

DISEÑO DE TÚNELES DE BAJO TECHO - TÚNELES VENTILACION

Ignacio Zuloaga Fábrega

Ingeniero Civil (CIV),
MSc. Mecánica del Suelo (DIC)
Director General Ingeosolum, S.L.

Max Netzer Cedeño De León

Ingeniero Civil (SPIA)
Master Ingeniería Geológica (UCM)

Javier A. Sierra Galeano

Ingeniero Civil (SCI) (SCG)
Master Ingeniería Geológica (UCM)

Resumen

El presente artículo trata de justificar a través de prospección geofísica y análisis geotécnico, un sistema de ejecución de un túnel de ventilación de 15 metros de longitud, en conexión con un túnel principal del Tren de Alta Velocidad al Norte de España. Presentando su sistema constructivo con sus correspondientes cálculos. Adicionalmente, se estudia, una solución para la protección a la excavación mediante un paraguas de micropilotes. Finalmente se analizan las condiciones definitivas de uso.

Keywords: Rellenos antrópicos, refracción sísmica, paraguas de micropilotes, perfiles metálicos, hormigón lanzado, sección compuesta.

1 OBJETO

La prospección geofísica aplicada a la ingeniería, ofrece un conjunto de técnicas orientadas a determinar la estructura del suelo, y las propiedades físicas que definen el comportamiento geomecánico de los materiales a profundidades variables, estas técnicas tratan de resolver cuestiones geológico – geotécnicas, bajo contextos complejos.

El objetivo del presente artículo es justificar a través de prospección geofísica (refracción sísmica) y análisis geotécnico, un sistema de ejecución de un túnel de ventilación de 15 metros de longitud en conexión con túnel principal del Tren de Alta Velocidad al Norte de España.

Este documento presenta un sistema constructivo con sus correspondientes cálculos. Adicionalmente, se estudia, una solución para la protección a la excavación mediante un paraguas de micropilotes. Finalmente se analizan las condiciones definitivas en estado de servicio.

2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS

Desde el punto de vista geológico el proyecto se localiza dentro del conjunto de la cuenca o depresión del Ebro, que está rellena por depósitos sedimentarios de carácter continental endorreico de facies detríticas finas de edad

Oligocena (entre 33 y 24 millones de años), es decir, Terciaria.

En la zona concreta de estudio se encuentra un primer nivel superficial formado por materiales de relleno antrópicos. De forma subyacente se encuentra un nivel formado por sedimentos de facies detríticas finas con un origen aluvial y una edad oligocena. Estas litologías se sedimentaron, durante el Terciario, en las partes medias y distales de diversos abanicos aluviales superpuestos y actualmente conforman gran parte del sustrato resistente de la zona de estudio.

Con base en la información recolectada, no se encontró nivel freático, debido a la existencia de un nivel superficial constituido por rellenos, con cierta permeabilidad; no se descarta la presencia de humedad en cotas someras, debido a aportes de agua estacionales o accidentales.

3 CARACTERÍSTICAS GEOMECAÑICAS

En los trabajos de campo realizados, se reconocieron los siguientes niveles litoestratigráficos:

Rellenos

Litología: Arenas, arcillas, limos de color marrón, con la presencia de gravas, fragmentos de lutita y residuos de obra.

Espesor y extensión: La potencia de este nivel varía aproximadamente entre los 1,20 y los 6,40 metros y ha sido localizado en los cuatro sondeos y en los ensayos de penetración realizados.

Parámetros geomecánicos: En la siguiente tabla se presentan diversos parámetros para la caracterización del nivel:

N_{spt}	Cohesión (kg/cm ²)	Densidad (g/cm ³)
3 a 20	0.0	~1.75

Observaciones adicionales: Estos materiales presentan una fuerte heterogeneidad y anisotropía.

