

Diseño y construcción del emboquille Norte del Túnel del Almendral

El Túnel del Almendral forma parte del tramo Barranco de Gafarillos-Los Arejos del Corredor del Mediterráneo de Alta Velocidad. La obra fue adjudicada por el ADIF a la UTE Gafarillos, formada por las empresas Obras Subterráneas (OSSA) y Tableros y Puentes, S.A. (TAPUSA). El emboquille Norte del túnel presenta un esviaje extremo con respecto a la orografía en un contexto geotécnico también desfavorable, por lo que constituye una boca de extremada dificultad constructiva. En este artículo se comentan las distintas alternativas que se han planteado desde la fase de proyecto hasta su construcción, así como las problemáticas que surgieron en ambas fases.

El trazado presenta un túnel denominado Almendral de 1.106 m de longitud incluyendo un túnel en mina y sendos túneles artificiales en ambas bocas:

- PK Inicio túnel artificial entrada: 8+167.
- PK Inicio túnel en mina entrada (Emboquille Norte): 8+188.
- PK Final túnel en mina salida (Emboquille Sur): 8+974.
- PK Túnel artificial salida: 9+273.

Marco geológico

Desde el punto de vista geológico, la zona de estudio forma parte de las Cordilleras Béticas, concretamente de su zona interna, también llamada zona Bética. El túnel se desarrolla fundamentalmente a través de Esquistos Negros del Complejo Nevado Filábride (Litotipo ENF). En el entorno de la boca sur se localizan materiales carbonatados del Complejo Alpujarride. Entre ambos complejos se ubica un cabalgamiento a favor del cual se han formado rocas de falla tipo cataclásticas, de naturaleza filítica.

El emboquille Norte del túnel del Almendral se excavó en los Esquistos negros con cuarcitas (E_{NF}) del Complejo Nevado-Filábride. Se trata de unos esquistos con una marcada esquistosidad con algunos niveles más areniscos de potencia decimétrica.

La esquistosidad posee una dirección N-032°-E (dirección de buzamiento 122) y un buzamiento de 60° hacia el SE. Además existen dos familias principales de discontinuidades, que responden a las siguientes orientaciones medias (buzamiento/dirección de buzamiento):

- esquistosidad $S1$: 60/122
- discontinuidad $J1$: 74/215
- discontinuidad $J2$: 41/317

Descripción de las distintas alternativas de diseño

Desde la fase de proyecto de Construcción hasta su construcción se han barajado y

desarrollado hasta cuatro alternativas de diseño:

- Solución con pantalla de micropilotes y túnel tortuga.
- Solución con talud frontal esviado.
- Solución con talud frontal perpendicular.

A continuación se describen estas tres soluciones:

a) Solución con pantallas y túnel tortuga (Proyecto de Construcción)

En el Proyecto de Construcción se contemplaba realizar en este portal una pantalla de micropilotes, en el talud lateral izquierdo, mientras que en el talud frontal se incluía la construcción de un túnel tortuga al abrigo de pantallas de micropilotes, minimizando la excavación de tierras. Las principales características de esta solución eran:

- *Talud lateral izquierdo*: cuatro muros de micropilotes anclados, más muro forro, con una altura total de 30 m, hasta la cota 271,5 que corresponde con el arranque de la destroza del túnel.
- *Talud lateral derecho*: se adopta una pendiente 1H: 1V sin refuerzo alguno.

Palabras clave: BULONES, CERCHA, DEFORMACIÓN, DISEÑO, EMBOQUILLE, ESTABILIDAD, ESVAJE, GUNITA, MICROPILOTE, PANTALLA, TALUD, TÚNEL.

María BOISÁN, SUBTERRA INGENIERÍA.
Santiago VEYRAT, SUBTERRA INGENIERÍA.
Sergio ALVAREZ, OBRAS SUBTERRÁNEAS.
Javier ROMERO, TAPUSA.

- *Talud frontal*: excavado con una pendiente 1H: 2V, reforzado con bulones, malla y hormigón proyectado, excavado en bataches de 2 m. El tránsito entre el emboquille y el túnel en mina se realizaba con un túnel tortuga de 12 m de longitud, excavado entre sendas pantallas dobles de micropilotes.

