. En esta progresión, el Corredor ha superado ya un importante obstáculo geográfico, el Sistema Central, que desde 1850 ha lastrado las comunicaciones ferroviarias entre el centro y el norte peninsular, y ahora está próximo a doblar otra gran barrera montañosa, la cordillera Cantábrica, que también ha sido durante décadas un freno para el tren entre la Meseta Central y Asturias.

Superar estos relevantes obstáculos geográficos ha sido un gran desafío para la ingeniería española. No obstante, el empleo de la tecnología punta de principios del siglo XXI, como son las tuneladoras de última generación, ha conseguido lo que no fue posible, o lo fue a duras penas, para los ingenieros del siglo XIX: la perforación de los otrora cuasi-invencibles macizos montañosos para construir los dos principales túneles ferroviarios españoles de alta velocidad, los de Guadarrama y Pajares, cuya longitud –28 y 24 kilómetros, respectivamente– los sitúa entre los mayores del mundo. Las tuneladoras, un procedimiento constructivo empleado para ejecutar túneles de más de 6 kilómetros, también han participado, o participan, en la construcción de otros dos relevantes túneles del cuadrante noroeste, los de San Pedro y A Madroa.

A continuación se repasa la historia y las circunstancias de la construcción de estos cuatro grandes túneles ferroviarios de alta velocidad, dos de los cuales ya están en servicio y otros dos en distintas fases de ejecución.





Trabajos en el interior de uno de los tubos de Guadarrama, los más largos de España.



Túneles de San Pedro

Este túnel bitubo, incluido en el tramo Colmenar Viejo-Soto del Real (Madrid) de la línea de alta velocidad Madrid-Valladolid, atraviesa por su base el cerro de San Pedro, primer obstáculo de envergadura del Corredor Norte/Noroeste antes de afrontar la sierra de Guadarrama. Para cruzar este cerro se proyectaron dos tubos paralelos para vía única, interconectados entre sí por 21 galerías, con una longitud total de 8.569 metros (túnel Este) y 8.545 metros (túnel Oeste), respectivamente, separados 30 metros entre ejes, con un presupuesto de 268,4 M€. Se trataba de una gran obra de ingeniería —eran los terceros túneles más largos de España—, rematada por dos largos viaductos a la salida de cada una de las bocas, que quedó desde el inicio en un segundo plano ante la magnitud de los grandes túneles que se construían al mismo tiempo a apenas 5,5 kilómetros de distancia en Guadarrama.

La perforación de ambos tubos, adjudicada a OHL y a la UTE San Pedro-Túnel Este (Sando, Tapusa, Copasa, Aldesa), fue encomendada a dos tuneladoras de escudo simple, que excavan el terreno y dan paso a la ejecución de un sostenimiento convencional antes de impermeabilizarlo y revestirlo de hormigón. La selección de este tipo de tuneladoras obedeció, en gran medida, al estudio geológico-geotécnico del macizo, que preveía un terreno con rocas plutónicas (granitoides) y metamórficas (or-

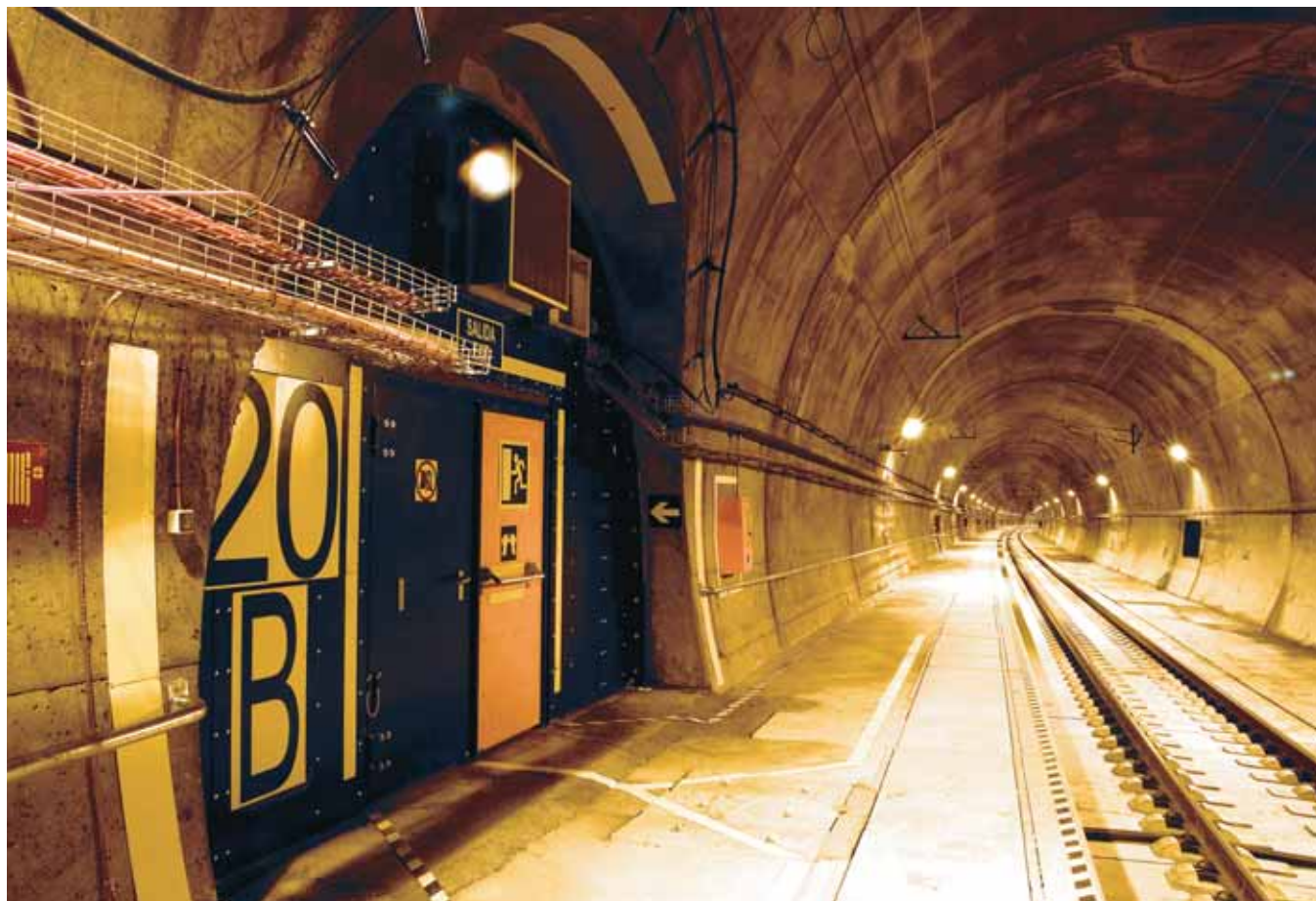
Un AVE S 102 se dispone a entrar por una de las bocas de los túneles de San Pedro, en el lado Colmenar Viejo, en diciembre de 2007.

togreiss y metasedimentos) fracturadas, con una falla a mitad del trazado, y un terreno a excavar que en el 60% era de muy mala o mala calidad. Su misión: excavar sendos tubos de sección circular con un diámetro de excavación de 9,45 metros y una sección libre de 52 m², con un trazado en planta desarrollado con curvas de radio mínimo de 5.350 metros, que habrían de salvar un desnivel entre bocas de 168 metros, lo que arroja una pendiente constante en dirección sur-norte de 17,65 milésimas.