Sustrato Terciario

Litología: Alternancia de lutitas rojas (dureza blanda) con barras y canales de arenisca y microconglomerados (dura media-alta) de distinta potencia y morfología. Los tramos lutíticos corresponden a arcillas inorgánicas de baja a media plasticidad (CL según S.U.C.S).

Espesor y extensión: El espesor de esta unidad puede ser considerado superior de 10,0 metros, pero su extensión es mucho mayor que el área estudiada, al tratarse del sustrato regional de la depresión del Ebro.

Parámetros geomecánicos: En la siguiente tabla se presentan diversos parámetros para la caracterización del nivel:

Nombre	Longitud (m)	Nº Geófonos	Distan. disparos	Orientación
PS-1	26.00	14	4	LONGITUDINAL
PS-2	40.00	11	2	LONGITUDINAL
PS-3	20.00	21	2	LONGITUDINAL

N_{spt}	q_c (Mpa)	Φ°	C.Axial (Tm/m ²)	C. Lateral (kPa)	Den (Tm/m ²)
>50	>20	27	>20	72	~2.20

La variabilidad entre las resistencias axiales y laterales, son debidas a la foliación horizontal tan penetrativa que presentan estas litologías.

Observaciones adicionales: Este nivel presenta un primer tramo superficial con un cierto grado de meteorización debido a los cambios físicos y químicos que han sufrido estas litologías. Esta alteración provoca que este tramo presente una capacidad portante inferior al del resto del nivel, el cual está formado por litologías altamente resistentes que provocan el “rechazo” en los ensayos de penetración estándar (SPT) y dinámica (DPSH).

4 TRABAJO Y ANÁLISIS GEOFÍSICO

El objetivo de estos trabajos es el de caracterizar el terreno mediante las velocidades de las ondas compresionales (P), corroborando dichas velocidades con los sondeos mecánicos realizados en el sitio de la obra, para finalmente estimar los parámetros dinámicos del suelo.

Se realizaron un total de tres (3) perfiles sísmicos de longitudes entre 26 y 48 metros de longitud, constituidos por geófonos espaciados a dos (2) metros, realizándose disparos alternados.

El equipo utilizado para la adquisición de datos es multicanal, provisto de un sistema de filtrado, con reforzamiento de señal y grabación en soporte magnético y geófonos de componente vertical de 10 Hz. La fuente de energía utilizada para la generación de la onda de compresión, es el de una maza de cinco (5) kilos, impulsada sobre una placa de 20 x 20 cm.

A continuación se indica, para cada uno de los perfiles sísmicos realizados, información sobre el nombre del perfil, su longitud, el número de geófonos que lo forman, distancia entre disparos:

Perfil sísmico PS-1

- En el perfil sísmico PS-1, se puede correlacionar de una manera muy fiable los sondeos mecánicos y el resultado del perfil. Se distingue claramente la interfase entre el relleno antrópico y el sustrato terciario.

- Existen velocidades de ondas de entre 350 m/s y 1600 m/s, encontrándose estas últimas a profundidades promedio de 4.00 a 4.50 m. Estas velocidades pueden ser representativas de un sustrato de areniscas. La literatura técnica señala velocidades mínimas del orden de 1000 m/s, mientras que algunos autores sugieren un rango de velocidades entre 1400 a 4300 m/s¹.

- Capa excavable: Presenta un espesor que puede variar entre 0.00 y 1.50 metros. La velocidad de transmisión de ondas P para este nivel es inferior a 1000 m/s.

- Según la tabla de ripabilidad de la Caterpillar basada en una máquina D-10R, los materiales pueden considerarse como ripables, debido a que su velocidad no supera los 2500 m/s.

Perfil sísmico PS-2

Este perfil muestra velocidades de ondas P que oscilan entre 400 y 700 m/s en los cuatro (4) primeros metros de profundidad, velocidades representativas a niveles de rellenos. Los cuatro (4) siguientes metros, no muestran cambios significativos, con velocidades que tienden a aumentar, evaluando que estos suelos presentan mayor compacidad que los anteriormente descritos. No existen sondeos en esta área que puedan corroborar la naturaleza de los mismos, pero observando el perfil sísmico, se estima que son de la misma naturaleza que los anteriores. Para profundidades superiores a los ocho (8) metros, estos niveles alcanzan valores de velocidades de onda de entre 700 a 1200 m/s, indicando mayor grado de compacidad.

