

Túneles de Pajares. Galería de acceso de Folledo

The Folledo access adit to the Pajares tunnels

Raúl Míguez Bailo. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Jefe de Infraestructura. Línea de Alta Velocidad León-Asturias. ADIF. rmiguez@adif.es

Antonio Benito Alonso. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Jefe de Unidad de Asistencia y Control de Obra. Túneles de Pajares. INECO. antonio.benito@ineco.es

Alfonso Angona Sopeña. Geólogo

Asistencia y Control de Obra. Túneles de Pajares. GEOCONSULT. a_angona@geoconsult.es

Resumen: La galería de Folledo es una de las obras subterráneas que forman los Túneles de Pajares, en la nueva línea de alta velocidad León-Asturias. Se trata de un acceso intermedio a los túneles de línea, con una longitud aproximada de 2 kilómetros y un recubrimiento máximo de 506 metros, que podrá ser utilizada en el futuro como vía de emergencia para la explotación de los túneles. En el presente artículo se detallan los trabajos de ejecución de esta galería.

Palabras Clave: Pajares, Alta Velocidad, Túnel, Galería, Nuevo Método Austríaco

Abstract: The adit of Folledo is one of the subterranean works that forms the Pajares Tunnels, a part of the León-Asturias high speed rail link. It is an intermediate access to the railway tunnels, with approximately 2 kilometres length and an overburden of 506 metres, and it could be used as evacuation road in the future risk management plan of the rail link. This article shows how this adit has been excavated.

Keywords: Pajares, High Speed, Tunnel, Adit, New Austrian Tunnelling Method

1. Introducción

La galería de acceso intermedio de Folledo es una obra incluida en el "Proyecto y Obra de plataforma de la nueva Línea de Alta Velocidad León-Asturias. Variante de Pajares. Tramo: Túneles de Pajares. Lote 1". Para conocer la descripción global de las obras subterráneas que se están acometiendo en el conjunto de los Túneles de Pajares, se remite al lector interesado al número 3.460 de la Revista de Obras Públicas, Noviembre de 2005.

Se trata de una actuación prevista en el proyecto constructivo citado anteriormente para garantizar el acceso hasta un punto intermedio del trazado de la nueva línea de alta velocidad en el interior del macizo cantábrico, de cara a posibilitar el empleo de métodos convencionales en el caso de un hipotético atrapamiento o bloqueo total de las máquinas de ex-

1. Introduction

The Folledo intermediate access adit forms part of the 'Project and Work on the Leon-Asturias High Speed Railway Line. Pajares By-Pass. Section: Pajares Tunnels. Contract 1'. To gain an overall view of the underground works undertaken in the Pajares Tunnels, the reader may refer to edition 3,460 of the Revista de Obras Públicas which came out in November 2005.

This part of the construction project was established to guarantee access to an intermediate point on the high speed railway line within the Cantabrian massif, in order to allow the use of conventional tunnelling methods in the hypothetical case of the trapping or total blocking of the tunnelling machines boring the Pajares tunnel sections under contract 1.

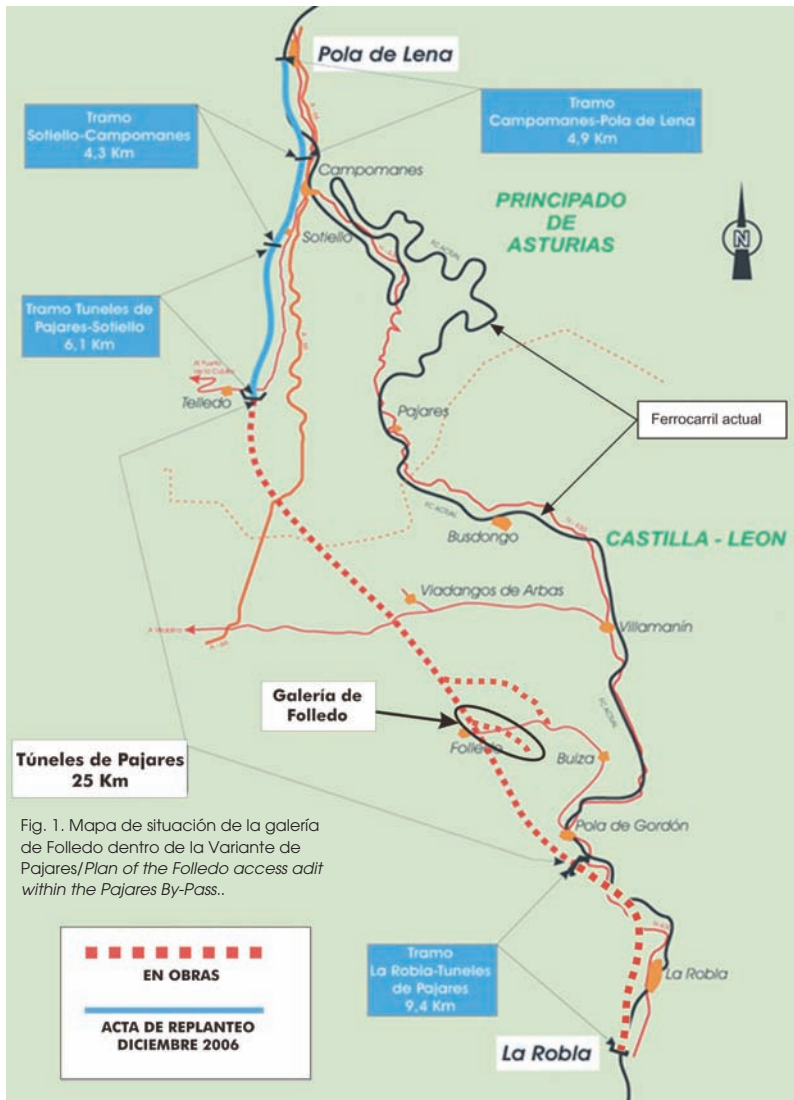


Fig. 1. Mapa de situación de la galería de Folloedo dentro de la Variante de Pajares/Plan of the Folloedo access adit within the Pajares By-Pass..

cavación integral que ejecutan el tramo de los túneles de Pajares correspondiente al lote 1.

Se trata de una galería con la siguiente geometría:

- Altura máxima: 6,50 m
- Distancia máxima entre hastiales: 9,5 m
- Sección libre: 54 m²

La galería tiene una longitud de 2.021 metros, y una pendiente prácticamente continua del 13 %, motivada por la necesidad de ejecutar una excavación de la menor longitud posible. El emboquille está situado junto a la carretera comarcal que enlaza las poblaciones de Buiza y Folledo, en el municipio leonés de La Pola de Gordón. La cota del punto de arranque del túnel artificial de acceso a la galería es 1.139

The access tunnel has the following dimensions:

- Maximum height: 6.50 m
- Maximum distance between side walls: 9.5 m
- Clear section: 54 m²

The adit has a total length of 2,021 metres and a practically constant gradient of 13%, on account of the need to reduce the length of the excavation to a minimum. The entrance is set close to the secondary road between the towns of Buiza and Folledo within the municipality of La Pola de Gordón in the province of Leon. The benchmark height at the starting point of the adit is 1,139 m, while the connection point with the tunnels, set at km 17+580 on the new Leon-Asturias high speed line (the starting point for the line being in La Robla), is located at a height of 879 m and with a ground cover of 506 m.

The access adit is set out in a series of straights and curves as shown in Fig. 3.

The access adit has a purely constructive purpose and is built to guarantee the boring work on the Pajares tunnels in one of the most complicated excavating areas within the whole massif. In spite of this, the adit could well be employed as an emergency tunnel in the event of a serious accident during the rail operation of the

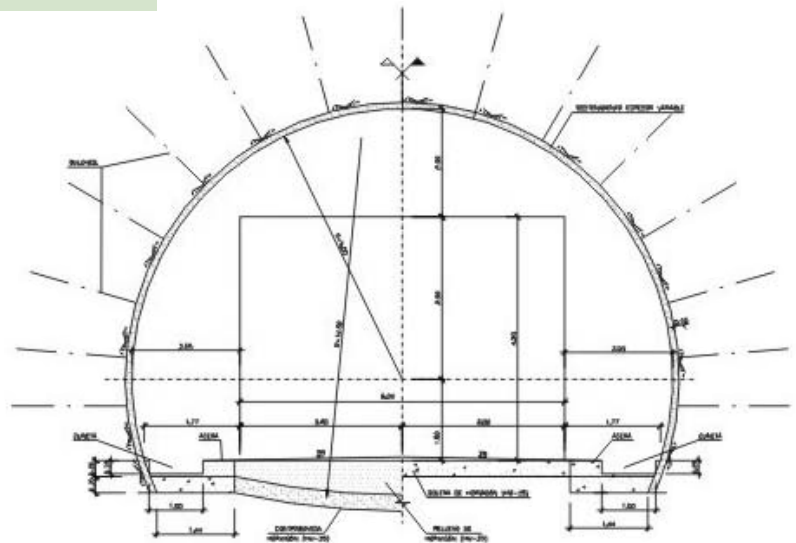


Fig. 2. Sección tipo de la galería de Folloedo/Standard cross-section of the Folloedo access adit..