Después de meses de preparativos, las tuneladoras iniciaron su ataque desde la boca sur (lado Colmenar Viejo) en marzo de 2005. Desde los primeros metros de excavación encontraron roca en muy mal estado, con la formación de cavernas y derrumbes frecuentes, ralentizando su avance, con rendimientos inferiores a 100 metros/mes. En el mes de julio, a las dificultades en la excavación y a las complicadas perspectivas de mejora del rendimiento se sumó el atrapamiento de la tuneladora del

tubo Oeste cuando llevaba unos 500 metros excavados, al encontrar roca más degradada de lo previsto que no ofrecía un grado suficiente de resistencia a la máquina. Los primeros intentos por rescatarla no tuvieron

La excavación de los túneles de San Pedro, iniciada con tuneladoras, se completó con el nuevo método austriaco



OHL

éxito, y su atrapamiento se revelaría finalmente como irreversible.

Todas estas circunstancias aconsejaron la elaboración de nuevos estudios que definieron un nuevo perfil geológico-geotécnico del macizo, con presencia generalizada de fallas y una fracturación mucho más intensa que la hasta entonces prevista. A la vista de esta realidad, los responsables de la obra decidieron replantear toda la estrategia de excavación y adoptar una nueva, teniendo en cuenta que el tiempo jugaba en contra. Como primera medida, se abrieron dos frentes de excavación por métodos convencionales –perforación y voladuras– desde la boca norte (lado Soto del Real). Paralelamente, se excavó otra galería de emergencia de 400 metros hasta el tubo Oeste para liberar la tuneladora y abrir desde allí otro frente de excavación por métodos convencionales hacia el norte. Finalmente, a principios de 2006 se construyó una galería de acceso intermedio de 860 metros de longitud, situada hacia la mitad de los dos tubos, desde la que se abrieron en cada tubo dos frentes de excavación, hacia el norte y hacia el sur. De esta forma, a partir de junio de 2006 se inicia una nueva fase en la excavación de los túneles, con cuatro frentes por tubo (siete por el nuevo método austriaco y el octavo con tuneladora), con la que se esperaba recuperar el tiempo perdido.

En el tubo Este, la única tuneladora en servicio, técnicamente adaptada a la nueva realidad del terreno, continuó su avance de forma irregular, pri-

Los túneles de San Pedro están equipados con importantes medidas de seguridad. Arriba, salida de emergencia. Debajo, impermeabilización y revestimiento de uno de los tubos.

mero con lentitud y luego, a medida que mejoraba un terreno reforzado previamente con inyecciones de consolidación, con mayor celeridad, alcanzando rendimientos de hasta 428 y 426 metros en marzo y abril, respectivamente. En noviembre, tras perforar casi 3.000 metros de túnel, se encontró con el frente realizado por métodos convencionales desde la boca intermedia. El resto del trabajo en este tubo desde la boca norte se ejecutó según el nuevo método austriaco.



OHL



En el tubo Oeste, una vez extraída la tuneladora atrapada, continuó la excavación por métodos convencionales desde la boca norte y desde la galería intermedia, produciéndose el encuentro entre ambas en enero de 2007. Al mismo tiempo, los trabajos de revestimiento y de instalación de infraestructura ferroviaria en ambos tubos se desarrollaban en las zonas ya excavadas.

Finalmente, los cales definitivos de ambos tubos se produjeron entre marzo y abril de ese mismo año, dando así por concluido el trabajo de perforación. En total, cerca del 80% de la excavación de ambos tubos se llevó a cabo por métodos convencionales, con los que se alcanzó un elevado rendimiento por su versatilidad y facilidad de adaptarse a los imprevistos. La nueva estrategia de excavación iniciada en 2006, por tanto, permitió revertir una difícil situación y concluir la obra en plazo, dejándola preparada para las fases de revestimiento, construcción de la vía en placa e instalación del resto de infraestructura ferroviaria. Transcurridos los últimos meses de trabajos y pruebas, los túneles entraron en servicio en diciembre de 2007, junto al resto de la línea Madrid-Valladolid.

Trabajos en las bocas en el lado Madrid de los túneles de Guadarrama.

Túneles de Guadarrama

Históricamente, el Sistema Central ha sido el gran obstáculo geográfico para las comunicaciones ferroviarias entre el centro y el norte/noroeste peninsular. La línea Madrid-Irún, inaugurada en 1864, se construyó dando un enorme rodeo por el oeste hasta Ávila para evitar el paso por la sierra madrileña, lo que alargaba excesivamente el trazado. Esto ha sido así durante más de 140 años, hasta que la nueva línea de alta velocidad Madrid-Valladolid, encuadrada en el Corredor Norte-Noroeste, atravesó a partir de 2007 la otrora invencible serranía con un túnel bitubo de base que ha pasado a los anales de la ingeniería española.

La construcción de estos túneles ha permitido un nuevo trazado ferroviario a través del Sistema Central que dibuja una línea recta entre Madrid y Valladolid, acortando la distancia (de 248 a 179 kilómetros) y el tiempo de recorrido (ahora establecido en torno a una hora) entre ambas ciudades. Es por ello que constituyen la piedra angular de esta línea de alta velocidad. Pero su importancia va aún más allá: los túneles también permiten la extensión de la red de alta velocidad a todo el cuadrante norte/noroeste peninsular, ya que a partir del nuevo trazado se desarrollarán las futuras líneas de alta velocidad hacia Galicia, Asturias, Cantabria y el País Vasco, permitiendo ya un ahorro de una hora a todos los destinos de ese cuadrante.