Perfil sísmico PS-3

Igual que el anterior perfil, en los cuatro (4) primeros metros se observan velocidades de ondas P entre los 300 y 700 m/s. A partir de los cuatro (4) metros, las velocidades aumentan

¹ Geological Society Engineering Geology Special Publication 19. Geophysics in engineering investigations, London, 2006.

progresivamente con la profundidad, lográndose alcanzar velocidades de hasta 1100 m/s.

5 JUSTIFICACIÓN TÉCNICA Y DESARROLLO CONCEPTUAL DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

En este apartado se desarrolla las nociones generales de intervención a partir de la situación existente.

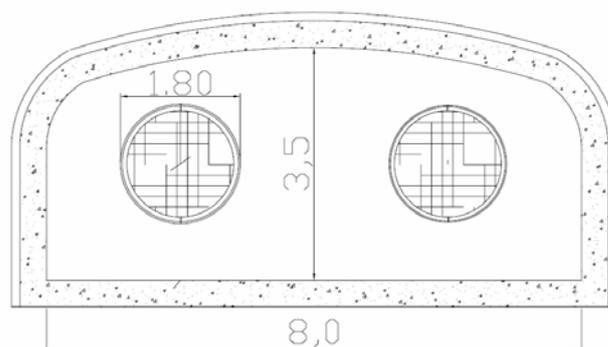
Desde el punto de vista conceptual la solución propuesta busca resolver dos aspectos fundamentales. Estos son: la protección tanto de la excavación en la zona de roca de buena calidad, como en la zona de rellenos antrópicos.

Situación Actual

El Túnel del Tren de Alta Velocidad estudiado, por ser una estructura de importancia, precisa de un elemento de ventilación, a fin de garantizar una correcta circulación del aire en el estado de servicio o en caso de emergencia.

El túnel ya ha sido construido, y se encuentra en servicio desde hace algunos años. El Túnel de ventilación se dispone aproximadamente perpendicular al túnel principal.

La estructura de ventilación se proyecta con una sección transversal de ocho (8) metros de ancho y de cuatro (4) metros de alto aproximadamente, tal como se muestra a continuación:



Solución adoptada

La solución adoptada consiste en la protección de la excavación mediante un paraguas de micropilotes 200 mm 139/9 mm espaciados 0.30 m centro a centro, para luego instalar perfiles de acero HEB-140, separados a distancias

decrecientes (0,80 m – 0,40 m – 0,00 m a medida que avanza la excavación), hasta alcanzar la intersección del túnel existente, lugar donde se colocarán dos perfiles de acero HEB-140 juntos. Estos últimos elementos servirán, después de entrar en contacto con el túnel existente, como mecanismos resistentes y elementos estructurales.

Excavación

La excavación del túnel se ejecutará mediante métodos mecánicos. En principio, el arranque del material se realizará mediante rozadora, evacuándose el escombros con una pequeña pala cargadora. En caso de que la dureza de la roca no permitiese la excavación con la rozadora, se utilizarán cementos expansivos y taladros auxiliares de descompresión. El pase de excavación será igual al espaciado entre las secciones de sostenimiento.

Sostenimiento

Se ha definido un sostenimiento para toda la estructura, formado por:

- Paraguas de micropilotes 200 mm 139/9 mm espaciados 0.30 m centro a centro cada uno, inyectados con lechada de cemento, con una relación A/C de 0.50.
- 7,5 cm de hormigón proyectado tipo HP-30 armado con 40 kg/m³ de fibras metálicas y mallazo de 150 x 150 x 12 mm, como capa de regularización y apoyo de perfiles metálicos HEB-140.
- Perfil HEB - 140 utilizado para entibación con curvaturas definidas en la geometría de la sección, espaciada 0,80 metros entre ejes, y unidas entre sí mediante un sistema de unión con tornillos y chapas en la zona del estrato terciario, mientras que en la zona del relleno, el espaciado se reduce a 0,40 metros entre ejes.