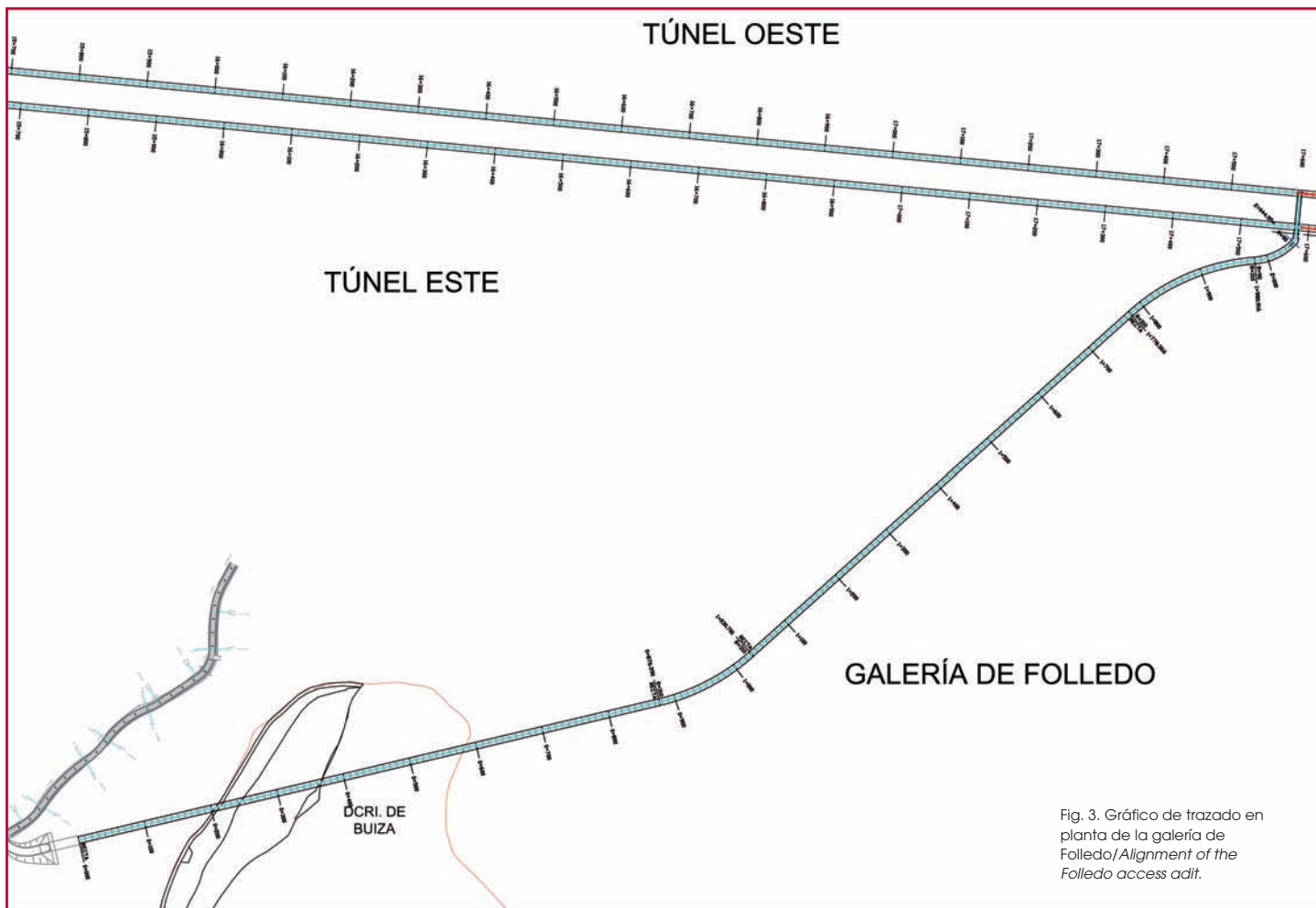


Fig. 3. Gráfico de trazado en planta de la galería de Folledo/Alignment of the Folledo access adit.

m, mientras que el punto de entronque con los túneles, situado en el PK 17+580 de la nueva línea de alta velocidad León-Asturias (el pk de origen de la línea se sitúa en La Robla) se encuentra a la cota 879 m, con un recubrimiento en dicho punto de 506 m.

El trazado de la galería es una sucesión de rectas y alineaciones curvas tal y como se muestra en la fig. 3.

La funcionalidad de esta galería es, tal y como se ha comentado anteriormente, puramente constructiva, destinada a garantizar la ejecución de los túneles de Pajares en una de las zonas más complicadas de excavar de todo el macizo. A pesar de ello, no es descartable su uso posterior como galería de emergencia para cualquier incidencia grave en la explotación ferroviaria de los túneles, así como constituir una posible vía de acceso de materiales y equipos para los futuros contratos de montaje de superestructura, electrificación e instalaciones de seguridad y comunicaciones.

tunnels and as a possible access for the provision of materials and equipment for future contracts for the assembly of superstructure, electricity supply and safety and communication installations.

2. Construction project and survey programme

The administrative programme selected for the tendering and execution of the rail platform works to the Pajares Tunnels was to combine the construction design together with the execution of the work. In order to tender for the four contracts of the Pajares Tunnels, it was first necessary to provide a Draft Project for all the works required in the building of the tunnels. In order to correctly define the work, a very extensive range of geological-geotechnical surveys were carried out with over 15 kilometres of bores and tests.

2. Proyecto constructivo y campañas de investigación realizadas

El trámite administrativo elegido para la licitación y ejecución de las obras de plataforma ferroviaria de los Túneles de Pajares fue el sistema de unir en un mismo contrato la redacción del proyecto constructivo y la ejecución de la obra. Para licitar los cuatro contratos correspondientes a los Túneles de Pajares, se redactó previamente un Proyecto Básico del conjunto de las obras necesarias para la ejecución de los túneles. De cara a conseguir una correcta definición de todas las actuaciones, se llevó a cabo una extensa campaña de investigación geológico-geotécnica con más de 15 kilómetros de sondeos perforados y ensayados.

Así pues, la galería de Folledo, como parte integrante del proyecto de los Túneles de Pajares, ha tenido dos campañas de investigación en profundidad:

- Estudio geológico-geotécnico del Proyecto Básico, orientado a la definición de las obras necesarias de cara a la ejecución de los Túneles de Base, una vez seleccionado el trazado de entre los propuestos en el estudio informativo.
- Estudio geológico-geotécnico del Proyecto Constructivo del lote 1 de los Túneles de Pajares, destinado a definir con detalle todas las actuaciones correspondientes al tramo de los Túneles en cuestión (en este caso los 10,7 km desde el emboquille sur ubicado en La Pola de Gordón y las obras complementarias asociadas a este lote).

Campana de investigación del Proyecto Básico

En esta fase del proyecto la campaña de investigación fue dirigida por la Dirección General de Ferrocarriles del Ministerio de Fomento. Se realizaron un total de 39 sondeos que sumaron 13.918 m de investigación. El 99% de dicha longitud fue perforada con el método wire-line, con extracción de testigo, lo que ha permitido la realización de ensayos de laboratorio para la determinación de distintos parámetros geomecánicos. La redacción del Proyecto Básico fue adjudicada a la UTE Ineco-Geoconsult, y se desarrolló una intensa campaña de investigación geológica sobre el trazado elegido entre las distintas alternativas planteadas en el estudio informativo. Los datos obtenidos de los sondeos junto a la cartografía geológica de superficie posibilitaron el

The Folledo access adit, as an integral part of the Pajares Tunnels, has received two in-depth survey programmes:

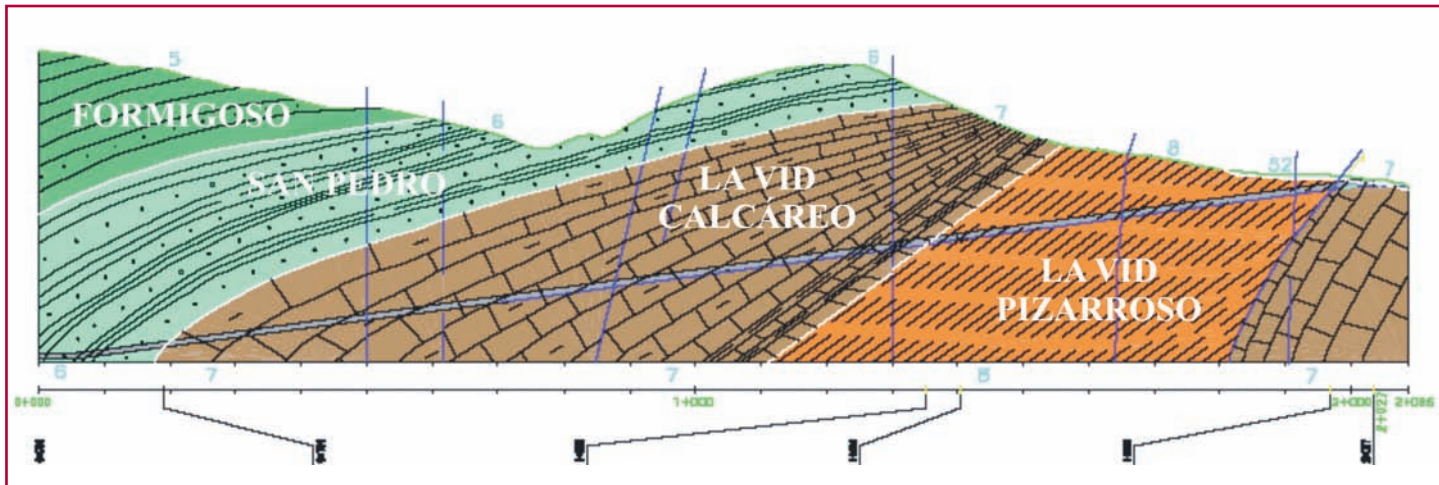
- *Geological-geotechnical study of the Draft Project, aimed at defining the work necessary for the execution of the Base Tunnels, once the route alignment had been selected from the proposals contained in the informative study.*
- *Geological-geotechnical study of the Construction Project of construction 1 of the Pajares Tunnels, aimed at providing a detailed definition of all the work corresponding to the tunnel section in question (in this case, the 10.7 km from the south portal set in La Pola de Gordon and the auxiliary works associated with this contract).*

Survey programme of the Draft Project

At this stage of the project, the survey programme was directed by the Railways Department of the Spanish Ministry of Development. A total of thirty-nine sample bores were made, totalling 13,918 metres. 99% of this length was bored by the wire-line method with the extraction of the sample which allowed ensuing laboratory tests to establish the different geomechanical parameters. The preparation of the Draft Project was awarded to UTE Ineco-Geoconsult and required an intense programme of geological research for the route selected from the different alternatives proposed in the preliminary study. The information obtained from the bores together with the geological mapping of the surface enabled the charting of the first geological profile of the adit as shown in Fig.4.

Survey programme of the Construction Project

During the drafting of the construction project it was considered necessary to supplement the available information regarding the geological profile of the adit in order to provide greater information of the ground through which the tunnel would run. Two further bores, of 100 and 400m respectively, were made along the route of the access adit to investigate the characteristics of largely shaley formations. As a result of this new survey and the reinterpretation of available data, a new geological profile was established as shown in Fig. 5.



levantamiento del primer perfil geológico de la galería, que se muestra en la figura 4.

Campaña de investigación del Proyecto Constructivo

Durante la redacción del proyecto constructivo se planteó la necesidad de completar la información disponible en relación con el perfil geológico de la galería, de cara a disponer del mayor conocimiento de los terrenos a atravesar. Se han ejecutado, en el trazado de la galería, 2 nuevos sondeos de 100 y 400 m de longitud respectivamente, para investigar las características de las formaciones con componente pizarrosa. Fruto de esta nueva campaña y de la reinterpretación de los datos disponibles resultó el nuevo perfil geológico que se muestra en la figura 5.