■ Línea: LAV Madrid-Valladolid

Longitud: 8.569 y 8.545 metros

Periodo ejecución: Marzo 2005-abril 2007

Método constructivo: Tuneladora y nuevo método austriaco

Su longitud, 28,3 kilómetros por tubo, los convierte en los túneles más largos de España y los sitúa como los cuartos de Europa y los quintos del mundo a fecha de 2007, aunque ninguno de ellos se ha construido para velocidades superiores a los 300 km/h. Asimismo, son los primeros túneles del mundo en su longitud que se excavan sin ataques intermedios, un procedimiento descartado por encontrarse en una zona protegida medioambientalmente. Todos estos datos, junto con su coste –más de 1.200 M€–, su complejidad técnica –con el empleo de cuatro tuneladoras–, sus elevados estándares de seguridad –tanto en la fase constructiva como en la de explotación– o la adopción de importantes medidas de prevención y corrección medioambiental, hacen de los túneles de Guadarrama una de las mayores obras acometidas en la historia de la ingeniería en España.

Concurso

Para cruzar Guadarrama, el Ministerio de Fomento, a través del Gestor de Infraestructuras Ferroviarias (antecesor de Adif), convocó un concurso de proyecto y obra entre las principales empresas del sector en España, con objeto de tener la garantía de que la obra se podía ejecutar (cada empresa presentó una oferta de proyecto y obra de cada una de las tres alternativas de construcción posibles) y para obtener estudios muy exhaustivos sobre las alternativas del túnel. Este sistema, por otra parte, permitió una mejor coordinación de la adjudicación de cada uno de los cuatro lotes en que se dividió la obra dada su envergadura.

Finalmente se planteó la ejecución de dos tubos gemelos paralelos de 28,377 kilómetros de longitud entre los términos municipales de Miraflores de la Sierra (Madrid) y Segovia, con un diámetro interior de 8,5 metros y una separación entre ejes de 30 metros. En su perfil longitudinal, el trazado subterrá-



Ferroviaria-Agromán

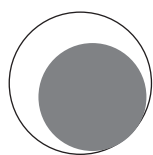
Dos momentos de la construcción de los túneles de Guadarrama: el momento del cale de uno de los tubos y montaje de una tuneladora ante una de las bocas.

neo planteado en el proyecto ascendía desde el lado Madrid con una pendiente media de 1,5% hasta alcanzar la cota de 1.204 metros y después bajar hacia Segovia con una pendiente media del 0,95%, alcanzando un recubrimiento máximo sobre la bóveda del túnel de 992 metros bajo el pico de Peñalara. El terreno a horadar, de acuerdo a los estudios realizados, era un macizo formado básicamente por rocas duras y abrasivas (mayoritariamente gneises y granitos), con dos fallas en su recorrido.

El sistema de construcción elegido, debido a



Alta velocidad subterránea en Castilla-León y el País Vasco



Limitada por el norte, el sur y el noroeste por cadenas montañosas en las que se han construido algunos de los mayores túneles españoles de alta velocidad, la altiplanicie castellano-leonesa no ofrece apenas obstáculos para extender el Corredor Norte-Noroeste por este enorme territorio, por lo que los túneles ferroviarios no son aquí muy abundantes.

La línea Madrid-Valladolid, además de los de Guadarrama y San Pedro, apenas tiene en servicio dos túneles más, La Fuentecilla (1.021 metros) y Tabladillo (2.725 metros), ambos en Segovia, además de cinco menores a la salida de Madrid. Y mientras se construyen los nuevos túneles en la vertiente leonesa de la Variante de Pajares y los que atravesarán el límite montañoso entre Zamora y Ourense, en la línea Valladolid-Burgos-Vitoria, que cruza la región transversalmente a lo largo de 223

kilómetros, se han proyectado apenas una docena de túneles, destacando los de Pancorbo (4.360 metros) en Burgos, Peña Rayada (2.000 metros) en Valladolid y el del subtramo Prádanos de Bureba-Briviesca (1.160 metros), también en Burgos. O los dos túneles del tramo

Venta de Baños-Palencia, que suman casi 2.300 metros. Ninguno de ellos, no obstante, ha comenzado a ser ejecutado.

Además de estos túneles, en Castilla y León se han proyectado otras importantes actuaciones ferroviarias subterráneas, como son los proyectos de integración





En la perforación de los túneles de Guadarrama tomaron parte dos parejas de tuneladoras de doble escudo para roca dura

urbana del AVE, que implican el soterramiento de las vías a su paso por la ciudad. Estos proyectos se llevarán a cabo en Valladolid (4.700 metros a soterrar, parcialmente con tuneladora, más otros 1.057 metros en Pinar de Antequera, ya iniciados), Palencia (2.740 metros) y León (2.700 metros, conjuntamente con San Andrés del Rabanedo).

En el País Vasco, último eslabón del Corredor Norte de alta velocidad antes de llegar a Francia, la orografía montañosa determina una realidad muy diferente, con la "Y" vasca (línea Vitoria-Bilbao-San Sebastián, de 175 kilómetros) discurriendo en gran parte bajo más de 80 túneles. En el ramal Vitoria-Bilbao (62,5 kilómetros), que construye Adif, un 40% del trazado será subterráneo, con 23 túneles. Los más relevantes por su magnitud son los de Albertia (4.786 metros, bitubo, ya iniciado), Udalaitz 8.560 metros], Zarátamo (2.728 metros), Induspe (2.224 metros) o Galdakao (1.826 metros), todos ellos a ejecutar según el nuevo método austriaco, como el de Luko (970 metros), ya perforado. En el ramal Bergara-San Sebastián (94,3 kilómetros), más retrasado, más del 60% del trazado será subterráneo, por lo que el número de túneles será aún mayor.



Ferrovial-Agromán

Página opuesta, planta de fabricación de dovelas y acopio de materiales en la boca norte (Segovia) de los túneles. Debajo, túnel de La Fuentecilla, en Segovia. Sobre estas líneas, bocas de los túneles de Guadarrama en el lado Madrid y labores de impermeabilización de una de las galerías.

condicionantes medioambientales, de seguridad y de plazos de ejecución, fue mediante el empleo de tuneladoras desde cuatro ataques diferentes, dos por boca. Se trataba de un sistema totalmente inédito en España, pues nunca antes se habían empleado hasta entonces en nuestro país tantas máquinas de este tipo de forma simultánea para la misma obra.

El concurso se adjudicó por 1.219 M€ a cuatro uniones temporales de empresas, cada una de las cuales se hizo cargo de un lote. Para la ejecución, se adquirieron cuatro tuneladoras mixtas de doble escudo para roca dura que fueron diseñadas en Alemania y Suiza. Estas máquinas de última generación, de más de 1.500 toneladas de peso y diámetros de 9,5 metros en sus cabezas, fueron trasladadas por piezas hasta la zona de obras, donde se ensamblaron. Paralelamente, junto a las bocas se montaron las plantas de fabricación de dovelas de hormigón para revestimiento de los túneles.