Puntales o apoos transitorios de 20 toneladas de capacidad.

- 25 cm de hormigón proyectado tipo HP-30 armado con 40 kg/m³ de fibras metálicas y mallazo de 150 x 150 x 12 mm.

- Solera de hormigón HM-30 de 40 cm de espesor armada en dos capas de mallazo de 150 x 150 x 12 mm.

Como medida de protección, tras cada pase de excavación se procederá al sellado del frente con una capa de hormigón proyectado de unos 3 cm de espesor

Auscultación

El control básico a realizar en la obra será la medida de deformaciones mediante secciones de convergencia. Estas pueden ser absolutas o relativas. Tratándose de medidas de seguridad principalmente, las relativas son, en general, las más indicativas, y son, por otra parte, las más sencillas de realizar. Se completarán, sin embargo, con algunas absolutas.

Cada sección de convergencia estará compuesta tres pernos de medida, uno en clave y dos en hastiales. Sobre ellos se realizarán, en la medida de lo posible, mediciones sistemáticas de los lados de los triángulos que con esta disposición se generan. En principio se puede establecer como norma general, la instalación de una sección de convergencia cada 3 m.

Adicionalmente, está prevista una nivelación de precisión de la calle por encima del túnel para controlar las deformaciones que genera la construcción debajo de esta importante vía de comunicación. El cliente ha indicado que la máxima deformación vertical admisible en superficie es de 20 milímetros.

6 PARÁMETROS DE CÁLCULO

Terreno en análisis elástico

Del estudio geotécnico realizado y los resultados obtenidos de los perfiles de sísmica de refracción, se han caracterizado los distintos estratos. En las tablas siguientes se muestran sus resultados.

PARAMETROS RELLENO	UNIDAD	VALORES
Densidad	KN/m ³	17.50
Modulo de elasticidad	MPa	12.33
Coefficiente de Poisson		0.30

PARAMETROS TERCIARIO- METEORIZADO	UNIDAD	VALORES
Densidad	KN/m ³	22.00
Modulo elasticidad	MPa	108.47
Coefficiente de Poisson		0.30

PARAMETROS TERCIARIO	UNIDAD	VALORES
Densidad	KN/m ³	22.00
Modulo de elasticidad	MPa	361.27
Coefficiente de Poisson		0.30

Los módulos de elasticidad estáticos se han obtenido de los módulos de elasticidad dinámicos, que son producto de las velocidades de ondas P y S. Es importante señalar que los módulos dinámicos son muy superiores a los estáticos, del orden de 10 y 15 veces. Se ha estimado el peor de los casos, es decir, los módulos dinámicos han sido divididos entre 15 obteniendo los módulos estáticos. Cabe señalar que de los resultados de los ensayos de compresión simple no confinada, se han calculado también los módulos de elasticidad, siendo estos muy superiores a los que se han utilizado como parámetros de diseño.

Debido a que conforme avanza el túnel de ventilación a la intersección con el túnel principal, las velocidades de ondas P disminuyen, se intuye que los materiales están menos densos y por ello, los módulos de elasticidad dinámicos disminuirán también. Es por esto que se presenta una variación en el terciario en cuanto al módulo de elasticidad, obtenido de las velocidades las ondas.