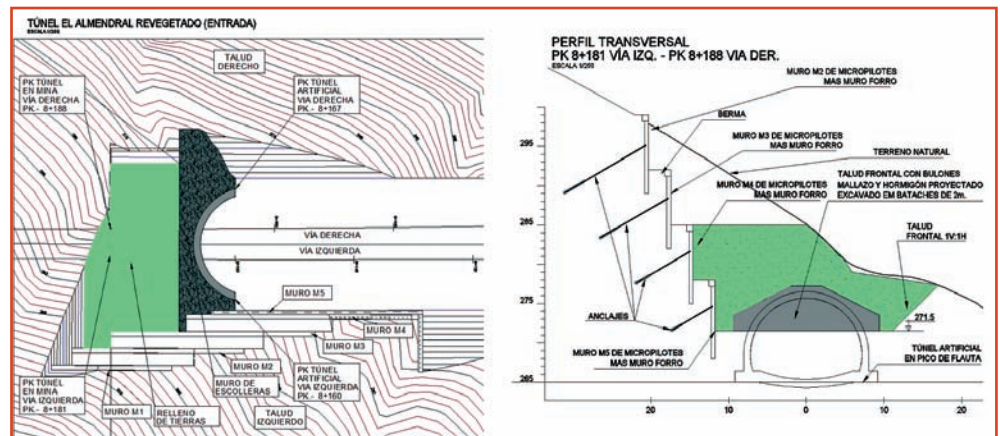
En la Fig. 1 se muestra la solución que se había previsto en el proyecto para el emboquille de entrada del túnel del Almendral.

b) Talud frontal esviado

El emboquille Norte, como se ha comentado en la introducción, presenta un extremado esviaje entre el trazado y la ladera, así como entre el trazado y la esquistosidad.

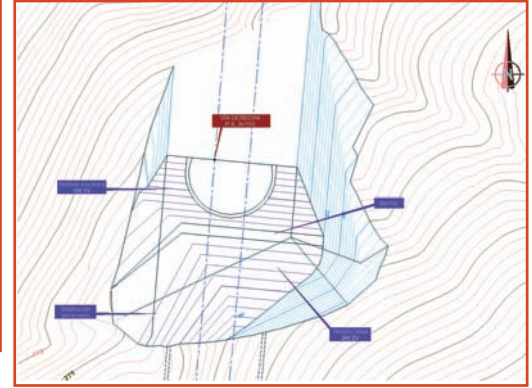
En las Fotos A y B se muestran dos panorámicas del emboquille, previas a la ejecución, tomadas desde el eje de trazado, donde se aprecia el límite de expropiación y la inexistencia de suelos cuaternarios.

Esta disposición estructural resulta, sin embargo, favorable desde el punto de vista de la estabilidad de los taludes lateral izquierdo y frontal.



[Figura 1] .- Solución constructiva adoptada en el Proyecto de Construcción.

Emboquille



■ [Fotos A y B] .- Dos aspectos del emboquille norte previo a su ejecución.

■ [Fig. 3] .- Diseño final del emboquille.

Este esviaje, unido a la inexistencia de recubrimientos cuaternarios, hacía aconsejable la adopción de un talud frontal esviado 30° en el P.K. 8+171 en la vía derecha.

Para los taludes se manejaron dos pendientes una 1H/2V y 3H:2V para los metros más superficiales.

La Fig. 2 muestra el diseño geométrico que se considera óptimo para esta configuración de taludes. Como puede apreciarse de este modo la altura máxima de excavación se limita a 25 m, aunque implica una longitud de túnel en mina 17 m mayor a la de proyecto, 5 m superior si se consideran los 12 m del túnel tortuga.

El emboquille se remata con un falso túnel convencional similar al contemplado en proyecto que posee la virtud de rellenar con tierras la totalidad del desmonte en el eje del trazado dejando una altura de desmonte final máxima de 15 m. Para ello la estructura del falso túnel debiera prolongarse hasta el PK 8+153, tal como se aprecia en la Fig. 3.

Esta alternativa requiere el refuerzo de los taludes mediante un sistema de bulones y guinita con las siguientes características:

- Mallazo electrosoldado 150x150x6 mm.
- Bulones $\Phi 32$ mm y 6 m de longitud, en un malla de 1,5 x 1,5 m.
- Capa de hormigón proyectado H35 de 15 cm de espesor.
- Drenes horizontales de 9 m de longitud en una malla de 3 x 3 m.

c) Talud frontal perpendicular

Finalmente se definió un emboquille con talud frontal perpendicular al eje de trazado.