Proceso de ejecución

La secuencia de la ejecución de los trabajos de excavación se inició cuando una tuneladora perforó los primeros metros del macizo desde la boca norte (lado Segovia). Poco después se sumarían las otras tres tuneladoras, de modo que con una diferencia de unos meses se estaban atacando simultáneamente las cuatro bocas. La meta de estas máquinas era avanzar durante unos 14 kilómetros para encontrarse aproximadamente a mitad de trayecto de cada tubo.

En su avance, las tuneladoras de doble escudo no sólo excavaban el terreno en una sección de 9,45 metros de diámetro, sino que también lo revestían con anillas de dovelas prefabricadas de hormigón de 32 centímetros de espesor y 1,60 metros de anchura. Con ello, la sección libre del túnel resultante es de 8,5 metros de diámetro. Como medida de seguridad, cada 250 metros se fueron ejecutando las galerías de interconexión entre los dos tubos, realizadas por métodos convencionales, que servirían como galería de emergencia en caso de cualquier incidencia dentro del túnel. En el exterior, y de acuerdo a la DIA, los túneles se prolongaron artificialmente 500 metros en cada extremo para no afectar a zonas protegidas y de alto valor medioambiental.

En general, la ejecución de los túneles se desarrolló de acuerdo a las previsiones de los técnicos, con la existencia de algunas de las incidencias más características en este tipo de obras subterráneas. El rendimiento de las tuneladoras, que se adapta-

Una tuneladora de doble escudo preparada para atacar el macizo de Guadarrama. Debajo, interior de uno de los tubos.

ron bastante bien al terreno, puede considerarse como elevado: avanzaron a una media global de 15,8 metros/día, o lo que es lo mismo, 474 metros al mes, es decir, un promedio considerable para este tipo de obras. Como hitos en este apartado, destaca el avance de 64 metros de una tuneladora en una sola jornada o el registro de 971,2 metros alcanzado en 30 días.

Las máquinas que iniciaron su labor en la boca norte fueron las primeras en alcanzar su meta, situada a mitad del túnel. Así, el 5 de mayo de 2005 se produjo el cale del tubo Este. Poco menos de un





mes después, el 1 de junio, se produjo el encuentro entre las dos tuneladoras del tubo Oeste. Concluían así los trabajos de perforación de ambos tubos después de 32 meses de trabajo, realizado en tres turnos diarios de hasta ocho horas y con participación máxima de hasta 4.000 personas. En ese tiempo, las tuneladoras extrajeron al exterior más de 4 millones de metros cúbicos de roca e instalaron 248.304 dovelas de hormigón armado.

Pruebas y puesta en servicio

El cale supuso el final de una etapa y el inicio inmediato de otra, de obra civil, con el equipamiento de instalaciones de seguridad y protección civil (incluida una sala de emergencia de 2.500 m² a mitad del túnel con capacidad para 500 personas), ventilación, energía, iluminación, detección y extinción de incendios, todas ellas vigiladas desde un centro de control. De forma paralela, se fueron montando las instalaciones ferroviarias (vía en placa para ancho UIC, electrificación, señalización y comunicaciones), que son las que permiten la explotación de la infraestructura para la alta velocidad. Esta fase se prolongó durante cerca de un año, solapándo-

Interior de uno de los tubos de Guadarrama, con la vía en placa instalada.

se con las primeras pruebas de la infraestructura.

El 11 de septiembre de 2007, un tren laboratorio de Adif atravesó por primera vez los túneles para supervisar todos sus parámetros de operatividad. Sería el primero de múltiples viajes de prueba, primero con este tren y luego con los S 102 destinados a cubrir esta línea, para comprobar que todo funcionaba correctamente. De esta forma se llegó al 22 de diciembre de 2007, fecha de la puesta en servicio de toda la línea Madrid-Valladolid. Desde entonces, más de una veintena diaria de servicios ferroviarios (AVE, Alvia y Avant) atraviesan estos túneles con rapidez, comodidad y seguridad, permitiendo la extensión de los beneficios de la alta velocidad al cuadrante norte/noroeste de la Península.

■ Los túneles de Guadarrama, en cifras

Longitud: 28.377 metros por tubo

Diámetro excavación: 9,45 metros

Diámetro interior: 8,50 metros

Material excavado: 4 millones m³

Material reciclado: 22% del total

Nº anillos revestimiento: 35.472

Nº dovelas: 248.304



Túneles de Pajares

El puerto de Pajares, la barrera natural de la cordillera Cantábrica que históricamente ha lastrado las comunicaciones entre la Meseta Central y Asturias, está a punto de ser dominado por la ingeniería para la alta velocidad con la construcción de la denominada Variante de Pajares, que incluye los segundos túneles ferroviarios más largos de España y los octavos del mundo. Esta gran infraestructura, probablemente la obra de mayor magnitud que se realiza actualmente en España, forma parte de la futura línea de alta velocidad León-Asturias y está destinada a asegurar la conexión por AVE entre el centro peninsular y el Principado de una manera rápida, segura y cómoda.

La ingeniería ferroviaria ya dominó en 1884 este obstáculo geográfico, y el desnivel de más de 800 metros existente entre ambas vertientes de la cordillera (la llamada rampa de Pajares), con la construcción de una tortuosa línea montañosa de vía única entre Busdongo (León) y Campomanes (Asturias), plagada de túneles, con radios muy reducidos y para velocidades lentas, que fue todo un hito para la época, pero que en pleno siglo XXI sigue siendo un cuello de botella para las comunicaciones. Por ello, construir una nuevo trazado subterráneo de base a través de las montañas para llevar la alta velocidad al Principado de Asturias se convirtió en los años 90 en una necesidad de primer orden en los planes del Ministerio de Fomento para las comunicaciones entre el centro y la cornisa cantábrica.





Desde entonces se dieron todos los pasos administrativos necesarios para construir esta variante ferroviaria de vía doble que se extiende a lo largo de 49 kilómetros entre La Robla (León) y Pola de Lena (Asturias), que constituye la parte más complicada, la de mayor inversión y la que requiere de mayores plazos de toda la línea León-Asturias. Cuando esté en servicio, se eliminará el punto singular que supone la rampa de Pajares con un trazado que reducirá la distancia entre León y Gijón en 34 kilómetros (el 40% del recorrido actual) y que ahorrará más de una hora en ese recorrido.