Terreno en análisis Mohr Coulomb

Los resultados que se pueden obtener de realizar un análisis elástico son en muchos casos

irreales, debido a que toman en consideración que los materiales pueden seguir absorbiendo cargas sin llegar a la rotura. Como se observará posteriormente, a pesar de que este no es nuestro caso, y teniendo en cuenta que se han realizado una serie de pruebas a los estratos que permiten caracterizar al terreno mediante el criterio de rotura de Mohr Coulomb, se ha considerado necesario realizar el mismo análisis, pero con este criterio de rotura. Para ello, los parámetros del terreno a considerar son los siguientes:

PARAMETROS RELLENO	UNIDAD	VALORES
Ángulo de fricción interna	Grados	27°
Cohesión	KPa	50.00
Densidad aparente	KN/m ³	17.50

PARAMETROS TERCIARIO- METEORIZADO	UNIDAD	VALORES
Angulo de fricción interna	Grados	27°
Cohesión	Kpa	100.00
Densidad aparente	KN/m ³	22.00

7 SOSTENIMIENTO

Paraguas de micropilotes

Un paraguas de micropilotes es un conjunto discreto de elementos lineales subhorizontales perforados en el terreno armados e inyectados, que forman una prebóveda resistente envolvente de la cavidad a excavar, cuya misión es sostener el terreno existente, así como minimizar las deformaciones del mismo para evitar daños en estructuras o infraestructuras viarias existentes, durante el proceso de excavación.

Para el paraguas de micropilotes, se ha dispuesto utilizar una sección de 139.7 x 9.00 mm, cuyos parámetros resistentes son los siguientes:

PARAMETROS MICROPILOTE *	UNIDAD*	VALORES*
Área	m ²	3.93 E-3
Modulo de elasticidad	MPa	210000
Momento de Inercia	m ⁴	9.49 E-6

* Valores para el caso de (1) micropilote. En el caso de que actúen varios se calculará la sección compuesta por el Método de Carranza

Perfil HEB

Para el sostenimiento principal se ha considerado la utilización de un perfil HEB-140.

PARAMETROS PERFIL H	UNIDAD	VALORES
Área	m ²	4.30 E-3
Modulo de elasticidad	MPa	210000
Momento de Inercia	m ⁴	1.51 E-5

Puntales o apeos transitorios

En algún momento durante el proceso de excavación se tendrá que apuntalar el sostenimiento. Para modelar el sistema de puntales se ha usado como sección, una viga SUPERSLIM de la fábrica RMD, cuyas características más relevantes son las siguientes:

PARAMETROS PUNTALES SUPERSLIM	UNIDAD	VALORES
Área	m ²	1.64E-3
Modulo de elasticidad	MPa	210000
Momento de Inercia	m ⁴	1.91E-5

Sostenimiento y hormigón

Cuando se construya el revestimiento final, el sostenimiento consistente en el perfil HEB y el hormigón, trabajarán de forma solidaria. Para ello, se evaluarán como un solo elemento utilizando el método de las flexibilidades, siguiendo en todo caso el procedimiento descrito en el Paper “Modelling composite sections with FLAC and Phase 2” de Carlos Carranza Torres, Turín, 21 de Febrero del 2004.

PARAMETROS DE CALCULO SOSTENIMIEN. Y HORMIGON TRABAJANDO EN FORMA SOLIDARIA*	UNIDAD*	VALORES-*
Área equivalente	m ²	0.1763
Modulo de elasticidad	MPa	38900
Momento de Inercia	m ⁴	4.75 E-4

