

# La construcción del emboquille Norte del Túnel de Nocedo

## *The construction of the portal of Nocedo's Tunnel*

R. Raúl Míguez Bailo<sup>(1)</sup>, J. Fernando Carreño Martínez<sup>(2)</sup>, E. Pradera Gámez<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Jefe de Infraestructura<sup>(\*)</sup>

<sup>(2)</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Director de Obra<sup>(\*\*)</sup>

<sup>(3)</sup> Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos<sup>(\*\*\*)</sup> Asesor Geotécnico y de Túneles de ADIF

<sup>(\*)</sup> ADIF, <sup>(\*\*)</sup> INECO

<sup>(\*\*\*)</sup> ICYFSA, Avda. de Viñuelas nº27, 1ºD, 28760, Tres Cantos (Madrid). icyfsa@icyfsa.com

**Abstract:** *This paper describes the works accomplished at the portal of exit of Nocedo's Tunnel. The solution finally executed differs from the designed in the initial project, which consisted in an important false tunnel, defined under the concept of the known as method Carinthia. This solution was the consequence of the difficult morphologic and geotechnics conditions of the zone, and the imposition of some excessively restrictive criteria for the position of the portal of attack of the conventional tunnel. During the construction, after getting a better knowledge from the lot, the execution of the stretch like conventional tunnel came into question, which finally has executed of totally satisfactory way.*

**Key words:** *tunnel, portal, Carinthia*

## INTRODUCCIÓN

El túnel de Nocedo es el último de los seis túneles (Castro, Alba, Peredilla, Buen Suceso I, Buen Suceso II y Nocedo) que incluye el Lote 0 de la Variante de Pajares que discurre entre la población de la La Robla y el acceso a los Túneles de Pajares que salvan la cumbre de la cordillera.

El túnel de Nocedo es un túnel simple para vía doble con una longitud, según proyecto, de 557 metros de túnel de mina y 144 metros de falso túnel, iniciándose en el p.k 8+533 y finalizando en el p.k 9+234.

La sección interior libre del túnel se define con 90 m<sup>2</sup> de sección por necesidades aerodinámicas derivadas de la circulación de trenes a alta velocidad.

La construcción del túnel se ha planteado bajo la filosofía del Nuevo Método Austriaco (NATM), ejecutándose la excavación en dos fases de avance y destroza.

Geológicamente el túnel de Nocedo tiene una gran influencia tectónica ya que está atravesado por múltiples fallas que han afectado a los materiales frágiles que constituyen muchas de las distintas formaciones atravesadas a lo largo de su recorrido.

Dentro de la complejidad geológica general del túnel destaca la existencia en la boca de salida (lado norte) de una importante acumulación de material coluvionar de tipo de canchal o pedregal, formado por bloques y gravas de cuarcitas y cuarzoarenitas provenientes de la formación Nocedo y de calizas de la formación Portilla.

A partir del conocimiento, obtenido en su día, de las condiciones geotécnicas de este emboquille el proyecto incorporó una solución basada en un túnel artificial ejecutado de acuerdo con el método conocido como CARINTHIA o TORTUGA.

En esta ponencia se expone la solución constructiva finalmente adoptada a la vista de las condiciones observadas en el terreno una vez iniciada la obra y tras efectuar los oportunos reconocimientos adicionales, lo cuales ha sido posible por las facilidades que siempre aporta la obra especialmente en lo que se refiere a la disponibilidad de terrenos y medios.

## DISEÑO DEL PROYECTO

El criterio general que se establece en el proyecto para la definición de los emboquilles de los túneles fue la de encajar el punto de ataque en mina en una posición en la que gravite sobre la clave del túnel un mínimo de un diámetro en roca sana. Con ello evidentemente se evita la ejecución de los túneles afectando a los recubrimientos coluvionares de las laderas.

El esquema ilustrativo de este planteamiento es el que queda reflejado en la FIGURA 1 que se adjunta a continuación.

La razón con la que se justifica este criterio es, literalmente, la de que en los *emboquilles demasiado someros no se suele desarrollar bien el “efecto bóveda” en los materiales que quedan por encima de la clave del túnel, lo que puede provocar inestabilidades*. Evidentemente este argumento parece excesivamente vago especialmente si se consideran a las

consecuencias a las que puede llevar desde el punto de vista del encaje de las soluciones de un proyecto.