Para su construcción, la variante fue dividida en tres tramos (La Robla-Túneles de Pajares, Túneles de Pajares y Túneles de Pajares-Pola de Lena), que a su vez se subdividieron en siete lotes, cuatro de los cuales corresponden a los dos túneles de base de 24,6 kilómetros de la parte central de la variante, situados entre La Pola de Gordón (León) y Telleo (Asturias), que constituyen su actuación más singular. Los cuatro lotes de los túneles se adjudicaron a cuatro uniones temporales de empresas españolas por 1.744 M€, financiados parcialmente por el Fondo FEDER. El resto de la variante, integrada por tres lotes que se extienden a lo largo de 24,7 kilómetros (con 15,6 kilómetros discutiendo bajo túneles, entre ellos el de Los Pontones, de 5,9 kilómetros), se adjudicó a finales de 2004, y se encuentra en avanzada fase de ejecución.

El proyecto constructivo de los túneles de base establecía la ejecución de dos tubos paralelos de vía única, con una sección circular de 8,50 metros de diámetro interior libre, lo que equivale a una super-

Página opuesta, bocas de los túneles de Pajares en Campomanes (Asturias) y traslado de dovelas. Sobre estas líneas, una gigantesca tuneladora lista para el ataque a uno de los tubos.

ficie libre de 52 m², y con una separación entre ejes de 50 metros. Con un radio mínimo de 3.550 metros, la pendiente longitudinal continua sería de 16,8 milésimas, con sentido descendente hacia Asturias. Para su construcción, dada la longitud de los túneles y el material que compone el macizo (formaciones pizarrosas, areniscosas, cuarcíticas y carbonatadas), se eligió la opción de tuneladoras de roca dura, que en número de cinco unidades atacarían el macizo desde cinco puntos, con la ejecución de dos ataques intermedios (uno a construir por medios convencionales) que garantizaran alternativas de avance en caso de incidencias, lo que aproxima a esta obra a la filosofía de construcción de los túneles de base alpinos. La Declaración de Impacto Ambiental, por su parte, impuso condicionantes severos para el exterior de los túneles, con la exigencia de medidas para frenar el impacto medioambiental de la obra.

Las tuneladoras iniciaron su ataque en distintas fases. Así, las dos tuneladoras de la vertiente leonesa

comenzaron la perforación de los tubos Oeste y Este el 13 de julio y el 20 de septiembre de 2005, respectivamente, con la tuneladora que debía iniciar la parte central comenzando a horadar una galería intermedia en septiembre de ese mismo año,

**La Variante de Pajares
reducirá en 34 kilómetros
la distancia existente
entre León y Gijón,
ahorrando más de una
hora en ese recorrido**



mientras que las dos de la vertiente asturiana no lo hicieron hasta abril y julio de 2006, respectivamente. De esta diferencia en las fechas de inicio de la excavación se deriva que los trabajos estén más avanzados en la parte sur que en la norte.

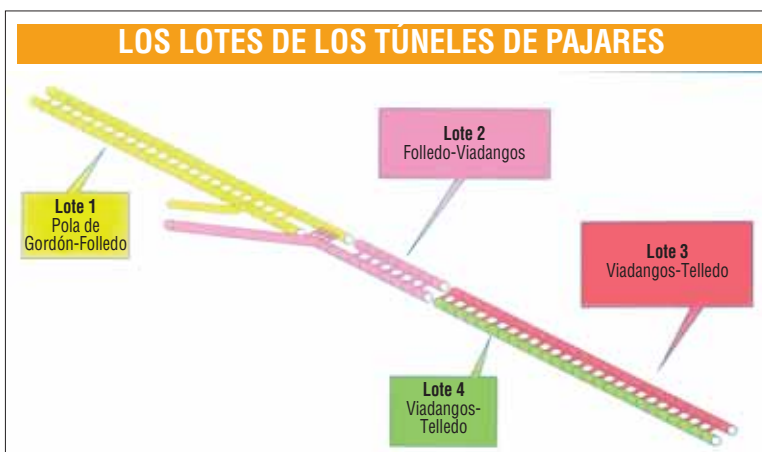
Por lotes, la evolución del proceso constructivo, en el que las tuneladoras han encontrado desde terrenos uniformes hasta degradados, con la aparición de incidencias como la formación de cavernas en formaciones calizas, la presencia de gases deflagrantes (metano) o los golpes de agua e inundaciones registradas al atravesar formaciones calcáreas, entre otras, ha sido la siguiente:

● **Lote 1.** Comprende la ejecución de los tubos Este y Oeste entre el emboquille sur, en La Pola de Gordón, y Folledo, bajo la sierra del Rozo, a lo largo de 10,7 kilómetros por tubo. Las dos tuneladoras de este lote registraron un elevado rendimiento y concluyeron su trabajo antes de lo previsto, lo que finalmente descartó que los últimos 2,7 kilómetros del tubo Este se ejecutaran por métodos convencionales, como estaba planeado, optándose por completarlos con tuneladora. Se han ejecutado las 29 galerías transversales de seguridad entre tubos situadas cada 400 metros, así como otras galerías para equipamientos. En este lote se ejecutó por métodos convencionales una galería intermedia desde la localidad de Folledo, de 2 kilómetros de longitud y una pendiente del 13%, que entronca con el trazado del tubo Este en el pk 7.7. En el futuro, esta galería servirá para explotación y mantenimiento de la infraestructura.

● **Lote 2.** Este lote, comprendido entre Folledo y Viadangos (León), constituye el tramo central de los túneles y supone la construcción de dos tubos de

Planta de dovelas en la vertiente leonesa de Pajares. En total, en la construcción de ambos tubos se habrán empleado casi 230.000 dovelas de hormigón armado.

3,9 kilómetros de longitud cada uno, que conectan con los del lote 1 por el sur y con los de los lotes 3 y 4 por el norte, y una galería de acceso intermedio desde la localidad de Buiza, de 5,5 kilómetros de longitud y una pendiente descendente del 6,2%, para acceder a la cota de dicho túnel. También contempla la ejecución de 9 galerías transversales entre tubos y un puesto de parada preferente para trenes. La tuneladora completó los trabajos de la galería y del tubo Este y debía haber emprendido después la perforación del tubo Oeste, lo que hubiera requerido una compleja secuencia de procesos a ejecutar, entre ellos la construcción de una gran caverna para montar la tuneladora del segundo tubo. Finalmente se optó por ejecutar la parte del tubo Oeste correspondiente a este lote con la misma tuneladora que ejecutó el tubo Oeste del lote 1. Los trabajos de perforación y revestimiento también están aquí terminados.