El diseño de este emboquille se realizó con taludes con una inclinación 1H/2V. La transición con los taludes laterales, también con inclinación 1H/2V se llevó a cabo mediante chafanes de la misma inclinación.

En la Fig. 4 se muestra el diseño descrito

Desarrollo de la construcción:

El diseño ejecutado es el que se muestra en la Foto C en el que el talud frontal es perpendicular al trazo evitando el esviaje.

A.- Aumento de la altura máxima de talud

Las modificaciones en la geometría del emboquille con taludes de pendientes 1H:2V y sin esviaje del talud frontal, determinó que la altura máxima del talud lateral izquierdo fuera de 30 m, lo que supone una altura 5 m superior a la que alternativa con talud es-

viado. Por este motivo fue necesario revisar las condiciones de estabilidad del talud, así como los refuerzos necesarios para su estabilización.

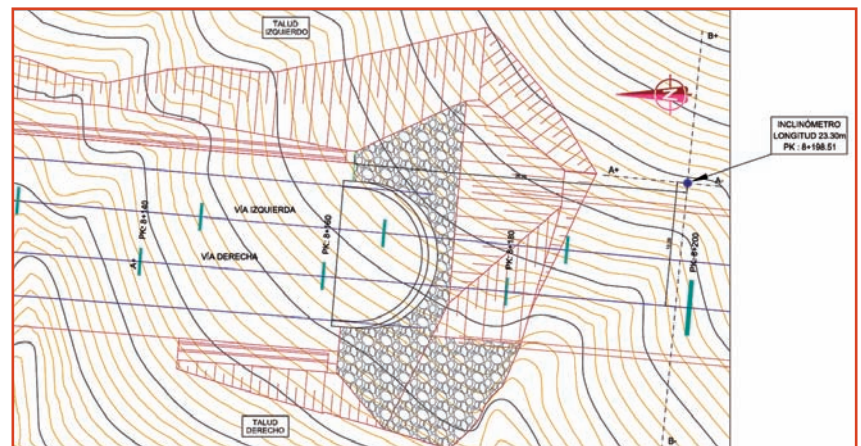
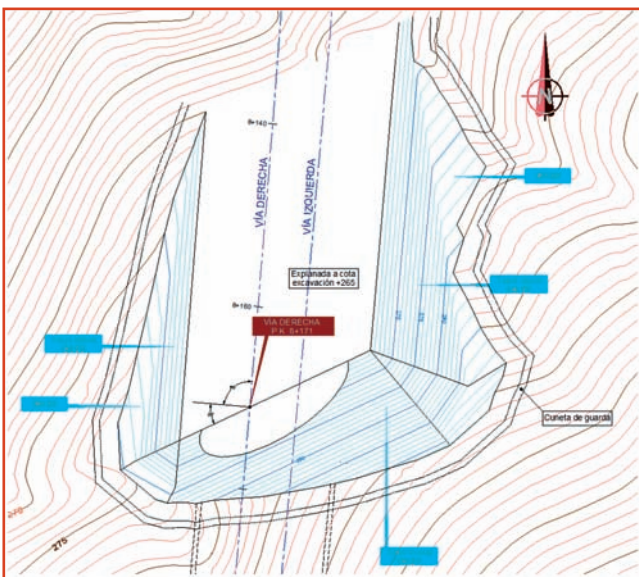
A la vista de los cálculos realizados se recomendó adoptar el siguiente refuerzo en el talud lateral izquierdo del emboquille Norte del Túnel del Almendral:

- Mallazo electrosoldado 150x150x6 mm.
- Bulones activos $\Phi 32$ mm y 12 m de longitud, en una malla de 1,5 x 1,5 m tesados a 25 t.
- Capa de hormigón proyectado H30 de 15 cm de espesor.
- Drenes horizontales de 9 m de longitud en una malla de 4 x 4 m y/o esporádicos.

B.- Discusión sobre parámetros de cálculo

Durante la ejecución de los taludes, y como consecuencia de la gran variabilidad que existían entre los datos de resistencia al corte de la unidad de Esquisto Negros (ENF), se planteó la necesidad de revisar los análisis de estabilidad contemplando las siguientes hipótesis:

- **Hipótesis I: Parámetros de Proyecto:**
 - Densidad Aparente = $2,70 \text{ g/cm}^3$;
 - Cohesión $c = 0,11 \text{ MPa}$;
 - Fricción $\phi = 30^\circ$
- **Hipótesis II: Parámetros revisados:**



■ [Figura 2] .- Diseño geométrico de la excavación.