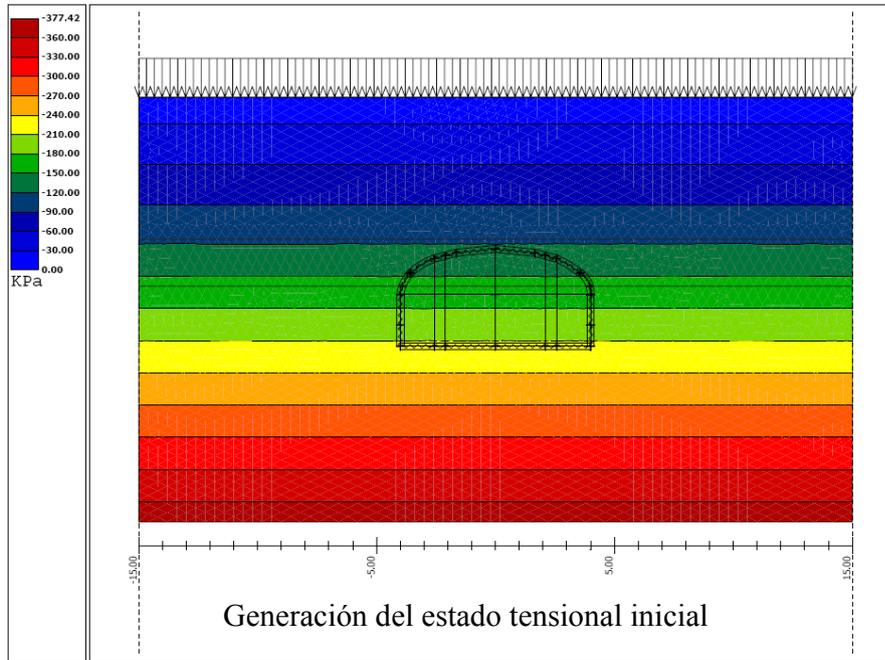
*Para espesor de hormigón proyectado de 0.17 m de espesor, E=27000 MPa y espaciado de HEB = 0.80 m

8 FASES DE MODELACIÓN

Generación del estado tensional inicial: En este estado sólo se realiza el cálculo de los esfuerzos que se generan producto de la imposición al modelo de la sobrecarga de 10 KN/m³.

Los resultados obtenidos son sensiblemente similares a los realizados por un cálculo manual. Como puede observarse, tampoco se considera contribución alguna de los elementos de sostenimiento, temporal o permanente, obteniéndose valores en la clave del túnel de 159.00 KN/m². El cálculo manual se puede obtener como:

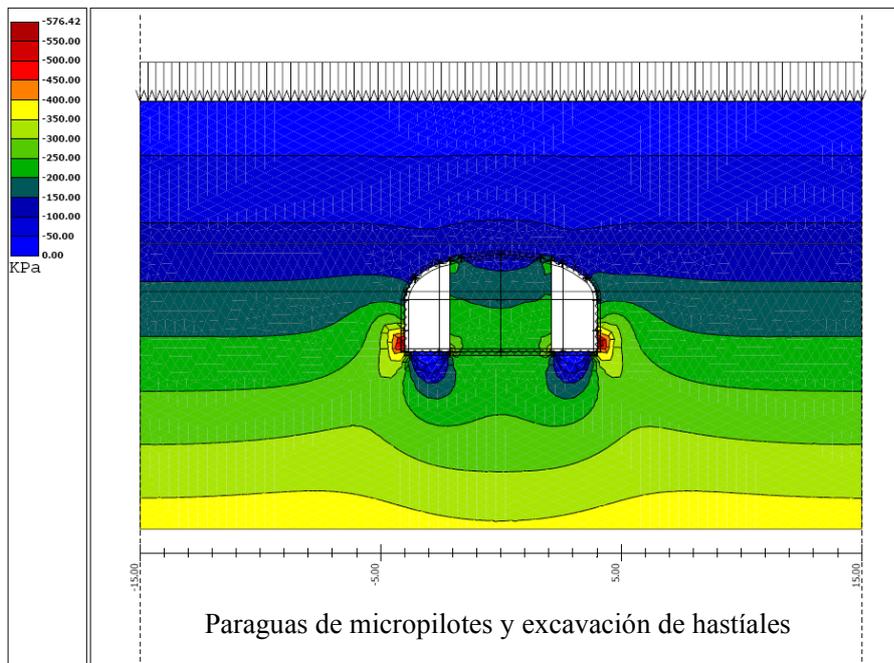
$$\begin{aligned} \sigma &= \gamma_1 h_1 + \gamma_2 h_2 + \text{sobrecarga} \\ &= 17.50 \times 6.00 + 22.00 \times 2.00 + 10.00 = 159.00 \\ \text{KN/m}^2 &= 0.159 \text{ MPa} \end{aligned}$$



Dicho valor se valida con el modelo anterior debido a que a una profundidad de 8,0 metros, el resultado de la simulación arroja estados de esfuerzos que oscilan entre los 150,0 y 180,0 KPa.