● **Lote 3.** Comprende la excavación del tubo Este a lo largo de 10,4 kilómetros entre el emboquille asturiano de Telledo y Viadangos, donde se produce el entronque con el tubo Este del lote 2. También ha correspondido a este lote construir la plataforma de obra donde se montaron las dos tuneladoras de la vertiente asturiana, la cinta de extracción de escombros y dos viaductos sobre el río Huerna inmediato al emboquille. La tuneladora *Santa Cristina de Lena* inició los trabajos de perforación de este lote en abril de 2006, y desde el comienzo se topó con rocas con una mayor fracturación de la prevista, lo que dificultó su avance. No obstante, éste se completó en septiembre de 2008 con el encuentro con los trabajos del tubo Este del lote 2, procediéndose desde entonces a finalizar el revestimiento e impermeabilización del tubo.

● **Lote 4.** A este lote, correspondiente a la construcción del tubo Oeste entre Telledo y Viadangos en una longitud de 10,4 kilómetros, le correspondía también la ejecución de las galerías transversales de conexión entre los tubos de este tramo, así como las galerías para alojamiento de equipos de señalización, transformación y autotransformación. La tuneladora *L'Ayalga*, que fue la encargada de este lote, comenzó la perforación en julio de 2006 y también encontró terreno muy degradado. En noviembre de 2007, cuando atravesaba una formación pizarrosa y de areniscas, la máquina sufrió un atrapamiento, aunque pudo ser liberada para continuar su trabajo. Es el lote que finalizará su excavación en último lugar, aunque ya está próximo a su conclusión.

El 13 de septiembre de 2008 fue una fecha clave en el proceso constructivo de los túneles de Pa-

Interior del tubo Este, el primero en ser totalmente calado. Debajo, las tuneladoras han construido tubos con una sección útil de 8,5 metros de diámetro.

jares. Ese día, en presencia del presidente del Gobierno, se producía el cale del tubo Este al concluir los trabajos del lote 3, que conectaban con los ya finalizados de los lotes 1 y 2 de ese tubo. De esta forma, los aproximadamente 25 kilómetros de uno de los dos tubos quedaban definitivamente enlazados bajo el macizo montañoso astur-leonés, restando sólo por completar los últimos metros de perforación del lote 4 para completar los otros 25 kilómetros del tubo Oeste. Para que esto haya sucedido se han tenido que extraer al exterior 5,5 millones de metros cúbicos de material y colocar como revesti-





miento un total de 229.047 dovelas de hormigón armado procedentes de las cuatro fábricas que han alimentado la obra. Este cable permitió iniciar la nueva fase de obra civil en el tubo Este, antes de dar paso a los trabajos de superestructura, electrificación e instalaciones de seguridad y comunicaciones, proceso análogo al que se realizará luego en el tubo Oeste.

Los túneles de Pajares y la variante que los engloba, ahora que comienza a atisbarse su finalización, han confirmado su condición de gran desafío para la ingeniería española, que, no obstante, ha sabido solventar las dificultades que el macizo que separa León y Asturias ha planteado. Su perforación completa ha necesitado de más de 40 meses de du-

Aspecto interior de uno de los tubos ya revestido con dovelas de hormigón armado.

ro trabajo de cientos de personas para construir un trazado subterráneo que los trenes de alta velocidad cubrirán en menos de diez minutos, pero que supondrá un paso decisivo para mejorar las comunicaciones ferroviarias entre el centro peninsular y Asturias.

■ Los túneles de Pajares, en cifras

Longitud: 24.600 metros por tubo

Diámetro excavación: 9,45 metros

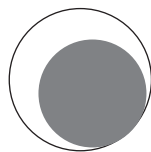
Diámetro interior: 8,50 metros

Material excavado: 5,5 millones m³

Nº anillos revestimiento: 32.721

Nº dovelas: 229.047

Los otros túneles de la Variante de Pajares



Aunque los dos grandes tubos de 24,6 kilómetros de longitud sacaparan todo el

protagonismo de la Variante de Pajares (49,7 kilómetros), no son los únicos en este tramo a través de las montañas. De hecho, más de la mitad del resto de la variante discurre de forma subterránea a través de una docena de túneles que actualmente están en fase de ejecución. La mayoría se han construido por métodos

convencionales, con secciones libres de 85 a 90 m², salvo el de Los Pontones, que por su longitud, casi 6 kilómetros, se ejecuta actualmente mediante tuneladora.

Entre La Robla y los túneles de Pajares (9,4 kilómetros), en la vertiente leonesa, se han perforado ya seis túneles que totalizan 3,9 kilómetros. Una vez superados los dos grandes tubos, en el subtramo Túneles de Pajares-Sotiello (6,1 kilómetros), una tuneladora de escudo simple perfora desde

octubre pasado el túnel de Los Pontones, con 5.921 y 5.979 metros en cada tubo. Entre Sotiello y Campomanes (4,3 kilómetros), se han perforado dos túneles que suman 1,7 kilómetros. Y, finalmente, entre Campomanes y Pola de Lena (4,9 kilómetros), se ejecutan por medios convencionales dos túneles (Vega de Ciego y Pico de Siero), que totalizan 4,1 kilómetros de longitud. En total, 15,6 de los 24,7 kilómetros del resto de la variante se construyen bajo tierra.



Túneles de A Madoira

Estos túneles, actualmente en fase de ejecución, constituyen el acceso de alta velocidad a la ciudad de Vigo, el tramo más meridional del Eje Atlántico que actualmente se construye en Galicia entre A Coruña y esta ciudad pontevedresa. Con sus 8.266 metros de longitud previstos, serán los túneles ferroviarios más largos de Galicia y los cuartos de España, tan sólo superados por los de Guadarrama, Pajares y San Pedro.

Tanto su longitud como su trazado finales son el resultado de una modificación realizada en el estudio informativo del tramo Vigo-Pontevedra del Eje Atlántico, aprobado en junio de 2005. Este proyecto preveía para el acceso a Vigo la ejecución de un túnel de 6,5 kilómetros de longitud entre el valle de Das Maceiras (Redondela) y el norte de Vigo para salvar el monte de A Madoira, que iría seguido de un tramo final de unos 3.000 metros a cielo abierto por la ciudad hasta la estación de Urzáiz.