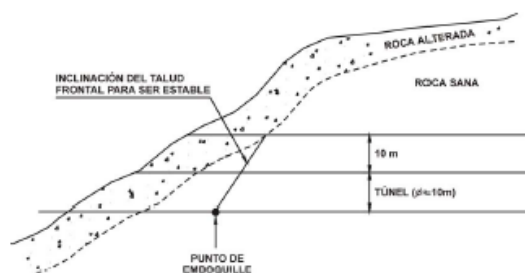


FIGURA 1. Criterio de proyecto para el encaje de boquillas.

A partir de este criterio general se enfoca el proyecto del emboquille norte del túnel de Nocado el cual presenta las particularidades que se indican, de manera muy resumida, a continuación.

A la luz de la información disponible en el momento de realización del proyecto, el emboquille de salida del Túnel de Nocado se plantea afectando a una extensa acumulación de bolos gruesos de arenisca y otros tipos de rocas, con una potencia media estimada de unos 6 a 8 m. Este depósito cubre la ladera, constituyendo lo que se denomina en el proyecto como “pedrera” o “canchal” (FIGURA 2).

De acuerdo con esta información este depósito coluvionar debía presentar, según se indica en el proyecto, las siguientes características:

- Estar constituida por bolos angulosos o subredondeados de magnitud decimétrica, con escasa matriz.
- Permeabilidad muy alta.
- Un talud natural de unos 33°, por lo que, dado la escasa matriz de finos que presenta, este ángulo debería corresponder, aproximadamente, a su fricción.



FIGURA 2. Vista del canchal incluida en el proyecto

Ante esta hipótesis el proyectista optó por la solución ya citada, consistente en una excavación a

cielo abierto y la construcción de un falso túnel, todo ello bajo el método conocido como CARINTHIA, consistente en la ejecución de una bóveda de hormigón armado, tras una excavación más o menos somera y apoyada sobre sendas hileras de pilotes en ambos hastiales. Tras la ejecución de la citada bóveda se efectúa el relleno que restituye el terreno original, excavándose posteriormente la destroza.

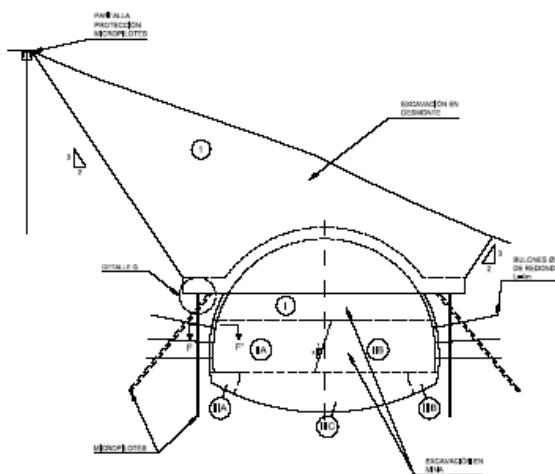


FIGURA 3. Esquema de la solución de proyecto.

Dada la naturaleza del terreno afectado, el proyecto preveía la ejecución de las pantallas laterales de apoyo de la bóveda mediante micropilotes metálicos.

Al margen de otras consideraciones la mayor dificultad e incertidumbre del método radicaba en la excavación previa necesaria para el apoyo de la bóveda, ya que la misma debía cortar el relleno coluvionar, por lo que se precisaba del empleo de pantallas de pilotes ancladas, a lo largo del talud frontal y en la mayor parte del talud lateral izquierdo.

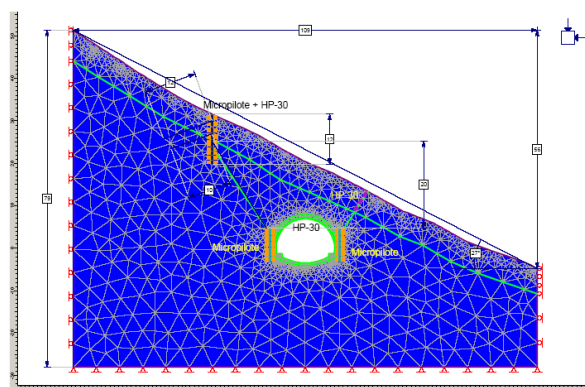


FIGURA 4. Modelo MEF de cálculo del proyecto

La complejidad del procedimiento constructivo adoptado así como las incertidumbres de todo tipo que se ven involucradas en el mismo quedan claramente de manifiesto en el modelo de cálculo MEF desarrollado en su momento y que se incluye en la FIGURA 4.