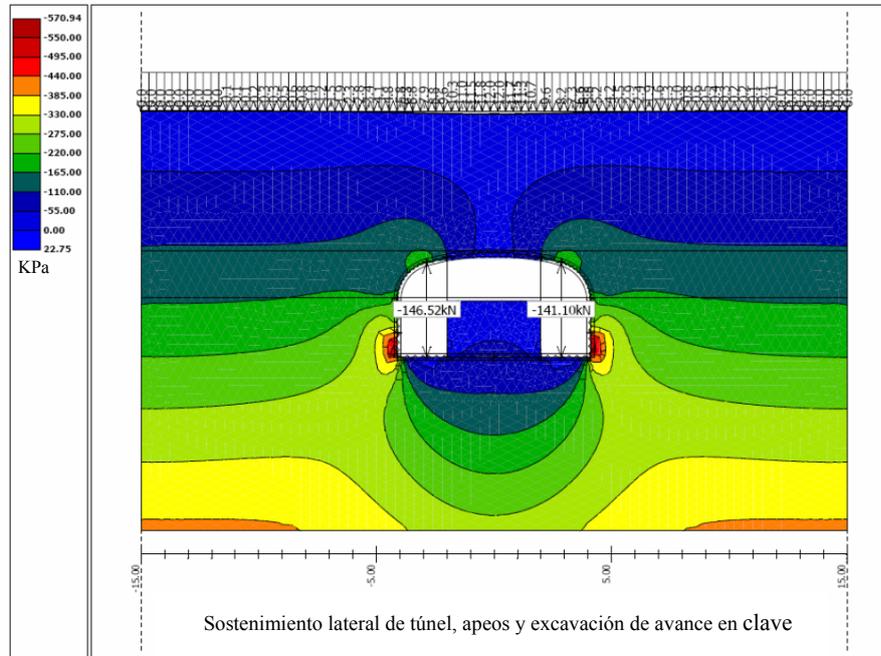
Paraguas de micropilotes y excavación de hastiales: Esta segunda etapa, se ha considerado

la contribución de un paraguas de micropilotes (con sus respectivos parámetros resistentes), dispuestos alrededor de la sección transversal del túnel, separados 0.30 metros centro a centro. Se han encontrado valores de esfuerzos principales de σ_1 de 0.576 MPa y σ_3 de 0.049 MPa.



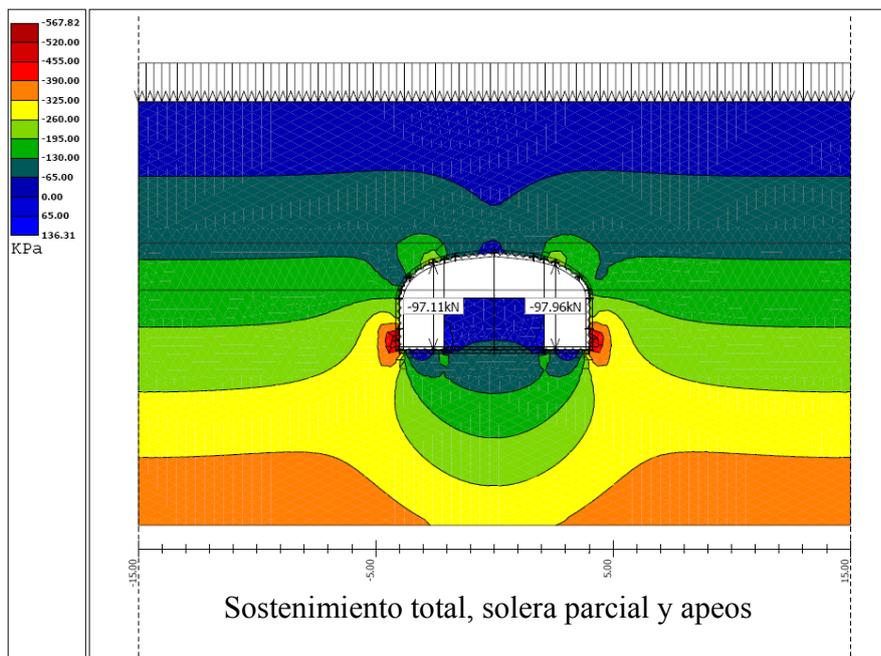
Sostenimiento lateral de túnel, apeos y excavación de avance en clave: En este punto se le impone al modelo la condición de suprimir los parámetros resistentes de los micropilotes y transmitirle toda la carga al elemento de sostenimiento, consistente en un perfil HEB-140 con un área tributaria de 0.80 m, debido a que esa