Fig. 4. Perfil geológico longitudinal de la galería de Folledo. Proyecto Básico visto desde el lado oeste/Longitudinal geological profile of the Folledo access adit. Draft Project. Seen from the western side.

Fig. 5. Perfil geológico de la galería de Folledo. Proyecto Constructivo visto desde el lado este/Geological profile of the Folledo access adit. Construction Project. Seen from the Eastern side.

Supports considered for the approach tunnel

The processing of all the geological data obtained from the different surveys carried out throughout the project, allowed the geomechanical characterization of the different formations through which the tunnel would be driven. On the basis of this characterization and the application of stress-strain behaviour simulation models, an application table was prepared for the support of the openings in accordance with the geomechanical characteristics of the ground. The established supports are as table 1.

The support application table, in accordance with the geomechanical characteristics at the drill face and the existing cover at each point, is summarized in Fig. 6.

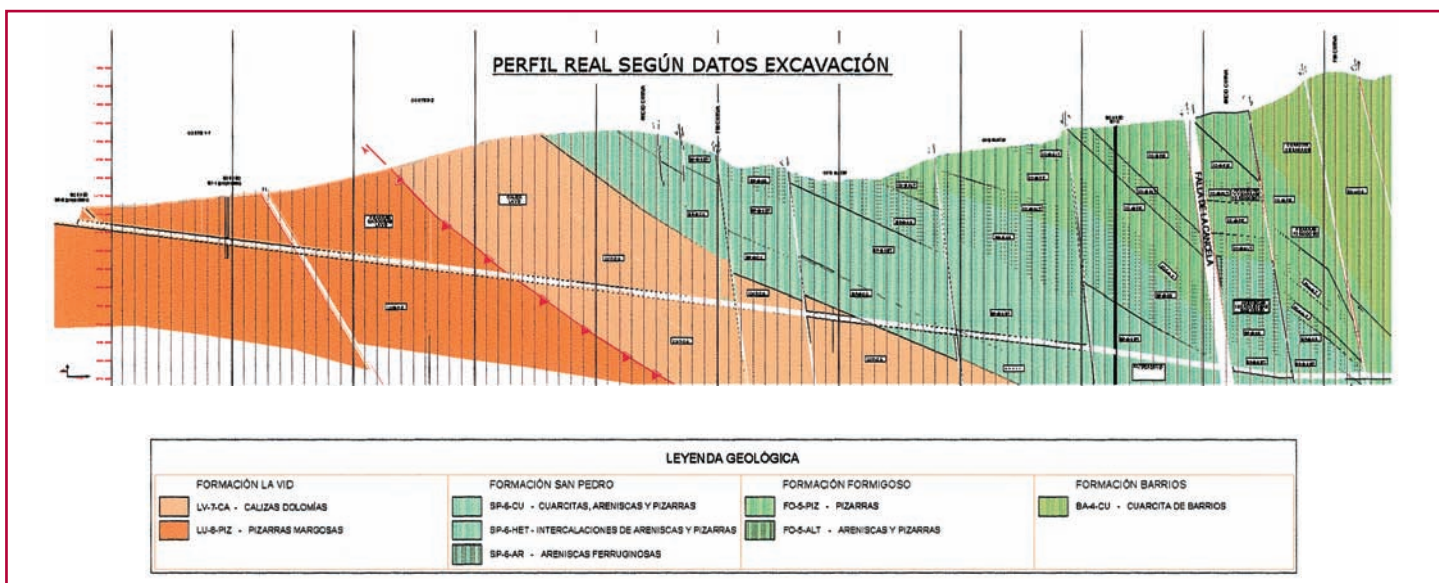


Tabla 1/Table 1

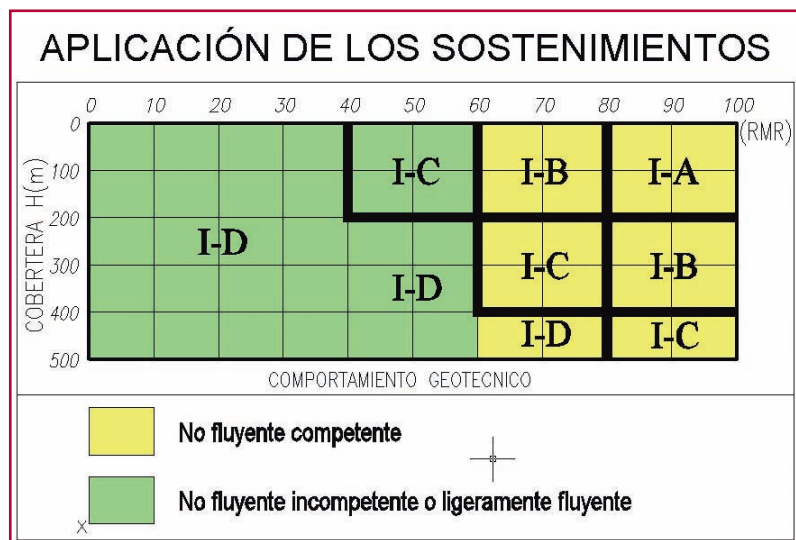
	Hormigón Proyectado/Shotcrete		Mallazo/Mesh	Fibras/Fibres	Cerchas/Frames	Bulones/Rock bolts		Enfilaje/Threading
	Espesor/Thickness	Tipo/Type(Mpa)				Densidad Density	Tipo, Long. Type, Length	
I-A	7 cm	HP-30	-	50 kg/m ³	-	Ocasional Occasional	Superswellex L = 4 m	-
I-B	12 cm	HP-30	-	50 kg/m ³	-	0,25 b/m ² 2x2 m	Superswellex L = 4 m	-
I-C	18 cm	HP-30	1 capa/ layer, 6x150x150 mm	50 kg/m ³	-	0,45 b/m ² 1,5x1,5 m	Superswellex L=4	-
I-D	25 cm	HP-45	2 capas/layers, 6x150x150 mm	50 kg/m ³	TH-36 a 0,80 m	1,25 b/m ² 1x0,8 m	Superswellex L = 4 m	Ocasional Occasional

Sostenimientos previstos en la galería

La recopilación de todos los datos geológicos de las diversas campañas llevadas a cabo a lo largo del desarrollo del proyecto permitió la caracterización geomecánica de las diversas formaciones a atravesar en la excavación de la galería. Con dicha caracterización y la aplicación de modelos de simulación del comportamiento tenso-deformacional se elaboró la tabla de aplicación de sostenimientos en función de las características geomecánicas del terreno a excavar. Los sostenimientos previstos son los que se reflejan en la tabla 1.

La tabla de aplicación de los sostenimientos, en función de la caracterización geomecánica en el frente de excavación y de la cobertera existente en cada punto, se resume en la figura 6.

Fig. 6. Tabla de asignación de sostenimientos del proyecto constructivo/Support allocation table for construction project.



3. Geology and Geotechnolgy

3.1. Formations crossed

The geological formation crossed during the driving of the Folledo access adit were as follows:

- La Vid group (Lower Devonian)
- San Pedro arenaceous formation (Silurian)

The final connection of the access adit with the main tunnels (Folledo cavern) is made through materials of Formigoso formation, but this article shall purely deal with the formations crossed during the drilling of the access tunnel.

The La Vid group includes a series of calcareous and land-derived materials of the Lower Devonian period. These may be divided in two large lithostratigraphic units: a lower predominantly carbonated unit and an upper shaley unit. In the lower unit grey or yellowish dolomites alternate with marl and limestone which is, in turn, alternated with marls and fossiliferous shale. The upper section is formed by greenish-brown shales with certain bands of limestone and marl and fossiliferous marl with narrow interlayers of reddish limestone.

The lower unit reveals good geomechanical characteristics, though it tends to be very folded. It is common to find karstified areas, though there is no evidence of karstification having been found during the excavation of the access tunnel. The upper shaley block forms a cleavage level, and has a soft and easily erodable surface layer closely tied in with the drainage system.



Fig.7. Pliegue de pizarras en el frente de excavación de la galería/Fold of shale at the excavation face of the access tunnel.

3. Geología y geotecnia

3.1. Formaciones atravesadas

Las formaciones geológicas atravesadas durante la ejecución de la galería de Folledo han sido las siguientes:

- Grupo de La Vid (Devónico Inferior)
- Formación Areniscas de San Pedro (Silúrico)

El entronque final de la galería con los túneles principales (caverna de Folledo) se ha realizado en materiales de la formación Formigoso, pero nos limitaremos en este artículo al análisis de las formaciones atravesadas durante la ejecución de la galería.

El grupo de La Vid engloba una serie de materiales calcáreos y terrígenos del Devónico Inferior. Se puede dividir en dos grandes unidades litoestratigráficas: una inferior predominantemente carbonatada y otra superior de naturaleza pizarrosa. En el miembro inferior aparecen dolomías grises o amarillentas alternantes con margas y calizas que se presentan también en alternancia con margas y con pizarras fosilíferas. El tramo superior está constituido por pizarras pardo-verdosas con alguna intercalación de calizas y margas y por margas fosilíferas con delgadas intercalaciones de calizas de color rojizo.

El miembro inferior presenta buenas características geomecánicas, aunque suele encontrarse muy replegado. Es frecuente que se encuentre carstificado, aunque no se han encontrado evidencias de carstifica-

As a whole the La Vid group shows variable thicknesses with averages between 250 and 300 metres. In accordance with the above, this is then divided into two lithological categories:

- *Calcareous: biomicrites formed by a micritic limestone matrix with marl and dolomite runs.*
- *Shaley: slightly foliated and very fine grain shales or argillites.*

In the Folledo access adit, the contact between the two units of the La Vid Group are tectonized, with the shaley unit cleaved at the point of the Villasimpliz Fault.

The transition between the La Vid and San Pedro formations is gradual and this area of transition has sufficient entity and form to distinguish itself from these two formations. On the advance of the excavation and passing on from the La Vid formation, the sandstone blocks become far more frequent and more compact while the shales become increasing less marly and the dolomite layers disappear. This transition section does not appear to be as thick as first thought and it is possible that it is cut by a tectonic irregularity.