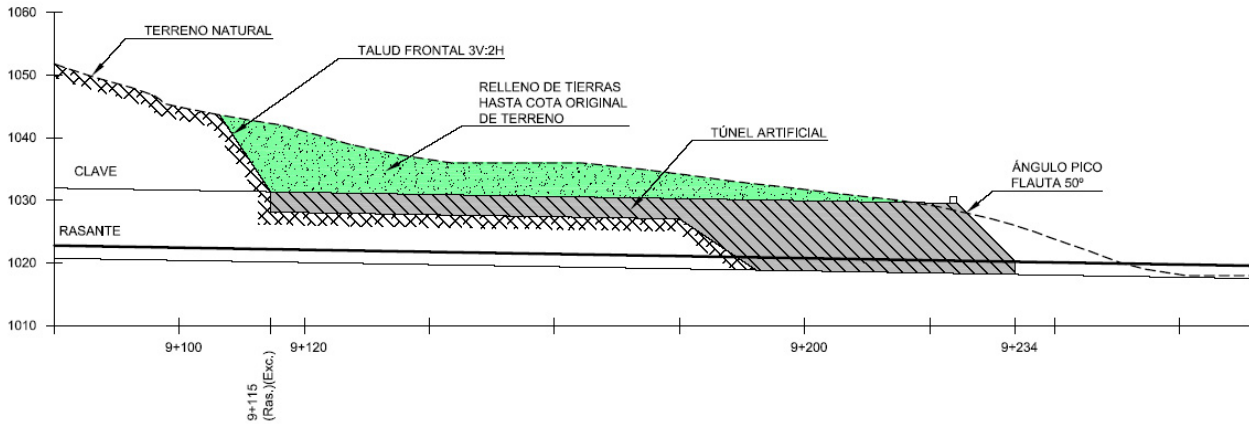


FIGURA 5. Esquema del perfil longitudinal de la solución incluida en el proyecto.

Adicionalmente el problema afecta igualmente al talud frontal en el que también se corta el "canchal" por lo que ha de ser objeto de los tratamientos del mismo tipo con el objetivo de garantizar su estabilidad.

El perfil longitudinal de la solución proyectada se indica esquemáticamente en la FIGURA 5.

**SOLUCIÓN CONSTRUIDA**

Una vez iniciada la construcción se pudo acceder a la zona afectada efectuándose distintos reconocimientos, consistentes en sondeos y catas, con los cuales se obtuvo un mejor conocimiento de la naturaleza y dimensiones del recubrimiento coluvionar.

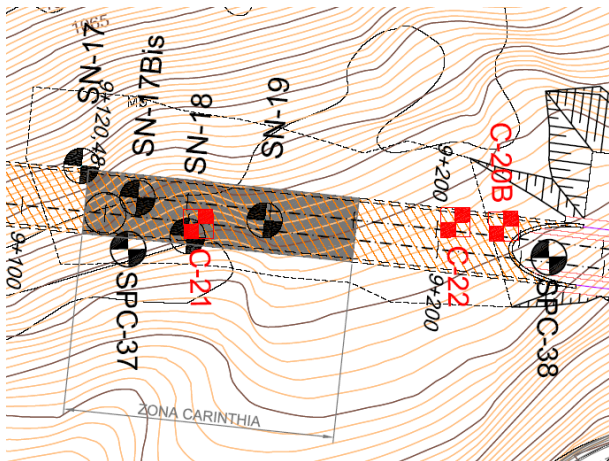


FIGURA 6. Planta de labores de reconocimiento

En cuanto a las dimensiones de dicho recubrimiento se pudo constatar la existencia de espesores sensiblemente superiores a los previstos inicialmente en proyecto (6-8 m), tal y como puede comprobarse en el perfil longitudinal de la boquilla reinterpretado a partir del conjunto de la información finalmente disponible.

En relación con la naturaleza geotécnica se pudo constatar, como conclusión más interesante, que el canchal propiamente dicho se limitaba a la parte más superficial del coluvión estando el resto constituido fundamentalmente por un material granular englobado en una abundante matriz areno-arcillosa (FIGURA 16).