No obstante, durante la redacción del proyecto constructivo del tramo se constató la necesidad de una mayor integración urbana del ferrocarril en la

Las tuneladoras 'A miñoca' y 'A lebre', listas para el ataque a los túneles de A Madoira desde el valle de Das Maceiras (Redondela), en febrero pasado.

ciudad. Tras barajar varias soluciones, la Dirección General de Ferrocarriles del Ministerio de Fomento, la Xunta de Galicia y el Ayuntamiento acordaron modificar el trazado ferroviario por la ciudad para que discurriera completamente en túnel desde Das Maceiras. Así, en enero pasado se elevó a definitivo un estudio informativo complementario que prolonga el túnel previsto hasta la estación de Vigo-Urzáiz, que se construirá a una cota de 15 metros por debajo de la actual, eliminando todo el recorrido en superficie del ferrocarril por la ciudad, con las consiguientes ventajas medioambientales, urbanísticas y socioeconómicas.

Con la modificación aprobada, el tramo ha reducido su longitud (de 9.122 a 8.647 metros), pero el túnel ha aumentado la suya en 1,7 kilómetros (de 6,5 a 8,2 kilómetros) y ha variado la parte final de su trazado, que ahora es más rectilíneo y directo hasta la estación de Urzáiz. Lo que no ha cambiado es su tipología bitubo, con sección circular y un diámetro interior libre de 8,50 metros, con ambos tubos separados 30 metros entre ejes y conectados entre sí mediante galerías transversales cada 400 metros. Tampoco ha variado su método constructivo, a realizar mediante dos tuneladoras de doble es-



Dos imágenes de las tuneladoras ante las bocas de los túneles.

cudo, ni el terreno a horadar, básicamente compuesto por gneis, granito y paragneises, aunque sí el plazo de ejecución de la obra, que se prolongará durante unos 20 meses, y el recubrimiento medio de los tubos, que, al ser ahora mayor, presentará una mayor proporción de roca sana, menos fracturada, lo que compensa –a efectos de afección a recursos hídricos– el aumento de longitud mencionado.

El proyecto fue adjudicado a una unión temporal de empresas por un importe de 189,5 M€ y está parcialmente financiado con fondos comunitarios.

La excavación de ambos tubos se inició en el valle de Das Maceiras el pasado 11 de febrero por parte de dos tuneladoras de doble escudo (bautizadas como *A miñoca* y *A lebre*) que ya tomaron parte en la construcción de los túneles de Guadarrama, aunque para esta ocasión han sido modernizadas tecnológicamente y reparadas en sus principales elementos. Su misión, de acuerdo al proyecto, será avanzar al mayor ritmo posible y colocar 10.171 anillos de dovelas prefabricadas de hormigón armado (para un total de 71.197 dovelas) hasta llegar en el plazo establecido al emplazamiento de la futura estación de Vigo-Urzáiz, tarea en la que actualmente están empeñadas. ■

■ Los túneles de A Madroa, en cifras

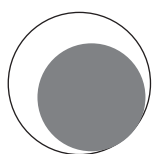
Longitud: 8.266 metros por tubo

Diámetro excavación: 9,46 y 9,51 metros

Diámetro interior: 8,50 metros

Nº anillos revestimiento: 10.171

Nº dovelas: 71.197



Los otros túneles gallegos

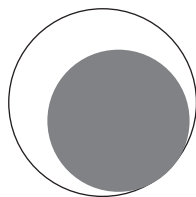
La extensión de la red de alta velocidad a Galicia, tanto a través de la línea Madrid-Galicia como del Eje Atlántico, implica la construcción de más de medio centenar de túneles en esa comunidad entre los cuales brilla con luz propia el de los accesos a Vigo, el más largo de Galicia. Así, en el eje Ourense- Santiago, de la línea Madrid-Galicia, se construyen una treintena de túneles que suman más de 28 kilómetros de longitud. El más destacado es el de A Burata, en el subtramo Ourense-Amoeiro, que con sus 4.068 metros es el

más largo del eje. En este túnel, en fase de ejecución muy avanzada, se construye también una galería de emergencia paralela de la misma longitud. Otros túneles de este eje ya perforados son los de Outeiro

(2.866 metros), Piteira (2.135 metros) y Carboeiro (1.420 metros).

En el Eje Atlántico, casi medio centenar de los 155 kilómetros entre A Coruña y Vigo discurren a través de 39 túneles, algunos ya en servicio. El más importante es el de A Madroa, único que se ejecuta con tuneladora. Por su longitud, le siguen los de Lantaño (3.860 metros), el del tramo Meirama-Bregua (3.469 metros), el de la Variante de Berdía (3.254 metros), el de la Variante de Bregua (2.834 metros), Redondela (2.491 metros) y Pousadoiro (2.355 metros), además de otros ocho de más de un kilómetro de longitud, todos ellos con vía en placa.