The San Pedro formation is formed by a complex sequence of sandstone, shale and lutites, of variable thickness and with lateral changes of facies. Three homogeneous sections may be differentiated within this formation:

- *Lower section, formed by thick beds of massive brown stone which form a good guide level and with varying thicknesses of between 25 and 60 metres.*
- *Intermediate section, of arenaceous-shaley nature, formed by sandstones and quartzite with soft edges, red or greenish sandstones and grey and green shale.*
- *Upper section, similarly heterolithic but with a greater proportion of quartzite and shale intercalations.*

This area is where the largest thicknesses of the formation are found, perhaps due to possible swelling of tectonic nature. The high shale content has meant that the formation has suffered large deformations which are revealed in the form of numerous faults of little entity, folds and even cleavages.

ción durante la excavación de la galería. El miembro superior pizarroso constituye un nivel de despegue, y en superficie constituye un nivel blando y fácilmente erosionable, con un fuerte encaje de la red de drenaje.

En conjunto, el grupo La Vid presenta un espesor variable cuyo valor medio se sitúa entre 250 y 300 metros. De acuerdo con lo anterior, quedaría dividido en dos litotipos:

- La Vid calcáreo: biomicritas constituidas por una matriz de caliza micrítica con pasadas limolíticas y dolomías.
- La Vid pizarroso: pizarras o argillitas débilmente foliadas y de grano muy fino.

En la Galería de Folledo el contacto entre los dos miembros del Grupo La Vid se encuentra tectonizado, estando el miembro pizarroso despegado a través del Cabalgamiento de Villasiimpliz.

El tránsito entre las formaciones La Vid y San Pedro es gradual, teniendo esta zona de tránsito entidad e importancia constructiva suficiente para poder distinguirse de estas dos formaciones. Al avanzar la excavación, saliendo de la Formación La Vid, los paquetes de areniscas se han hecho más frecuentes y más potentes, las pizarras se han vuelto cada vez menos margosas y han ido desapareciendo las capas de dolomías. Este tramo de transición parece tener menor potencia que la prevista, por lo que posiblemente se encuentre truncado por algún accidente tectónico.

La Formación San Pedro está constituida por una secuencia compleja de areniscas, pizarras y lutitas, con un espesor variable y cambios laterales de facies. Se pueden distinguir tres tramos homogéneos:

- Tramo inferior, formado por gruesos bancos de areniscas ferruginosas masivas que constituyen un buen nivel guía y con espesores variables que oscilan entre 25 y 60 metros.
- Tramo intermedio (San Pedro heterolítico), de carácter arenoso-pizarroso, formado por areniscas y cuarcitas con cantos blandos, areniscas rojas o verdosas y pizarras grises y verdes.
- Tramo superior, también heterolítico pero con cuarcitas en mayores potencias e intercalaciones pizarrosas.

En esta zona es donde se dan los mayores espesores de la formación, quizá debido a un posible engro-

The petrographic study of the materials in this formations reveal three different classes:

- *Shales, which include limolites and argillites.*
- *Sandstones: silicarenites and arenites with lutite matrix, frequently cemented by carbonates, silica or iron oxides.*
- *Orthoquartzite with quartzitic cementation presented in beds of little thickness and embedded between the shales of the heterolithic sections.*

Though the quartzitic layers were excavated from the top of the formation, these never took up more than a third of the surface area of the excavation face. A combination of causes of tectonic and sedimentary nature has meant that the ferruginous layer appears as a very thin layer with multiple shaley interbeds.

The table 2 shows a table of the formations crossed during the excavation and their lithology and geomechanical characteristics summarised according to the Beniaowski RMR.

3.2. Summary of geotechnical data

The results from the survey work indicated above together with the experience gained on site during the excavation of the access adit, has provided in-depth knowledge of the geomechanical behaviour of the La Vid and San Pedro formations in this part of the mountain range. In general terms it may be said that both formations have presented a noticeably better geomechanical behaviour than was expected. Occasional deformations of certain importance have occurred at isolated points, particularly at brecciated faults as a result of strains of a tectonic nature, though throughout the greater part of the approach tunnel, the ground has behaved better than was to be expected from the geotechnical parameters obtained in the surveys (see table 3).

4. Construction method

4.1. The New Austrian Method

In spite of the bad press received over recent years by the so-called New Austrian Method as a

samiento de origen tectónico. El elevado contenido en pizarras hace que la formación haya sufrido grandes deformaciones que se revelan con la existencia de numerosas fallas de escasa entidad, repliegues e incluso despegues.

El estudio petrográfico de los materiales de esta formación nos permite una distinción en tres clases:

- Pizarras, en las que se incluyen limonitas y argilitas
- Areniscas: cuarzoarenitas y areniscas con matriz lutítica, frecuentemente cementadas por carbonatos, sílice u óxidos de hierro
- Ortocuarcitas: areniscas con cementación cuarcítica que se presentan en bancos de escasa potencia intercalados entre las pizarras de los tramos heterolíticos.

Aunque se excavaron las capas cuarcíticas del techo de la formación, éstas nunca ocuparon mas de la tercera parte de la superficie del frente de excavación. La combinación de causas de origen tectónico y sedimentario han provocado que el miembro ferruginoso apareciera muy adelgazado y con abundantes intercalaciones pizarrosas.

La tabla 2 muestra un cuadro con las litologías atravesadas durante la excavación y su caracterización geomecánica resumida en la forma del RMR de Beniaowski.

3.2. Resumen de datos geotécnicos

El resultado de los trabajos de investigación descritos anteriormente junto con la experiencia registrada en obra durante la ejecución de la galería ha permitido un conocimiento profundo del comportamiento geomecánico de las formaciones del grupo La Vid y Areniscas de San Pedro en esta zona de la cordillera. De modo general, puede decirse que ambas formaciones han presentado un comportamiento geomecánico sensiblemente mejor de lo esperado. Se ha producido alguna deformación de cierta importancia en zonas muy localizadas, fundamentalmente en fallas brechificadas por esfuerzos de naturaleza tectónica, pero en la mayor parte del trazado de la galería el terreno se ha comportado mejor de lo esperado de acuerdo a los parámetros geotécnicos obtenidos en las campañas (ver tabla 3).

Tabla 2. Cuadro de litologías atravesadas y clasificación geomecánica.
Table 2. Formations crossed, indicating lithology and geomechanical classification

PK inicio PK Start	PK final PK end	Formación Formation	Litología Lithology	RMR	Cobertera Cover (m)
0+000	0+050		Pizarras Shales	35-55	0-23
0+050	0+080		Pizarras margosas Marly shales	40-50	23-28
0+080	0+150		Pizarras Shales	30-40	28-40
0+150	0+320		Pizarras con lutitas y calizas Shale with lutites and limestone	50	40-85
0+320	0+338		Pizarras y calizas Shale and limestone	60-70	87
0+338	0+407	La Vid pizarroso	Pizarras y lutitas Shale and lutite	50-60	88-109
0+407	0+455	La Vid shaley	Pizarras negras Black slate	45-55	109-130
0+455	0+471		Calizas con niveles de pizarra Limestone with shale	65	132
0+471	0+496		Lutitas margosas Marly mudstone	60-65	133-143
0+496	0+532		Pizarras Shales	50-60	143-160
0+532	0+596		Lutitas y calizas Lutite and limestone	60-65	160-180
0+596	0+637		Pizarras Shales	60	180-193
0+637	0+655		Pizarras y calizas Shale and limestone	60	193-210
0+655	0+900	La Vid calcáreo	Calizas Limestone	60-80	210-258
0+900	1+004	La Vid limestone	Dolomías con escasas pizarras y areniscas Dolomite with scarce shale and sandstone	60-70	238-259
1+004	1+080	Transición	Limolitas y pizarras Limolite and shale	50-60	220-238
1+080	1+135	San Pedro	Dolomías con margas Dolomite with marl	60-65	229
1+135	1+249	La Vid - San Pedro	Calizas dolomíticas Dolomitic limestone	65	220-240
1+249	1+282		Arenisca gris Grey sandstone	55-60	240-245
1+282	1+350		Arenisca gris y roja Grey and red sandstone	55-65	245-275
1+350	1+428		Areniscas y pizarras grises Sandstone and grey shale	40-60	275-302
1+428	1+536		Pizarras grises con areniscas Grey shale with sandstone	50-60	302-331
1+536	1+650	San Pedro	Areniscas pizarrosas Shaley sandstone	50-65	331-369
1+650	1+700		Areniscas y limolitas Sandstone and limolite	65	369-384
1+700	1+890		Areniscas ferruginosas con limolitas Ferruginous sandstone with limolite	50-60	384-458
1+890	2+021	Formigoso	Lutitas y areniscas grises Lutite and grey sandstone	50-60	450-506

Tabla 3. Cuadro resumen de parámetros geotécnicos de las formaciones del grupo La Vid y San Pedro
 Table 3. Geotechnical parameters of the La Vid and San Pedro formations

Litología <i>Lithology</i>	γ (t/m ³)	σ_c (MPa)	α_τ (MPa)	Módulo deformación E <i>Deformation modulus E</i>				Módulo de corte G		ν	M_i med	GSI CAI	Abrasiv.
				Estático/ <i>Static</i> (GPa)			Din/ <i>Dyn</i> (GPa)	<i>Shear modulus</i> (GPa)					
				E_{lab}	E_{dil}	E_{GSI}	E	G_l	G_p				
SP piz/shale	2,67	27,3	2,7	20,9	3,8	3,3	-	0,96	1,52	0,22	6	42	0,62
SP aren/sand	2,73	77,7	8,2	29,0	3,4	14,8	45	0,95	1,38	0,16	17	59	3,30
LV calizo/lime	2,74	47,6	7,7	54,6	4,4	17,3	60	1,43	1,78	0,25	12	66	2,00
LV pizar/shale	2,69	13,1	3,4	13,7	-	2,42	-	-	-	0,18	6	43	1,88

4. Método de ejecución

4.1. El Nuevo Método Austríaco

A pesar de la mala prensa que ha tenido en los últimos tiempos el denominado Nuevo Método Austríaco, a raíz del hundimiento del túnel de El Carmelo en Barcelona, se trata de un sistema de ejecución de túneles ampliamente extendido y con ejemplos de éxito (una muestra es el tercer túnel carretero de Guadarrama) cuando es aplicado en terrenos adecuados (roca con buen comportamiento geomecánico), en frentes que no tengan una sección excesivamente grande, realizando el cierre del sostenimiento en solera y con un control continuo y real del comportamiento tensodeformacional.