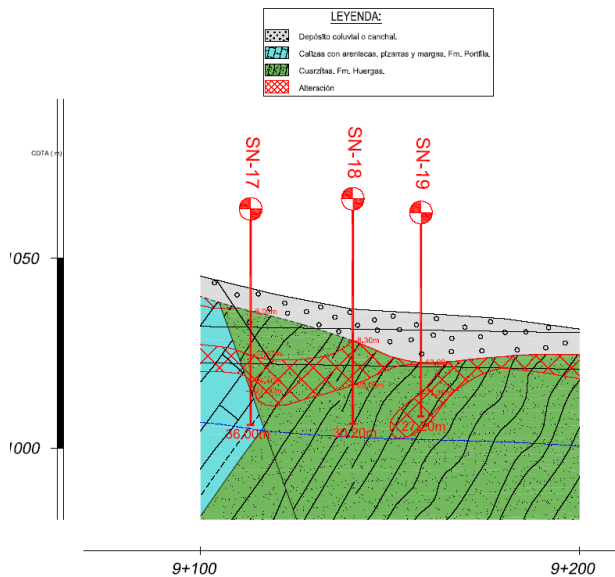


FIGURA 7. Perfil geológico reinterpretado.

Adicionalmente se observó en ocasiones la existencia de un contacto de naturaleza arcillosa y de origen coluvio-eluvial, en la transición con el sustrato rocoso, lo que aumentaba las incertidumbres geotécnicas relacionadas con el cálculo de las pantallas de micropilotes. En estas circunstancias resultaba aún más importante conocer la posición y pendiente del dicho contacto, junto con sus parámetros de resistencia, lo que obligaba disponer importantes recursos económicos y de tiempo en el reconocimiento de la ladera.

Ante este escenario se consideró factible y aconsejable la excavación en mina de este coluvión, ya que dicha matriz le confiere la cohesión suficiente para efectuar progreso de este tipo de excavación en condiciones habituales.

Consecuentemente se planteó la posibilidad de efectuar el emboquille del túnel en mina en el p.k 9+180, lo que supone un adelanto del portal de 65 m, situándose prácticamente en el inicio del túnel artificial definido en el proyecto con el método CARINTHIA.

En la figura siguiente se refleja del corte geológico geotécnico en el punto de emboquille (p.k 9+180).

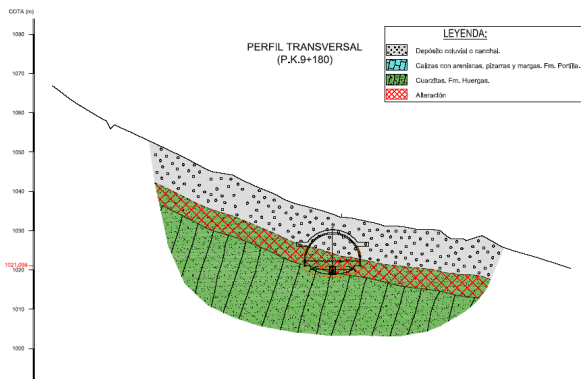


FIGURA 8. Perfil geológico en el p.k 9+180.

Tal y como se comprueba en esta figura la sección de avance afecta exclusivamente al relleno coluvionar mientras que en destroza se corta parcialmente la roca alterada.

El emboquillado en este punto se planteaba con un recubrimiento sobre el hombro derecho de sólo unos 4,5 metros, manteniéndose una montera pequeña a lo largo de bastante longitud, dado que el túnel se alinea con un esviaje pequeño respecto de la ladera.

En la fotografía que se incluye (FIGURA 9) se observa la disimetría del emboquille así como el aspecto superficial del coluvión afectado.

Como mejora de las condiciones del emboquille se plantearon los tratamientos habituales de los taludes a base de existentes en hormigón proyectado, mallazo electrosoldado y refuerzos de bulones. Adicionalmente en el talud de frontal se dispuso la ejecución del típico paraguas pesado reforzado con otro exterior y concéntrico en la zona del hombro izquierdo, en el sentido de ataque, como refuerzo adicional en la zona de menor recubrimiento.

Adicionalmente, para mejorar el efecto de la disimetría existente tanto en la fase constructiva como a largo plazo se dispuso la ejecución de un relleno

artificial adosado la ladera, el cual debería estar ejecutado con anterioridad a excavación del túnel.



FIGURA 9. Vista del emboquille en el p.k 9+180.

En las figuras que se incluyen a continuación se puede observar un perfil ilustrativo de dicho relleno así como la planta de dicho relleno con el que se corrige de la disimetría existente especialmente acentuada en una zona deprimida de la ladera que se observa en la FIGURA 8.