■ [Figura 4] .- Geometría adoptada para la construcción.



■ [Foto C].- Aspecto del emboquille una vez ejecutada la excavación.

- Densidad Aparente = 2,70 g/cm³;
- Cohesión $c = 0,11$ MPa;
- Fricción $\phi = 25^\circ$

• **Hipótesis III:** Con la mitad superior del talud excavado en esquistos con las propiedades reducidas y la mitad inferior con los parámetros de proyecto:

Complementariamente se consideraron en los cálculos dos alternativas de refuerzo:

- **Sostenimiento Tipo I:** bulonado sistemático con bulones de acero B 500 S de 32 mm de diámetro, de 6 m de longitud en los dos tercios inferiores y de 12 m en el tercio superior tesados a 15 t, en una malla de 2,0 x 2,0 m.
- **Sostenimiento Tipo II:** bulonado sistemático con bulones de acero B 500 S de 32 mm de diámetro, de 12 m de longitud en toda la altura del talud tesados a 25 t, en una malla de 1,5x1,5 m.

Con estas premisas se realizaron los correspondientes análisis de estabilidad global del talud mediante el método de *Bishop Simplificado*, considerando tanto condiciones estáticas como pseudodinámicas, para este último análisis se considero una aceleración horizontal de cálculo de 0,155g. Los análisis se llevaron a cabo mediante el empleo del software *Slide v6.0*, obteniéndose los resultados que se muestran en la **Tabla I**.

A la vista de estos datos se comprobó mediante el análisis cinemático de cuñas, la vali-

dez del sostenimiento seguridad se consideraron los parámetros correspondientes a la *Hipótesis II* (densidad aparente = 2,70 g/cm³; cohesión $c = 0,11$ MPa; fricción $\phi = 25^\circ$).

Esto requirió incrementar el refuerzo obteniéndose finalmente los **FS** que se muestran en la **Tabla II**.

C.- Talud de transición

En la transición entre el talud frontal y el talud lateral izquierdo del emboquille se formo un cartabón con pendiente 1H:3V de unos 30 m de altura tal como se muestra en la **Foto D**. En el análisis de la estabilidad global del talud de transición izquierdo o cartabón izquierdo en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad de 1,230 que se considera insuficiente para un talud de estas características, por lo que se recomendó un refuerzo más pesado a base de mallazo, 15 cm de gunita y bulones activos en una malla de 1 x 2 m, obteniéndose un factor de seguridad de 1,629, al analizar esta configuración con sostenimiento en condiciones pseudodinámicas se obtuvo un factor de seguridad de 1,212.

Con una pendiente de 1H:3V se generan cuñas de roca de pequeño volumen a favor de **J1** y **J2**, que poseen factores de seguridad en torno a 0,44 sin refuerzo, disminuyendo a 0,36 en condiciones diná-

	Análisis Estático			Análisis Pseudodinámico		
	Hipótesis I	Hipótesis II	Hipótesis III	Hipótesis I	Hipótesis II	Hipótesis III
Talud Sin Refuerzo	1,348	1,220	1,353	1,084	0,980	1,088
Sostenimiento Tipo I	1,375	1,251	1,387	1,106	0,996	1,111
Sostenimiento Tipo II	1,549	1,375	1,548	1,206	1,060	1,205

■ [TABLA I] .- Factores de seguridad obtenidos.

Altura de talud	Sostenimiento Tipo	Método de Bishop		Método de Spencer	
		Estático	Pseudodinámico	Estático	Pseudodinámico
20	No Necesario	1,604	1,264	1,716	1,313
22	Tipo IVb	1,511(*)	1,520	1,613 (*)	1,313
25	Tipo IVb	1,375	1,306	1,445	1,334
27	Tipo IVb	1,321	1,280	1,393	1,297

*)Valores obtenidos sin aplicación de sostenimiento, el talud no alcanza los factores de seguridad adecuados en condiciones pseudodinámicas

■ [TABLA II].- Factores de seguridad finalmente obtenidos.

micas. Los factores de seguridad aumentan a 10, estático y dinámico, al considerarse el efecto del refuerzo.

La *foto D* muestra el cartabón izquierdo con el refuerzo propuesto ejecutado.

La *foto D* muestra el cartabón izquierdo con el refuerzo propuesto ejecutado.