La excavación de la galería se ha realizado mediante perforación y voladura, pues los parámetros de excavabilidad de las formaciones a atravesar indicaban la imposibilidad de usar de manera continua sistemas de excavación mecanizada de ataque puntual. La longitud del pase en cada ciclo de avance se ha establecido en el proyecto constructivo en 4,5 metros. El explosivo empleado en este caso es Goma 2 ECO, elegido principalmente por su elevada resistencia al agua y por su versatilidad ante rocas de dureza media y alta.

4.2. Ciclo de avance de la galería

El ciclo de avance de la galería se divide en sus fases de excavación y sostenimiento, momento a partir del cual es necesario realizar un seguimiento continuo de las medidas de deformación en el túnel, para controlar su correcta estabilización. Así pues, el ciclo se resume en los siguientes pasos:

result of the collapse of the El Carmelo tunnel in Barcelona, this is a widely used tunnelling method which has yielded successful results (such as the case of the third road tunnel in Guadarrama) when applied in suitable ground (rock with good geomechanical behaviour), in faces which do not have an excessively large section, when closing the support from the base and when carrying continuous and real monitoring of stress-strain behaviour.

The excavation of the tunnel has been carried out by boring and blasting, as the excavating conditions of the formations to be crossed prevented the continuous use of mechanized boring systems. The length of run of each cycle of advance was established in the construction design as one of 4.5 metres. The explosive used in this case was Goma 2 ECO, which was essentially selected on account of its high water resistance and its versatility in medium and hard rock.

4.2. Advance cycle of the access tunnel

The advance cycle of the access adit was divided into phases of excavation and support. On the support of the opening, deformation recordings were continuously monitored to ensure correct stabilization. The cycle may then be summarized in the following phases:

- Drilling of bore holes for explosives. The blast holes for the explosives were formed by an automated three boom jumbo. The length of time taken by this operation depended on the characteristics of the rock face, though in average terms this required between 2 and 3



Fig. 8. Perforación de taladros para explosivos/Drilling of bore holes for explosives.

- *Perforación de taladros para introducción del explosivo.* La ejecución de los barrenos se realiza con jumbo robotizado de tres brazos en el que se introduce el esquema de la voladura. Esta operación tiene una duración que depende de las características de la roca a perforar. Los valores medios obtenidos oscilan entre 2 y 3 horas de perforación, llegando a alcanzar las 4 horas y media en terrenos con alto contenido en sílice.
- *Carga del explosivo en los barrenos.* En el exterior del túnel, mientras se ejecutan los taladros de los barrenos, se preparan en la caseta del artificiero las cañas con el explosivo que serán introducidas en cada perforación. Una vez preparadas las cañas, se van colocando en los taladros con su detonador correspondiente.
- *Detonación, ventilación y extracción de gases.* Una vez realizada la carga y conectados todos los detonadores a la línea que discurre por el hastial de la galería, se evacua a todo el personal y se detiene la ventilación del túnel. El artificiero que iniciará la detonación es la última persona en salir del túnel. En el momento que se comprueba que todo el personal está en el exterior, se emite una señal sonora de aviso previa a la detonación. Una vez que ha hecho explosión, se vuelve a conectar la ventilación y se inicia la limpieza de humos en el frente y su barrido a lo largo de la galería.
- *Desescombro y transporte del material excavado.* La retirada del escombro se realiza mediante pala cargadora y camiones de tres ejes. Para faci-

hours drilling, reaching up to four and a half hours in ground with high silica content.

- *Loading of explosive in the blast holes.* While the blast holes are being drilled, the tubes of explosive are prepared outside the tunnel ready for placement in each blast hole together with their corresponding detonators.
- *Detonation, ventilation and removal and gases.* Once the explosives have been placed and all their detonators connected to a line running along the wall of the tunnel, all personnel are evacuated and the tunnel ventilation is turned off. The explosive expert responsible for the detonation is the last person to leave the tunnel. Once it has been verified that everybody is outside the tunnel, a warning alarm is sounded prior to detonation. After the blast, the ventilation system is then reconnected and the smoke cleared from the face and throughout the length of the tunnel.
- *Clearing and transport of excavated material.* The rubble was removed by a shovel loader and six-wheel trucks. In order to allow the trucks to turn and prevent long reversing manoeuvres, various widenings were made during the tunnel excavation. At these widenings or turning areas the tunnel section increases up to 85 m². The clearing of rubble took between four and five and a half hours depending on the corresponding length of run. Once the rubble had been removed, the face and perimeter were cleared and prepared by a back digger fitted with a hammer.
- *Sealing of the face and perimeter of the section.* Once the rubble had been removed and the area cleaned, the UTE FCC-Acciona geologists and Technical Assistance personnel then made an inspection of the tunnel face. The type of formation and the state of the face then made it possible to establish the geomechanical quality of the massif at this point. In the case of the Folledo access tunnel, the index employed was the Beniaowski RMR. On ascertaining the geomechanical quality of the massif and cover it was then possible to establish the type of support required for the opening and the length of run for the next cycle. The sealing of the face and perimeter was made using 30 Mpa strength and, generally, 5 cm thick fibre reinforced concrete. This sealing operation took around one hour on a 4.5 metre run.

litar la maniobrabilidad de los camiones y evitar largos desplazamientos marcha atrás, se ejecutaron varios ensanchamientos durante la excavación de la galería. En estas zonas la sección de excavación se aumentó hasta los 85 m². El tiempo de duración de desescombro oscila entre 4 y 5,5 horas, en función de la longitud de pase correspondiente. Cuando la carga se ha concluido, se procede al saneo del frente y del perímetro, operación que se lleva a cabo con retroexcavadora dotada de martillo.

- *Sellado del frente y del perímetro de la sección.* Terminado el desescombro y saneo, se procede a realizar el levantamiento del frente por parte de los geólogos de la UTE FCC-Acciona y de la Asistencia Técnica. El tipo de formación y la observación del estado del frente permiten determinar la calidad geomecánica del macizo en este punto. En el caso de la galería de Folledo el índice utilizado ha sido el RMR de Bieniawski. Con los datos de calidad geomecánica del macizo y de cobertera se determina el tipo de sostenimiento a emplear y la longitud de pase para el siguiente ciclo. El sellado del frente y del perímetro se realiza mediante hormigón reforzado con fibras, de 30 Mpa de resistencia característica, en un espesor medio de 5 cm. El tiempo de duración de esta operación es de aproximadamente 1 hora para una longitud de pase de 4,5 metros.

- *Bulonado.* Esta operación se lleva a cabo con el jumbo robotizado, realizando perforaciones perpendiculares a la sección del túnel para constituir la malla de bulones. En los casos en que ha sido necesario coser una junta de manera específica, la perforación se ha realizado en la dirección de mayor colaboración del bulón para su anclaje. Asimismo, en algunas zonas de falla, dada la presencia de material brechificado, ha sido necesario el empleo de bulones autoperforantes de mayor longitud que los swellex para evitar el cierre de la perforación.

- *Colocación de cerchas.* En los terrenos en los que ha sido necesario cerchar la sección, se ha realizado un saneo en profundidad en la zona de encuentro de hastiales y solera, y se ha hormigonado para garantizar una superficie de apoyo adecuada para las cerchas. El montaje de las cerchas se ha realizado in situ mediante plataformas elevadoras con cesta cerrada.



Fig.9. Detonación, extracción y ventilación/Detonation, extraction and ventilation.

- *Rock bolts.* This operation is carried out by the automated jumbo, with perforations made perpendicular to the tunnel section in order to construct a mesh of anchor ties. In the case where it is necessary to tie a joint in a specific manner, the perforation is made in a direction to ensure the greatest anchorage of the tie. Similarly, in some fault areas, and given the presence of brecciated material, it has been necessary to employ self-drilling rock bolts of greater length than the swellex in order to prevent the closure of the perforation.
- *Placing of frames.* In ground where it is necessary to line the section, the area is fully prepared at the meeting point between side walls and the base and concrete is placed in order to guarantee a suitable support surface for the frames. The frames are assembled in-situ using platform lifts.
- *Reinforcement with welded mesh and application of support lining.* In accordance with the type of ground crossed, this activity may be carried out immediately or delayed some 25 metres in order to marry in with the preparation of blast holes and explosives. This possibility depends on the convergence readings and the subsequent need for immediate placement of complete support. In all cases, the section support is reinforced by the placement of a 15x15x6 mm electrowelded mesh throughout the section and fixed to the heads of the rock bolts. The entire lining support is then completed by the application of shotcrete up to the thicknesses established for each type of support.

- *Refuerzo con malla electrosoldada y aplicación del espesor de sostenimiento.* En función del tipo de terreno atravesado esta actividad del ciclo se ha realizado de manera inmediata o retrasada unos 25 metros para simultanearla con los trabajos de perforación de voladura y preparación del explosivo. Esta posibilidad depende de las lecturas de convergencias y, por tanto, de la necesidad o no de aplicación inmediata del sostenimiento completo. En todo caso, el sostenimiento de la sección se ha reforzado mediante la aplicación de malla electrosoldada de 15x15x6 mm en toda la sección, sujetándola a las cabezas de los bulones. El sostenimiento queda completo con la aplicación de hormigón proyectado hasta los espesores marcados en cada tipo de sostenimiento.

- *Hormigonado de la losa de solera.* La última actividad se ha desarrollado, de forma habitual, a un máximo de 50 m de separación del frente. La geometría de la losa tiene un espesor de 30 cm en el centro y 25 cm en los hastiales, ejecutada con hormigón HM-25 y con dos parrillas de acero en ambos extremos de la sección. En aquellas zonas donde el terreno presentaba mayores deformaciones se ha unido el emparillado de la losa con las mallas electrosoldadas de los hastiales y con las cerchas mediante redondos en "L". Cuando las lecturas de convergencias han superado un determinado umbral, se ha optado por la ejecución de contrabóveda en lugar de solera.



Fig. 10. Aplicación del espesor de sostenimiento y bulonado / Application of shotcrete.

- *Concreting of floor slab.* This final activity tends to be performed a maximum of 50 m from the face. The slab is 30 cm thick at the centre and 25 cm at the side walls and is formed in HM-25 concrete with two steel meshes at both ends of the section. In those areas where the ground is liable to cause greater deformation, the slab mesh reinforcement is connected to the welded reinforcement in the side walls and to the lining frames by 'L' shape bars. When the convergence readings pass a specific limit, an inverted vault has been formed instead of a floor slab.