El sostenimiento planteado para el tramo del túnel en coluvión ha consistido en los siguientes elementos:

- Paraguas sistemático de micropilotes.
- 3 cm de hormigón proyectado como capa de sellado.
- Cercha HEB-160 cada metro con "pata de elefante".
- 30 cm de hormigón proyectado HM-30 dotado de fibras de acero, con ensanchamiento en pata de elefante.
- Bulones autoperforantes 32/16 en pie de hastiales de avance y destroza

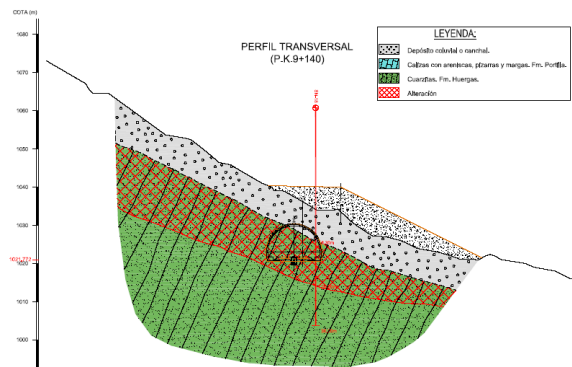


FIGURA 10. Perfil del relleno en el p.k 9+140

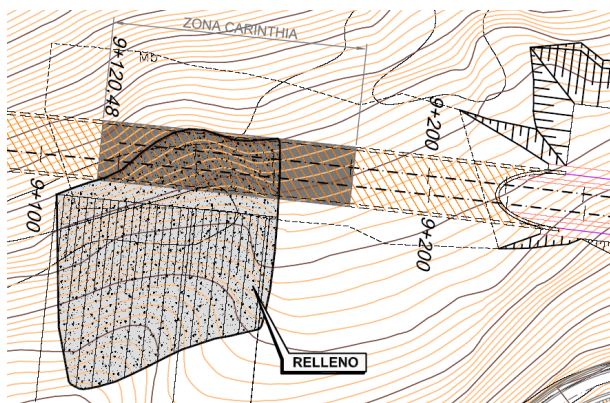


FIGURA 11. Perfil del relleno en el p.k 9+140

### COMPORTAMIENTO DURANTE LA FASE DE CONSTRUCCIÓN.

Realizados los trabajos de preparación del emboquille se comenzó en la excavación del túnel en mina el día 13 de diciembre del 2009, progresando el mismo sin graves incidencias si se exceptúan las que se derivan de las precauciones y procedimientos normalmente utilizados en terrenos de mala calidad.



FIGURA 12. Inicio de la excavación del túnel en mina.

A lo largo de gran parte de la excavación el frente de avance ha incluido el contacto de la roca con el coluvión (FIGURA 13) siendo frecuente la presencia de una mayor humedad en el mismo, sin que, sin embargo, éste problema haya supuesto una especial gravedad.

Esta disposición característica se mantuvo de forma prácticamente sistemática hasta las proximidades del p.k. 9+084 lo que supone una longitud 30 m superior del tramo de afección al coluvión que se preveían el proyecto

Con esta disposición el emboquille del túnel de la mina, previsto inicialmente en el p.k. 9+115, habría afectado igualmente al coluvión en parte de la sección con lo que no se hubiera incluido el criterio pretendido de emboquillar con toda la sección en roca sana y mucho menos el de conseguir un recubrimiento de un diámetro en este mismo tipo de material.



FIGURA 13. Disposición típica de terrenos en el frente de avance.

Durante la construcción se ha efectuado control sistemático de las convergencias cuyo comportamiento ha sido en todos los casos satisfactorio, si bien la demora en la colocación de los clavos de convergencia en el frente de Avance no ha permitido, como es por desgracia habitual hoy día en la mayor parte de los túneles, el registro de la mayor parte de la deformación.

La disposición típica de las secciones de convergencia es la que se refleja en la figura siguiente incluyendo el registro de seis cuerdas, dos horizontales y cuatro inclinadas.

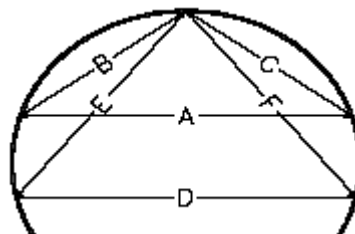


FIGURA 14. Disposición de las secciones de convergencias..