Bibliografía

- ✓ **Adif y Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas.** Jornada técnica: Singularidades constructivas en los túneles de las líneas ferroviarias del noroeste y sur de alta velocidad. Edita Aetos. Segovia, 2008.
- ✓ **Armengol, Joaquín et al.** Orígenes y desarrollo de la minería. Revista Industria y Minería, septiembre 2006.
- ✓ **Bernárdez Gómez, María José y Guisado di Monti, Juan Carlos.** La minería romana del *lapis speculari*. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Servicio de Publicaciones, 2003.
- ✓ **Corral de la Fuente, José Luis.** La mina de Daroca. En Internet: www.daroca.info
- ✓ **De la Fuente González, Jesús M. et al.** Túnel de Abdalajís ejecutado con TBM para la línea de alta velocidad Córdoba-Málaga. Revista de Obras Públicas, n° 3.450, diciembre 2004.
- ✓ **De la Torre Roldán, Mariano.** Cueva de Hércules en Toledo. Antigua: Historia y arqueología de las civilizaciones (web).
- ✓ **Departamento de Marketing y Comunicación de TP Ferro.** Trazado de la línea de alta velocidad ferroviaria Figueras-Perpiñán. Revista de Obras Públicas, n° 3.462, enero 2006.
- ✓ **Egizabal León, David.** Las conducciones subterráneas de Arnedo. Artículo de Internet.
- ✓ **Estruch Serra, Miguel y Tapia Gómez, Ana.** Topografía subterránea para minería y obras. Universidad Politécnica de Cataluña, 2002.
- ✓ **Ferreras Morales, Álvaro y González Bueno, Alberto.** Esfuerzo técnico y humano. Túnel Este de San Pedro de la línea de alta velocidad Madrid-Segovia-Valladolid. Cauce 2000, Revista de la Ingeniería Civil, n° 139, 2008.
- ✓ **Fuertes Marcuello, Julián.** El túnel o mina de Daroca. Obra hidráulica del siglo XVI. Revista de Obras Públicas, abril 1987.
- ✓ **García-Diego, José Antonio.** La cueva de Hércules. Revista de Obras Públicas, octubre 1974.
- ✓ **Guerra Chavarino, Emilio.** Los viajes del agua de Madrid. En Internet: hispagua.cedex.es/cultura_agua/textos/
- ✓ **Hourcade, Jean.** El paso de lo Pirineos: un caso singular en Europa. Revista de Obras Públicas, 2000.
- ✓ **Izquierdo de Bartolomé, Rafael.** Cambó y su visión de la política ferroviaria. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2000.
- ✓ **Juncá Ubierna, José Antonio.** El túnel. I Historia y mito. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y Centro de Estudios de Experimentación de Obras Públicas. Madrid, 1990.
- ✓ **López Camacho, Bernardo.** Galerías de captación de agua en la Europa mediterránea. Revista de Obras Públicas, octubre 2001.
- ✓ **López Camacho, Bernardo; De Bustamante Gutiérrez, Irene e Iglesias Martín, José Antonio.** El viaje del agua (qanat) de la Fuente Grande de Ocaña: pervivencia de una reliquia hidráulica. Revista de Obras Públicas, enero 2005.
- ✓ **López Sopeña, Fernando.** Geología del túnel de San Pedro. Ingeopress, n° 164, 2007.
- ✓ **Llorca Aquesolo, Jesús y Monte Sáez, José Luis.** El antiguo sistema de abastecimiento de agua de Madrid y su influencia en la vía pública, construcciones en servicio y nueva construcción. Revista de Obras Públicas, junio 1984.
- ✓ **Maluquer, Manuel.** El túnel internacional de Somport. Revista de Obras Públicas, 1911.
- ✓ **Maluquer, Manuel.** El túnel de Tosas. Revista de Obras Públicas, 1919.
- ✓ **Maristany, Eduardo.** El túnel de la Argentera. Tratado de construcción de túneles. Revista de Obras Públicas, 1892.
- ✓ **Martínez-Val Peñalosa, José María.** Un empeño industrial que cambió a España. 1850-2000: siglo y medio de ingeniería industrial. Síntesis. Madrid, 2001.
- ✓ **Matías Rodríguez, Roberto.** Ingeniería minera romana. En Internet: www.traianus.es
- ✓ **Melis Maynar, Manuel J.** Los túneles y los ingenieros de Caminos. Revista de Obras Públicas, n° 3.388, junio 1999.
- ✓ **Melis Maynar, Manuel J.** El túnel, clave de las infraestructuras. Revista de Obras Públicas, n° 3.403, noviembre 2000.
- ✓ **Melis Maynar, Manuel J.** Terraplenes y balasto en alta velocidad ferroviaria. Tercera parte: Los túneles de alta velocidad, profundidad, proyecto, RMR y NATM. Revista de Obras Públicas, n° 3.472, diciembre 2006.
- ✓ **Melis Maynar, Manuel (director); Jiménez Vega, Miguel y Cuellar Villar, Juan.** Inventario de túneles ferroviarios en España. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Ediciones Doce Calles. Madrid, 2005.
- ✓ **Mendaña Saavedra, Felipe.** Las tuneladoras de doble escudo en la construcción de los túneles de Guadarrama. Revista de Obras Públicas, n° 3.453, marzo 2005.
- ✓ **Moreno Cervera, Manuel et al.** Túneles de los tramos Madrid-Zaragoza y Zaragoza-Lérida. Revista de Obras Públicas, n° 3.386, abril 1999.
- ✓ **Oteo Mazo, Carlos.** La forma en los túneles de carretera y ferrocarril. Ingeniería y Territorio, n° 84.
- ✓ **Pertierra Rey, Matilde y Mollá Ruiz, Pablo.** Línea ferroviaria de alta velocidad Córdoba-Málaga. Tramo 16: túneles de Álora y Espartal. Revista de Obras Públicas, n° 3.455, mayo 2005.
- ✓ **Sáenz Ridruejo, Clemente.** El pozo y galerías del castillo de Burgos, una gran obra de ingeniería medieval. Revista de Obras Públicas, marzo 2001.
- ✓ **Silva Suárez, M.** La técnica en España durante el Renacimiento. Quaderns d'Historia de la Enginyeria, 2004.
- ✓ **Tedde, Pedro y Wais, Francisco.** El ferrocarril y los ingenieros de Caminos a lo largo de un siglo. Revista de Obras Públicas, 1953.
- ✓ **Tedde, Pedro y Wais, Francisco.** La evolución de nuestros ferrocarriles. Revista de Obras Públicas, 1959.
- ✓ **Tedde, Pedro y Wais, Francisco.** Ferrocarriles centenarios: el de la línea de Badajoz. Revista de Obras Públicas, 1966.

Agradecimientos

La Revista del Ministerio de Fomento agradece la colaboración de la Asociación Española de Túneles y Obras Subterráneas (AETOS), así como la cesión de fotografías y otra documentación gráfica a las siguientes personas y empresas: Luis Díaz-Guerra Álvarez, director del Museo del Ferrocarril, Inmaculada García Lozano, directora de la fototeca del Museo del Ferrocarril, y María Concepción García González, técnico de fototeca del Museo del Ferrocarril. Archivo General de la Administración. Biblioteca Nacional. Consorcio de la Ciudad de Toledo. Consorcio del túnel de Bielsa-Araguouet. Ayuntamiento de Burgos. Departamentos de Comunicación del Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (Adif), Metro de Madrid, Metro de Sevilla, Metro de Valencia, Consorcio de Transportes de Bizkaia y Departamento de Política Territorial de la Generalitat de Catalunya. Departamentos de prensa, comunicación e imagen de las empresas Dragados, Ferrovial-Agromán, OHL, Acciona Infraestructuras, Sando-FCC, Grupo Comsa, TP Ferro y UTE Embalse Contreras.

Centro virtual de publicaciones del Ministerio de Fomento:

www.fomento.gob.es

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:

<http://publicacionesoficiales.boe.es>

Título de la obra: *Revista del Ministerio de Fomento, Extra nº 586, julio-agosto 2009*

TÚNELES DE ESPAÑA. De la ingeniería medieval a los modernos túneles del S. XXI.

Año de edición: **Agosto 2009**

Edición digital:

1ª edición electrónica: **Octubre 2013**

Formato: **PDF**

Tamaño: **10 MB**

NIPO: 161-13-160-3

I.S.S.N.: 1577-4929

P.V.P. (IVA incluido): 1,50 €

Edita:

Centro de Publicaciones
Secretaría General Técnica
Ministerio de Fomento©

Aviso Legal: Todos los derechos reservados. Esta publicación no podrá ser reproducida ni en todo, ni en parte, ni transmitida por sistema de recuperación de información en ninguna forma ni en ningún medio, sea mecánico, fotoquímico, electrónico o cualquier otro.