4.3. Medidas de seguridad

Los riesgos de cualquier actividad de construcción se ven agravados en el caso de las obras subterráneas, en especial los túneles, debido a la singularidad que supone el no disponer de más vías de escape que la propia infraestructura que se está ejecutando. Por este motivo las acciones preventivas deben ser aún más exigentes, si cabe, que en el resto de actividades de obra civil.

Una de las mayores garantías de éxito es tener el mejor conocimiento posible del terreno en el que se va a trabajar: de aquí se deriva la importancia de los estudios geológico-geotécnicos en las obras subterráneas. Pero el conocimiento del terreno no finaliza en el momento de redacción del proyecto constructivo, sino que debe seguir ampliándose durante la propia ejecución de la obra mediante la aplicación correcta de

4.3. Safety measures

The risk of any building activity is heightened in the case of underground works, and particularly tunnels, on account of the fact that there is no means of escape other than the structure being formed. As such, preventative action has to be even stricter than other civil work activities.

A thorough knowledge of the ground in which the work is to be carried out, serves as one of the best guarantees of success and, hence, the importance of the geological-geotechnical studies of the underground works. However, the knowledge of the ground does not end at the time of drafting the construction project, and should be continuously extended during the execution of the work. This monitoring should be the result of the correct application of a suitable auscultation and

Fig. 11.
Hormigonado
de losa de
solera/Concreti
ng of floor slab.



un buen plan de auscultación e instrumentación, mediante los levantamientos de los frentes en el avance de la excavación, mediante el seguimiento y ubicación de los planos de discontinuidad que surgen en cada avance... en definitiva, es necesario que durante la propia ejecución de la obra se realice un retroanálisis de las hipótesis de trabajo del proyecto, aportando los nuevos datos que se van generando a escala real para ir comprobando la idoneidad de las soluciones constructivas planteadas. Realizar correctamente este trabajo es absolutamente imprescindible para garantizar la seguridad de los trabajadores y de la propia estructura del túnel.

Nos centraremos en las medidas de seguridad implantadas de cara a situaciones de emergencia en el túnel, señalando aquellas más singulares y menos comunes en la ejecución de túneles:

- Utilización de medidores de concentración de gases en el frente durante las 24 horas. Estos medidores se han empleado para la detección de posibles apariciones de gases de naturaleza orgánica, dado que se atraviesan zonas de pizarras y areniscas en las que no se podía descartar a priori la existencia de pequeñas capas carbonosas con posibilidad de almacenar gases como metano.
- Equipos de emergencia en el frente de excavación. En un armario metálico se ha ido trasladando durante el avance un equipo completo de autorrescatadores, botiquín de primeros auxilios, linternas y equipos portátiles de medición de gases. Además,

instrumentation plans, by surveys of the advance face of the excavation and by the monitoring and location of discontinuous planes as they arise. During the tunnelling work it is necessary to make a retroanalysis of the project's original work hypothesis and to add new information as it arises in order to ensure the suitability of the original construction solution. It is absolutely essential that this monitoring and adjustment work be performed correctly in order to guarantee the safety of workers and the tunnel structure itself.

We shall concentrate on the safety measures introduced to respond to emergency situations in the tunnel, indicating the more noteworthy and perhaps less common measures introduced during the tunnelling operation:

- *Round the clock employment of gas concentration sensors at the face. These sensors have been employed to detect the possible appearance of gas of an organic nature, given that the tunnel passes through shaley and arenaceous areas where it is not possible to discard the presence of small carbonous layers which may house gases such as methane.*
- *Emergency equipment at the excavation face. A steel cupboard, continually positioned near the advance face, contains full self-rescuing equipment, first-aid box, torches and portable gas measuring equipment. The cupboard is also fitted with a telephone*



Figs. 12 y 13.
Detalle de un botiquín en punto intermedio de la galería y detalle del contenedor de los detectores portátiles de gases/First-aid box at an intermediate point in the tunnel and portable gas detector box.

dicho armario iba provisto de un teléfono con comunicación con las oficinas exteriores. Conforme se iba avanzando en la excavación, se han colocado varios puestos similares al descrito a lo largo del túnel, señalizados convenientemente a lo largo del mismo.

- Tomas de agua y de aire comprimido a lo largo del túnel. En reuniones previas al inicio de las obras se decidió que, en caso de emergencia en los túneles, se contaría con el apoyo de la Agencia de Protección Civil de Castilla y León, articulado a través del Cuerpo de Bomberos de León y de las Brigadas de Salvamento Minero de la Hullera Vasco-Leonesa. Fruto de esa colaboración se decidió implantar puntos de toma en la red de agua y en la red de aire comprimido que pudiesen ser utilizados por los equipos de los citados organismos en una eventual intervención.
- Presencia de servicio médico y ambulancia con soporte vital básico a pie de obra. De acuerdo con los criterios generales de las obras de los Túneles de Pajares, existe un servicio médico con ambulancia dotada de soporte vital básico presente las 24 horas en las oficinas de obra, capaz de estabilizar y trasladar a un herido evacuado desde el interior de la galería de manera inmediata.

5. Auscultación e instrumentación

Para el seguimiento del comportamiento de los sostenimientos ejecutados, fueron instrumentadas

connecting to outside offices. Various posts of this nature have been installed as the excavation progresses, all of which being suitably signed throughout the tunnel.

- Compressed air and water outlets throughout the tunnel. In meetings held prior to the start of work, it was decided that, in the case of an emergency in the tunnels, the work would receive the support of the Castilla y León Civil Protection Agency, through the Leon Fire Brigade and the Hullera Vasco-Leonesa Mine Rescue Team. As a result of this collaboration it was decided to install water and compressed air outlets throughout the tunnels which could be employed by these teams in the event of intervention.
- On-site attendance of medical service and ambulance with basic life support equipment. In accordance with the general criteria of the Pajares Tunnel works, a medical service and ambulance with basic life support equipment had to be present at the site office 24 hours a day, with the capacity to immediately stabilize and transfer any person injured within the tunnel.

5. Auscultation and instrumentation

Control sections were fitted with instrumentation to monitor the behaviour of the supports. This monitoring process included the systematic auscultation of

secciones de control. Dentro de ellas, se puede distinguir una auscultación sistemática, consistente en secciones de control de deformaciones mediante la instalación de clavos en hastiales y clave, y unas secciones en las cuales la instrumentación se amplió con la inclusión de extensómetros de varillas, dos en hombros y uno en clave.

En las primeras, se ha medido la distancia entre los clavos mediante cinta de convergencia y sistemas ópticos de alta precisión, y se han nivelado el clavo situado en la clave y un punto en el centro de la solera con topografía de alta precisión.

En las secciones instrumentadas, los extensómetros están dotados de tres varillas cada uno, de longitudes 2, 4 y 6 metros, controlados con potenciómetros eléctricos.

En total, se han instalado 85 secciones de convergencia en 2021 m, con una equidistancia media de 24 m, y 4 de ellas son secciones instrumentadas con extensómetros de varillas.

Para las lecturas de convergencias, los equipos utilizados han sido:

- una cinta de convergencia clásica, con una precisión de media décima de milímetro, y
- una estación total marca Leica, modelo TCA 2003, con una precisión de 0.5 segundos sexagesimales

Las lecturas se han realizado con frecuencia diaria durante la primera semana, disminuyendo la frecuencia de las lecturas en función de las velocidades de deformación observadas.

En terrenos de La Vid pizarroso, el valor máximo de la convergencia ha alcanzado 39,75 mm, con un descenso sucesivo de la velocidad de deformación hasta llegar a la estabilización, si bien en un plazo de tiempo elevado que ha llegado en algún caso a los 6 meses.

En La vid calcáreo el valor máximo alcanzado ha sido de 17,1 mm, con velocidades muy bajas desde las primeras lecturas, suavizándose paulatinamente, al igual que en el caso anterior, en un plazo dilatado de tiempo.

En el caso de la formación San Pedro, el comportamiento ha sido distinto al sobrepasarse los 300 m de cobertera. En este caso, se han observado movimientos mayores de 100 mm en 13 estaciones, de un total de 31 situadas en dicha formación, con velocidades

deformation control sections through the installation of points in the side walls and crown, and other sections where the instrumentation was extended to include bar extensometers, two at the level course and one at the key.

In the first sections, the distance between points was measured by convergence tape and high precision optic systems. The point at the key and the point at the centre of the base were levelled with high precision surveying.

In the sections fitted with instruments, the extensometers were fitted with three bars, of 2, 4 and 6 metres, and controlled by electric potentiometers.

A total of 85 convergence sections were installed over 2021 metres, with an average spacing of 24 m, and with four of these sections instrumented by bar extensometers.

The equipment employed for the convergence readings was as follows:

- *traditional convergence tape with a precision of one half tenth a millimetre, and*
- *Leica station, model TCA 2003, with a precision of 0.5 astronomical seconds*

Readings were taken on a daily basis throughout the first week and then on a more reduced basis according to the deformation rates observed.

In the shaley grounds of La Vid, the maximum convergence value reached 39.75 mm, with a successive fall in the deformation rate until finally reaching stabilization. However, this required long periods of time which on some occasions were as long as six months.

In the limestone section of La Vid, the maximum value obtained was 17.1 mm, with very slow drops after the first readings. As in the preceding case, these gradually levelled out over very long periods of time.

The behaviour was different in the San Pedro formation as these areas had cover of over 300 metres. In this case, movements of over 100 mm were recorded at 13 of the 31 stations set in this formation, with constant rates during the first days of over 10 mm/day, until the closing of the section with the floor base. From this moment on the rates decreased to values of less than 1 mm per day.