El comportamiento típico de las secciones de convergencia ha sido el que se refleja en la FIGURA 14 que se incluye a continuación, del cual se presenta la sección en la que en nivel de deformación alcanzada ha sido mayor.

En este comportamiento destaca cómo la deformación de las tres cuerdas de avance no recogen evidentemente la totalidad del movimiento, pudiéndose observar cómo las líneas son prácticamente horizontales desde el inicio.

Se observa igualmente que el efecto de la destroza supone un incremento de deformación en las cuerdas del Avance, que llegan hasta un máximo en el entorno de los 30 mm para la horizontal. La deformación acumulada en la cuerda horizontal de la Destroza tiene un orden de magnitud ligeramente inferior lo que, teniendo en cuenta la inevitable demora en su

colocación, lleva a pensar que por lo menos debiera ser igual o mayor.

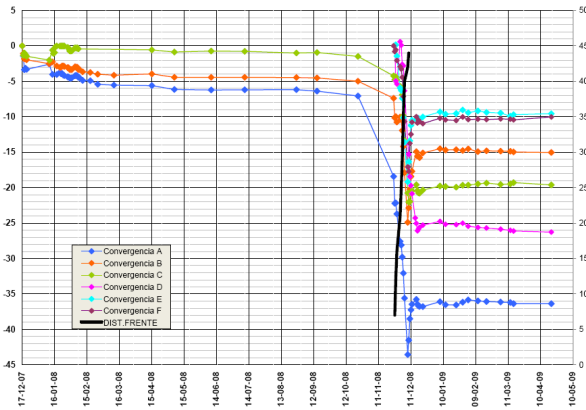


FIGURA 15. Comportamiento típico de las convergencias en la primera mitad.

De acuerdo con esta información puede estimarse que la convergencia total máxima de la sección a lo largo de todo el proceso de excavación y sostenimiento ha debido estar en el entorno de los 5-6 centímetros ( $\leq 1\%$ ), lo que resulta asumible por un sostenimiento convencional de tipo pesado, construido por fases, sin graves daños para su integridad.

Este tipo de comportamiento ha sido sistemático en la primera mitad, aproximadamente, del tramo excavado en coluvión, siendo en el resto el que se comenta a continuación.

En la segunda mitad del tramo el comportamiento de las convergencias observadas difiere sensiblemente del anterior, siendo una muestra típica del mismo la que se refleja en la FIGURA 16.

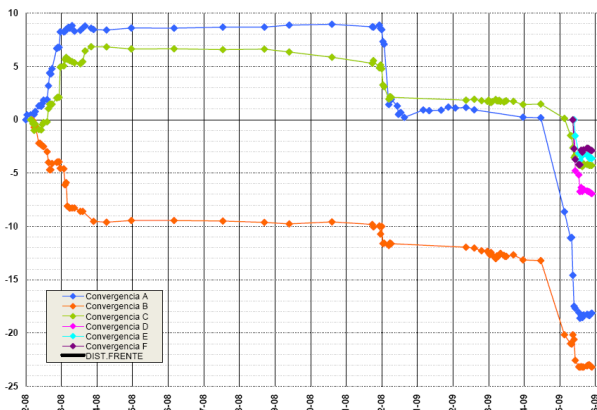


FIGURA 16. Comportamiento típico de las convergencias en la segunda mitad

Tal y como puede observarse los movimientos en fase de Avance indican un movimiento inicial de divergencia (apertura) en la cuerda horizontal y en la inclinada del hombro derecho en el sentido del ataque (lado ladera), mientras que la cuerda inclinada del lado

izquierdo sufre, un relativamente acusado movimiento de convergencia (cierre).

Estos movimientos indican un mayor desplazamiento de la clave y del hastial izquierdo, predominando el primero y debiendo ser prácticamente nulo el del hastial derecho. Sin embargo en determinado momento los movimientos de apertura se anulan posiblemente por un desplazamiento del lado derecho. Finalmente en fase Destroza los movimientos pasan a ser todos de cierre con un desplazamiento final similar al del tipo comentado anteriormente.

El progreso de la excavación y sostenimiento en la fase de Avance se ha efectuado en su práctica totalidad con rendimientos del metro diario, comenzando como se ha comentado el día 13 de diciembre del año 2007 alcanzándose el p.k 9+085 el seis de marzo del 2008.