Análisis del comportamiento del túnel en los metros iniciales

Una vez finalizado el emboquille resultaba primordial asegurar que la excavación del túnel no iba a desestabilizar el talud.

Con el fin de realizar un control de la estabilidad del talud frontal del *Túnel del Almen-dral*, se instaló un inclinómetro en las proximidades de la cabecera del talud frontal.

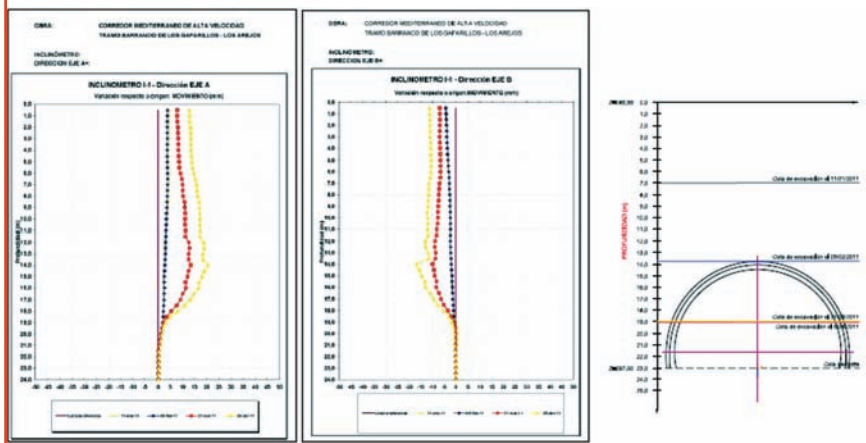
En las gráficas de la **Fig. 5**, se muestran la evolución de las mediciones realizadas en el inclinómetro situado a 10,5 m del inicio del túnel.

Los datos del inclinómetro se compararon con la evolución de las convergencias medidas en el túnel en sus 40 primeros metros de excavación, con objeto de determinar la influencia del avance de la excavación del túnel en la estabilidad del talud. Por ello se analizó las medidas del inclinómetro con las medidas obtenidas en una estación de convergencias dentro del túnel.

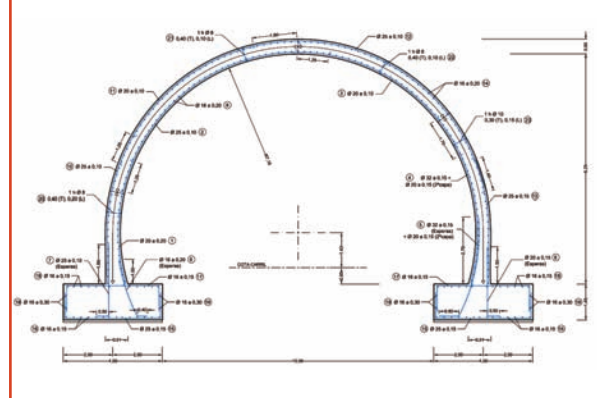
Adicionalmente, se realizó una modelización numérica tridimensional (*FLAC 3D*), de los metros de túnel comprendidos entre los PP.KK. 8+180 y 8+220, por lo que se pudieron comparar los resultados teóricos con los



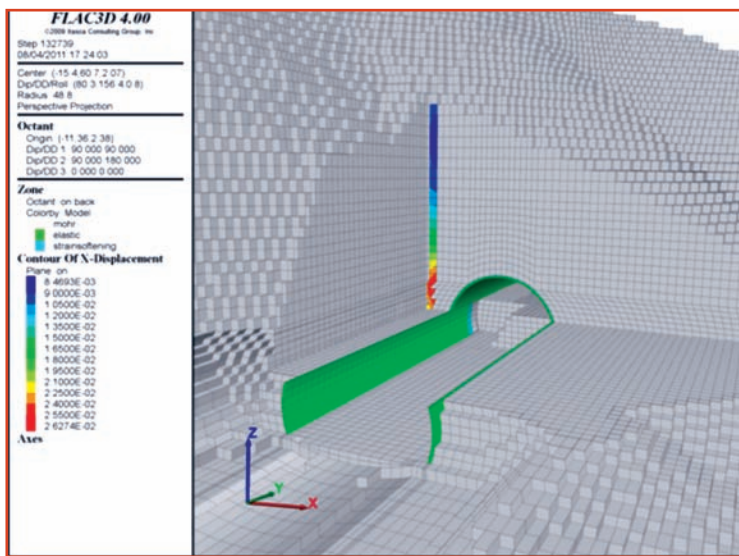
■ [Foto D] .- Vista del cartabón izquierdo ejecutado, en el talud de emboquille.