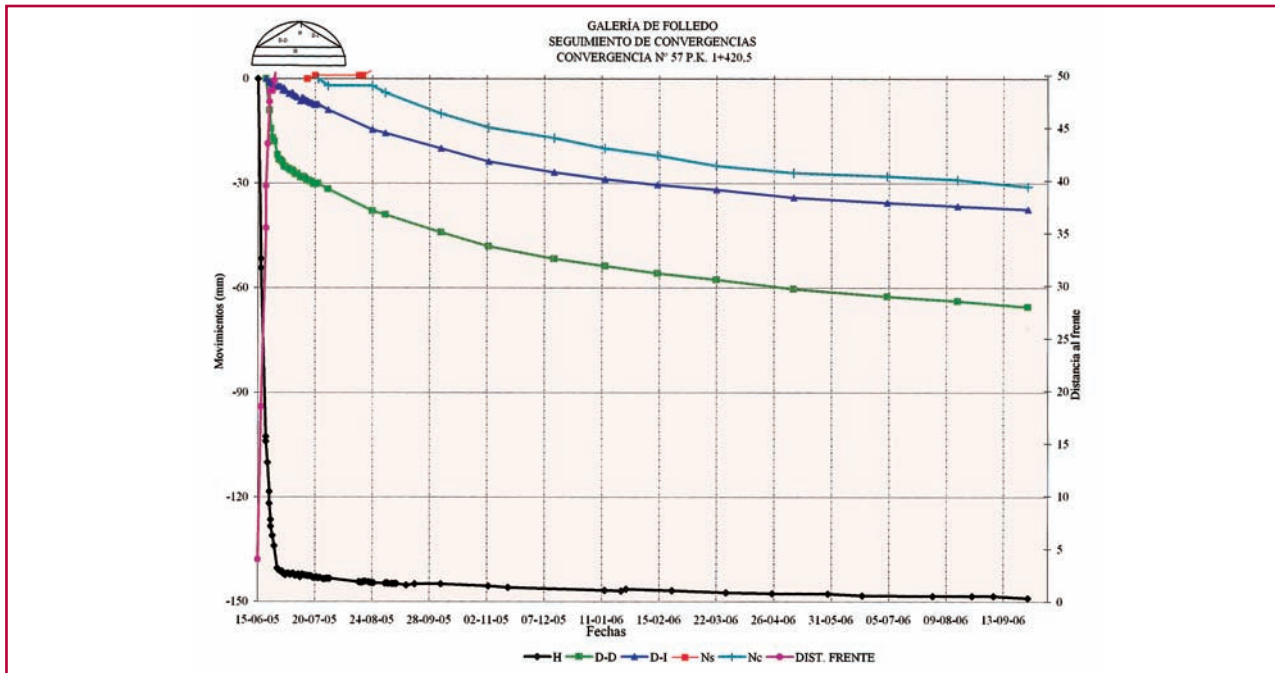


Fig. 14. Evolución de la deformación en la sección de convergencia nº 57/Development of deformation in convergence section No. 57.

mantenidas en los primeros días mayores de 10 mm/día, hasta el cierre de la sección con una solera. A partir de ese momento las velocidades han descendido a valores menores de 1 mm/día. El mayor movimiento detectado en esta formación, asociado a una zona de falla, llegó a alcanzar 157 mm entre hastiales.

Las últimas 5 secciones de convergencia se encuentran emplazadas dentro del tramo excavado en materiales pertenecientes a la Formación Formigoso. En estas pizarras los movimientos medidos, en general, han sido menores que en el caso de la formación San Pedro. Este hecho se debe, posiblemente, a la proximidad del frente final de excavación de la Galería y a que el sostenimiento aplicado sea el Tipo ID con contrabóveda.

Los valores máximos alcanzados en las distintas litologías se resumen en la tabla 4.

También es destacable la deformación diferida que se ha observado, con velocidades del orden de 1 mm/mes, en varias secciones de la formación San Pedro. Esta deformación se ha mantenido a lo largo del tiempo y ha hecho necesario el mantenimiento de las lecturas en la galería con una frecuencia de una lectura mensual, hasta el momento actual.

Con relación a la colocación de extensómetros, éstos se han colocado en todas las formaciones excavadas que a priori se preveían con peor comportamiento geotécnico:

The greatest movement detected in this formation, and associated with a fault area, reached 157 mm between the side walls.

The final five convergence sections are set within the excavated area of the Formigoso formation. In these shaley areas, the recorded movements were generally lower than in the San Pedro formation. This was probably due to the proximity of the final excavation front of the tunnel and to the fact that this area had Type ID support with inverted vault.

The maximum values reached in the different rock formations was as table 4.

The differed deformation recorded was also of note, with rates of around 1 mm/month in various sections of the San Pedro formation. This movement remained throughout and it has been necessary to take continuous monthly readings right up to the present date.

Tabla 4/Table 4

	La Vid pizarroso La Vid - shale	La Vid calcáreo La Vid - limestone	San Pedro San Pedro
Estación/Station	23	41	57
Máx. despl./Max. mov. (mm)	39,75	17,1	157
Cobertera/Cover (m)	187	233	301

1. PK 0+081,5: pizarras de Valporquero, Grupo La Vid.
2. PK 0+568: pizarras y calizas del Grupo La Vid.
3. PK 1+360: pizarras y areniscas del miembro intermedio de la Formación San Pedro.
4. PK 1+684: pizarras y areniscas del miembro intermedio de la Formación San Pedro.

De los resultados obtenidos tan solo señalar la sección instrumentada número 4, en la que el extensómetro del hastial derecho presenta un movimiento residual insignificante. El resto de extensómetros colocados se encuentran estables.

A la vista de los valores de deformación obtenidos en la formación San Pedro, citados anteriormente, se decidió ejecutar una serie de refuerzos en las zonas de influencia de las secciones que marcaban dichos registros, de forma que se consiguiese estabilizar la deformación. Los refuerzos que se aplicaron en la galería han sido, básicamente, los siguientes tipos:

- Capas adicionales de hormigón proyectado
- Densificado de la malla de bulones con:
 - bulones de 6 metros, en malla de 2 x 2 m
 - bulones de 9 m en 3 filas por hastial
 - bulones de 12 m en hastiales y/o solera
- Recrecido de solera
- Ejecución de contrabóveda

Con la ejecución de los refuerzos en estas secciones se ha observado el descenso de la velocidad de deformación de forma acusada, tal y como se expone a continuación:

Estación	Velocidad antes	Velocidad después
53	8 mm/día	0,4 mm/día
55	5 mm/día	0,7 mm/día
69	6 mm/día	0,6 mm/día

Entre las conclusiones que se han obtenido de la auscultación debemos señalar:

- La nivelación de la solera ha marcado, en aquellas zonas de peor calidad geotécnica, la necesidad de refuerzos en solera o aplicación de contrabóvedas curvas.

With regards to the placing of the extensometers, these were set in all excavated formations where poor geotechnical behaviour was envisaged:

1. 0+081.5: Valporquero shales, La Vid Group.
2. 0+568: shales and limestone of the La Vid Group
3. 1+360: shale and sandstone in the intermediate layer of the San Pedro formation.
4. 1+684: shale and sandstone in the intermediate layer of the San Pedro formation.

From the results obtained it is only necessary to refer to that of instrument section number 4 where the extensometer on the right wall showed negligible residual movement. All the other extensometers remained stable.

In view of the deformation values obtained in the San Pedro formation, it was decided to add a number of reinforcements in the areas of influence of the sections recording these deformations in order to stabilize the same. The following types of reinforcement were applied to the tunnel:

- Additional layers of shotcrete
- Denser rock bolt meshing with:
 - 6 metre rock bolts, in 2 x 2 m mesh
 - 9 metre rock bolts in three rows per wall
 - 12 metre rock bolts in walls and/or base
- Deepening of base
- Construction of inverted vault

On introducing these reinforcements in these sections, there was an acute drop in the rate of deformation, as may be seen below:

Station	Previous rate	Subsequent rate
53	8 mm/day	0,4 mm/day
55	5 mm/day	0,7 mm/day
69	6 mm/day	0,6 mm/day

The conclusions gained from the auscultation show:

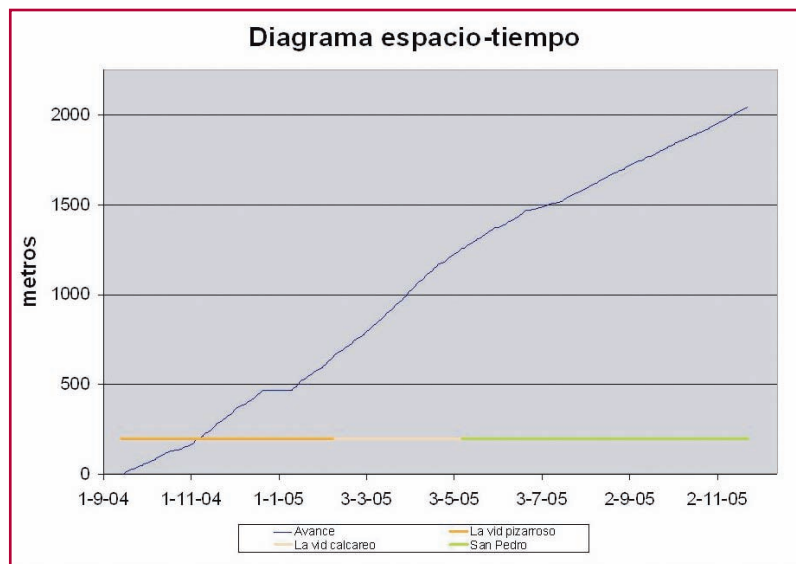
- The levelling of tunnel floors in areas of poorer geotechnical quality, makes it necessary to employ base reinforcement or the installation of curved inverted vaults.



Fig. 15. Refuerzo mediante bulones autoperforantes de 9 m en la base de los hastiales de la galería/Reinforcement with 9 metre self-drilling rock bolts at the base of the tunnel walls..

- Los extensómetros de varillas han sido los elementos de más difícil interpretación, y por tanto han suministrado menos información de cara al análisis del estado tensodeformacional del terreno. Esto se explica por el necesario retraso de la instalación de los extensómetros en relación al momento de la excavación de la sección, detectando únicamente los movimientos residuales.
- Los métodos ópticos han demostrado su fiabilidad para la lectura de secciones de convergencias, permitiendo unos rendimientos elevados y sin interferencias con los trabajos desarrollados, complementando las lecturas con cinta. Se hace necesario para ello la utilización de equipos automatizados de muy alta precisión. De esta forma se han conseguido lecturas muy tempranas, evitando pérdida de información referente al primer momento de deformación.
- La auscultación de la galería de Folledo se ha mostrado como una herramienta de especial importancia para el desarrollo de los trabajos, dado

- *The bar extensometers have been the most difficult elements to interpret and have, subsequently, provided less information for the stress-strain analysis of the ground. This may be explained by the necessary delayed installation of the extensometers following the excavation of the section and the fact that these only then detected residual movement.*
- *The optical methods have demonstrated their reliability for the reading of convergence sections. These providing high performance readings without interfering with the work and further supplemented by tape readings. It is subsequently necessary to employ very high precision automated equipment which provides very early readings and prevents any loss of information regarding initial deformation.*
- *The auscultation of the Folledo access adit has proved to be a particularly important tool for the development of the work as it has enabled the optimization of supports and established the*



que ha permitido la optimización de los sostenimientos, estableciendo los refuerzos necesarios en las zonas más exigidas, aplicándose sucesivamente en función de las deformaciones alcanzadas.