Este aspecto también resulta importante por cuanto supone una mejora en el plazo de esta solución frente a la prevista inicialmente en el proyecto licitado.

**INCIDENCIAS**

Como única incidencia digna de destacar es la que se produjo el día 29 de febrero del 2008 consistente en un desprendimiento en el frente del Avance, situado en ese momento en el p.k. 9+084, el cual que generó una "chimenea" con salida al exterior y una altura aproximada de unos 15 m. La situación y dimensiones de esta caída se reflejan en la FIGURA 15.

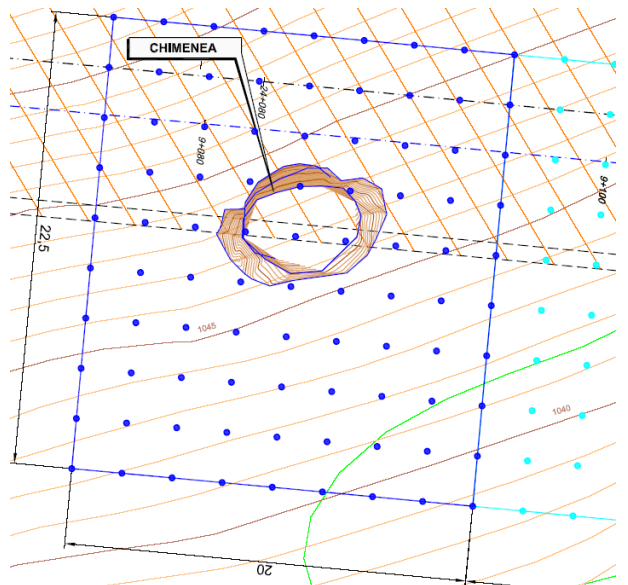


FIGURA 17. Planta de la chimenea en el p.k 9+084.

Hay que destacar que este incidente se sitúa a unos 30 m del frente de ataque del túnel en mina previsto en el proyecto original (p.k. 9+115), por lo que cabe pensar que se habría producido igualmente con la ejecución del diseño inicial del proyecto.

Tal y como puede observarse el desarrollo del desprendimiento fue prácticamente vertical y coincidiendo con la zona del hombro y hastial izquierdo, presentando en superficie una forma prácticamente circular, con un diámetro próximo a los 6 metros.

Este proceso fue el incidente final de un tramo conflictivo en el túnel que se inicia en el p.k. 9+120 (36 m) a lo largo del cual se pudo observar un comportamiento peor en la zona del hombro izquierdo debido a la presencia de un material granular poco cohesivo, coincidiendo con el contacto con el sustrato rocoso.

El incidente vino a coincidir prácticamente con la desaparición de dicho contacto por el hombro izquierdo en el sentido del ataque.

En la FIGURA 16 se observa perfectamente el corte del terreno en el vuelco creado por la "chimenea", pudiendo observarse la naturaleza del coluvión que se ha venido comentando a lo largo de la exposición, en el que se diferencia perfectamente la composición fundamentalmente gruesa (canchal) en la parte superficial, que contrasta con el corte general del coluvión en el que la granulometría contiene abundante matriz areno-arcillosa.



FIGURA 18. Vista de la salida al terreno del desprendimiento.

Sin embargo es lógico que a lo largo del contacto entre el coluvión y la roca subyacente existan zonas de acumulación de gruesos con escasa matriz, como ha sido el caso a lo largo de esta última zona más conflictiva.

El incidente se solucionó con el relleno del cráter producido en superficie y el tratamiento habitual desde el interior, consistente en el cierre de la sección y su sellado con hormigón proyectado seguido de las oportunas inyecciones de huecos y escombro.

Finalmente tras la ejecución del oportuno paraguas de micropilotes, se reinició la excavación del Avance el día 5 de marzo, por lo que el retraso producido por el incidente resultó ser, finalmente, de solamente una semana.



FIGURA 19. Vista del desprendimiento desde el interior.

Finalizados completamente los trabajos de excavación en el túnel se ha efectuado un tratamiento de mejora de la zona mediante inyecciones del contorno del túnel, efectuadas a través de taladros ejecutados desde el exterior con una disposición en cuadrícula de 2,5 x 2,5 metros. El área finalmente tratada tiene unas dimensiones de 20 x 22,5 metros tal y como se observa en la FIGURA 14.