[Fig. 5].- Lecturas obtenidas del inclinómetro de control situado a 10,5 m del emboquille.



[Figura 7].-Estructura de falso túnel diseñada con hormigón armado.



[Figura 6] .- Situación del inclinómetro respecto del túnel.



[Foto E] .- Estructura de falso túnel diseñada mediante cerchas.

resultados reales obtenidos de los desplazamientos del inclinómetro (Fig. 6).

De los datos analizados se dedujeron claramente tres hechos:

- Las deformaciones en el inclinómetro eran mínimas (2,5 mm) antes de la llegada del frente del túnel, lo que significa que el talud era estable.
- El plano de cizalla detectado en el inclinómetro está ubicado a una profundidad de 18,5 m que coincide con la profundidad a la que se sitúa la cota de la solera del avance.
- El máximo desplazamiento se produce a una profundidad de 14 m que coincide sensiblemente con la profundidad a la que se encuentra la clave del túnel.

Se deduce que la velocidad máxima medida en el inclinómetro se produjo justo al realizar la excavación del túnel y fue de 0,1 mm/día, mientras que con posterioridad a este evento la velocidad disminuyó a la mitad, siendo en algo inferior a 0,5 mm/día. En la Fig. 6 se muestra la posición del inclinómetro respecto al avance del túnel.

Falso túnel ejecutado mediante cerchas

En todas las alternativas presentadas en el artículo, el emboquille Norte del túnel del Almen-

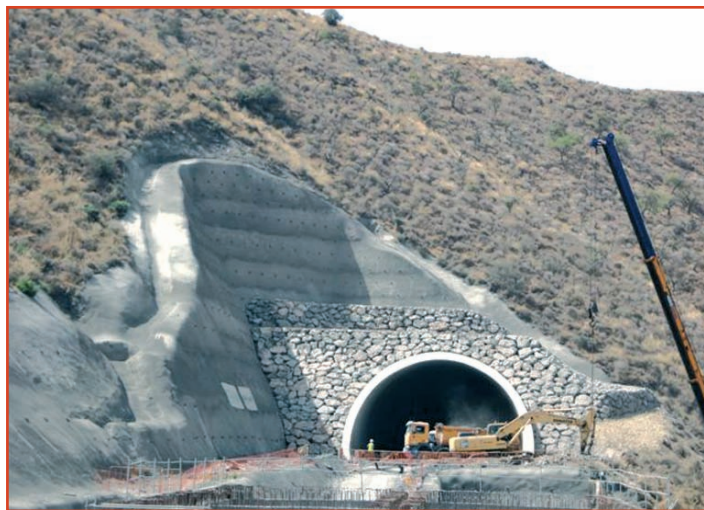
dral se remataba mediante la ejecución de un falso túnel.

El diseño inicial recogido en el proyecto proponía la ejecución de este túnel artificial mediante una estructura de hormigón armado rematado con un pico de flauta. La cimentación de esta estructura estaba prevista se realizara mediante zapatas (Fig. 7).

Este diseño se modificó por una estructura compuesta por perfiles HEB-180 y chapa Bernold como encofrado perdido y hormigón proyectado HP-35. La cimentación de esta nueva estructura exigía la ejecución de contrabóveda.

La contrabóveda y la parte inferior de los hastiales fue necesario diseñarlas como estructuras de hormigón armado a fin de permitir una correcta transmisión de los esfuerzos, primeramente de la bóveda a los hastiales y finalmente al terreno a través de la contrabóveda.

En la Foto E se muestra la bóveda de la estructura una vez ejecutada la contrabóveda



[Foto F].- Vista frontal del acabado del emboquille norte del Túnel del Almendral.

y los hastiales mediante hormigón armado. A su vez, en la Foto F se puede observar el aspecto del emboquille Norte de Túnel del Almendral tras la finalización del falso túnel de acceso.

SUBTERRA INGENIERÍA, S.L.
 Vallehermoso, 30. Bajo A
 28015 Madrid
 ☎: 915 340 530 • Fax: 915 331 475
 E-mail: info@subterra-ing.com
 Web: www.subterra-ing.com