Fig. 16. Gráfico de avances/Rate of advance.

6. Entronque con los túneles de línea

6.1. Rendimientos alcanzados

La ejecución de la galería comenzó una vez finalizados los trabajos de excavación y sostenimiento del emboquille de acceso, el día 13 de septiembre de 2004. La excavación de los 2.021 m se finalizó el 24 de noviembre de 2005, lo que da un rendimiento de 140 m/mes. En la figura 16 se muestra el gráfico de avance en función de los litotipos geológicos atravesados.

6.2. Caverna de entronque

El tramo final de la galería, que supone el entronque con los túneles de línea, se ha excavado a lo largo del mes de octubre de 2006. En el punto de entronque se ha excavado una caverna en la que se están llevando a cabo trabajos de revisión de las ruedas de corte de las dos tuneladoras que llegan a este punto desde La Pola de Gordón. Para ello, en la caverna se han replanteado las zonas de llegada de la máquina y se ha modificado el bulonaje en dichas zonas sustituyendo los bulones super-swelllex por bulones de fibra de vidrio que puedan ser excavados fácilmente por las tuneladoras. Además, se han excavado unos nichos de entrada pa-

reinforcement necessary in the most stressed areas. This system having been successively applied in accordance with the deformations recorded.

6. Connection with the main railway tunnels

6.1. Performance

Work on the access adit began on the completion of the excavation and support work to the tunnel entrance on 13 September 2004. The excavation of the 2021 metre access tunnel was completed on 24 November 2005, giving an average performance of 140 metres per month. Figure 16 shows a chart of the rate of advance in accordance with the geological rock formations that were crossed.

6.2. Connection Cavern

The final section of the access adit, connecting with the railway tunnels, was excavated throughout October 2006. A cavern was excavated at the breakthrough point between the tunnels to carry out inspection work of the cutting wheels of the two TBMs that had reached this point from La Pola de Gordón. As such, the arrival areas of the machines was laid out in the cavern and in these areas the superswelllex rock bolts were replaced by glassfibre pins which could be easily excavated by the TBMs. A number of entrance

Fig. 17. Punto de entronque de la TBM del túnel Oeste en la caverna de Folledo/Longitudinal section and plan of the connection between the Folledo access adit and the railway tunnels..



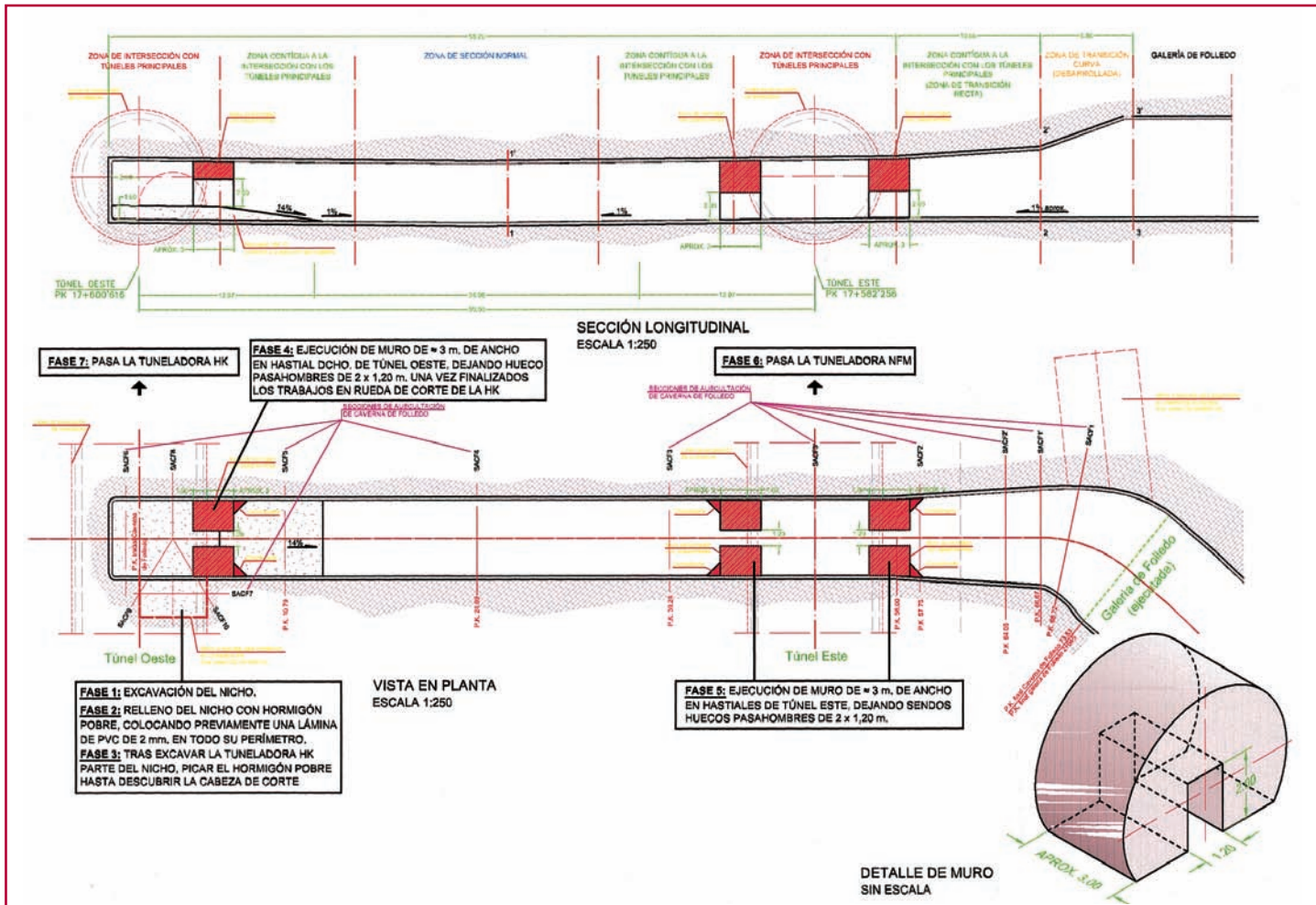


Fig.18. Planta y perfil longitudinal del entronque de la galería de Folledo con los Túneles de línea/Breakthrough point in the Folledo cavern by the TBM on the West tunnel.

ra la rueda de corte y se han macizado con hormigón en masa, con el objetivo de garantizar en todo momento la estabilidad del punto de entronque entre ambas excavaciones. El esquema del entronque es el que se puede ver en la figura número 18.

Este entronque intermedio ha servido también para comprobar el error de guiado de las máquinas. Se ha comprobado que la diferencia entre el eje teórico del trazado de cada túnel y el eje real de la excavación es menor de 5 centímetros, lo que constituye un éxito rotundo y demuestra el buen trabajo realizado en la materialización de los trazados teóricos de los 2 túneles de línea y de la galería de Folledo.

6.3. Conclusiones

La ejecución de la galería de acceso intermedio de Folledo se ha realizado de acuerdo a los criterios de seguridad, calidad y respeto al medio ambiente que

recesses were also excavated for the cutting wheel and were shored by plain concrete in order to guarantee the stability of the connection point between both bores. The connection layout is shown below in figure 18.

This intermediate connection has also served to monitor the error in the guiding of the machines. The difference between the theoretical centreline of the alignment for each tunnel and the real centreline of the excavation was less than 5 centimetre which is an outstanding success and demonstrates the precision work carried out in the driving of the two railway tunnels and the Folledo access adit.

6.3. Conclusions

The construction of the Folledo intermediate access tunnel was carried out in accordance with the safety, quality and environmental criteria

establece ADIF en la ejecución de todas sus obras. Se han obtenido unos rendimientos muy notables con un valor medio de 140 m/mes.

La ejecución de esta galería ha permitido un mayor conocimiento de la geología del macizo, a una escala real, aportando una información valiosísima relativa al comportamiento deformacional de las formaciones atravesadas.

Además, esta galería, que en proyecto se definía como un acceso destinado únicamente a la fase de construcción, podrá ser empleada en la fase de explotación como vía de emergencia comunicada directamente con el exterior.

Agradecimientos

Los autores quieren expresar su reconocimiento a todos los técnicos y los trabajadores involucrados en la ejecución de la galería de Folledo, tanto de la UTE FCC-ACCIONA como de la asistencia técnica, pues con su dedicación y profesionalidad han logrado que la obra se ejecutase con seguridad, calidad y unos rendimientos excepcionales. ♦

established by ADIF in the construction of all their works. Very high advance rates have been achieved in this tunnel with an average progress of 140 metres per month.

The construction of this adit has provided greater knowledge of the geology of the massif, at real scale, and has given very valuable information regarding the deformation behaviour of the crossed formations.

Furthermore, this adit, initially designed purely as an access during the construction stage, could well be employed during the operating stage as an emergency route directly connecting with the outside.

Acknowledgements

The authors wish to express their acknowledgement to all the technicians and workers involved in the Folledo adit work, both at UTE-FCC-ACCIONA and the technical assistance department. Their dedication and professionalism has ensured that the work has been completed with safety, quality and at an exceptional rate. ♦

Referencias/References:

-MORENO TALLÓN, ELÍAS. 1995. "Aplicación de clasificaciones geomecánicas y curvas características". Curso sobre túneles en roca, CEDEX.

-LÓPEZ MARINAS, JUAN MANUEL. 2002. "Geología aplicada a la obra civil", Ed. CIE Inversiones Editoriales Dossat 2000.

-RODRÍGUEZ ORTIZ, JOSÉ MARÍA. 1995. "Diseño de Túneles en roca" Curso sobre túneles en roca, CEDEX.

-Ministerio Fomento (2003). "Proyecto Básico de los Túneles de Pajares."

-Ministerio Fomento (2003). "Proyecto y obra de plataforma de la Línea de Alta Velocidad León-Asturias. Tramo: Túneles de Pajares (Lote 1)".