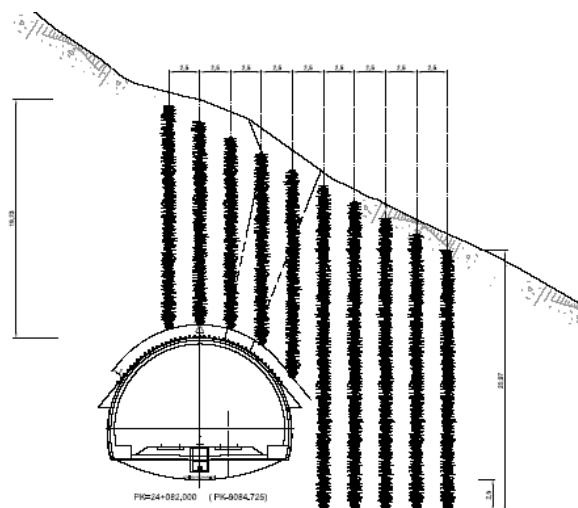


FIGURA 20. Esquema del tratamiento de inyección..

## CONCLUSIONES

El caso del emboquille norte del túnel de Nocedo resultado un claro exponente de las dificultades que presenta el conseguir un diseño ajustado en la etapa de proyecto, de forma muy especial cuando las condiciones orográficas y geotécnicas de los terrenos afectados, presentan un cierto nivel de dificultad, lo que exige alto

grado de conocimiento de las condiciones y características del terreno afectado.

En este caso, adicionalmente, las necesidades de trazado obligan a un ataque desfavorable del túnel respecto de la ladera, entre los que existe un esviaje aproximado de 30-35°, lo que produce que la magnitud que la obra necesaria para el emboquille se vea fuertemente incrementada en su longitud.

Por otra parte la fuerte inclinación de la ladera (33°) y la presencia superficial de un canchal, acrecientan las habituales dificultades de reconocimiento que se dan en la etapa de proyecto tanto por la limitación de los medios y plazos, así como por la propia disponibilidad de los terrenos.

Como consecuencia de todo lo anterior la información de la que se pudo disponer en fase de proyecto resultó a todas luces insuficiente para poder definir, en toda su extensión y detalle, la obra necesaria, sobre todo cuando para su diseño se establece un criterio demasiado restrictivo en cuanto a las condiciones a conseguir en el portal de ataque al túnel de mina.

Recordaremos que dicho criterio se resume en evitar a toda costa la ejecución de túneles afectando a terrenos de tipo coluvionar tratando, adicionalmente, de conseguir que en el portal de emboquille se disponga de un recubrimiento sobre la clave del túnel de, aproximadamente, un diámetro de roca sana. Todo ello muy deseable pero a todas luces excesivamente conservador cuando las condiciones del entorno no lo permite.

En la práctica se suele comprobar, y el emboquille norte del túnel de Nocedo resulta un ejemplo notable de ello, que los criterios tan restrictivos, pueden ser evitados, pudiendo admitirse la ejecución del túnel en mina en condiciones más desfavorables.

Las técnicas y los conocimientos actuales de la ejecución en mina de los túneles permiten acometer este tipo de trabajos con un gran nivel de seguridad al menos similar, y muchas veces incluso mayor, respecto de las soluciones más complejas.

Conviene resaltar que, simplemente con las condiciones exigidas hoy día para los primeros metros de emboquille de cualquier túnel (paraguas de micropilotes y sostenimiento pesado), es factible el trabajo seguro en la casi totalidad de las condiciones posibles, por lo que solamente resultará necesario aplicarlas en mayor o menor longitud.



FIGURA 21. Vista general del emboquille norte del túnel de Nocedo

Adicionalmente conviene tener en cuenta que los problemas de tipo morfológico de las laderas así como los de calidad de los terrenos afectados pueden ser corregidos o mejorados mediante soluciones ejecutadas desde el exterior, similares al relleno planteado en esta boca, o con tratamientos desde el interior que pueden ser de tipo muy variados, como cómo por ejemplo con las inyecciones o refuerzos del frente o de la corona de terreno más inmediata a la sección del túnel.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de la ponencia agradecen su colaboración en esta ponencia tanto al personal de la ACO cuyo principal responsable es Carlos Sandoval (PROINTEC), como al personal de la UTE LA ROBLA (HUARTE Y OBRAS SUBTERRÁNEAS) dirigidos por Francisco Vicente Soto, así como al resto de los técnicos que de alguna manera han participado en la concepción y desarrollo de esta obra.