es su separación. Se ha considerado la inclusión de un apeo temporal para mantener en su posición los nuevos elementos de sostenimiento (perfil H). Este apeo puede ser un puntal de carga, cuya capacidad puede ser de >150 kN, similar a la viga SUPERSLIM de la fabrica RMD. Se han encontrado valores de esfuerzos principales de σ_1 de 0.573 MPa y σ_3 de 0.022 MPa.



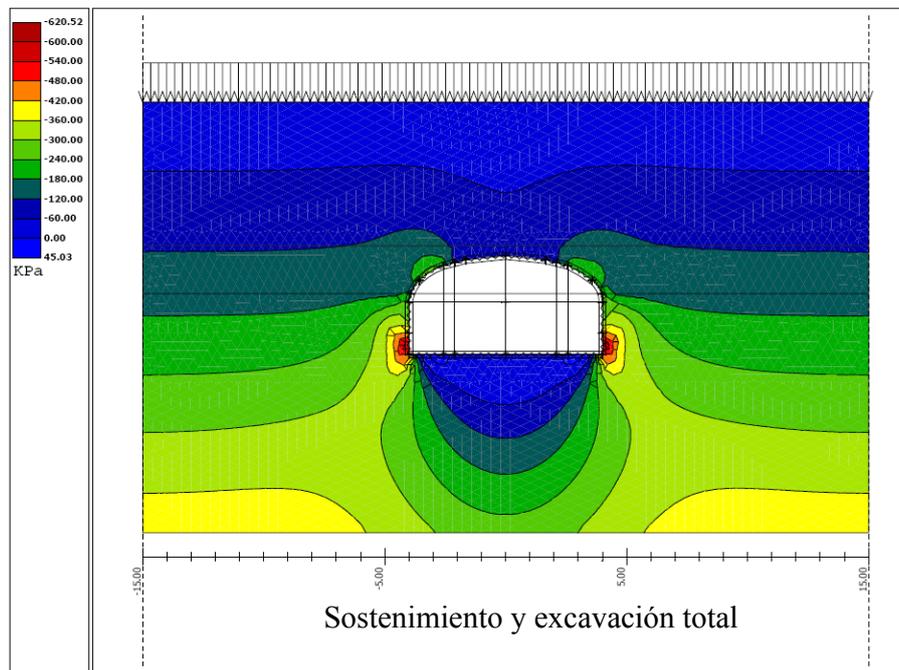
Sostenimiento total, solera parcial y apeos: Se presenta a continuación el resultado de la excavación de la clave del modelo considerando la contribución total del sostenimiento del perfil H, en este caso sin apeos. También se ha suprimido

la contribución de los micropilotes de la clave y se ha reemplazado por los parámetros del perfil H. Se han encontrado valores de esfuerzos principales de σ_1 de 0.600 MPa y σ_3 de 0.040 MPa.



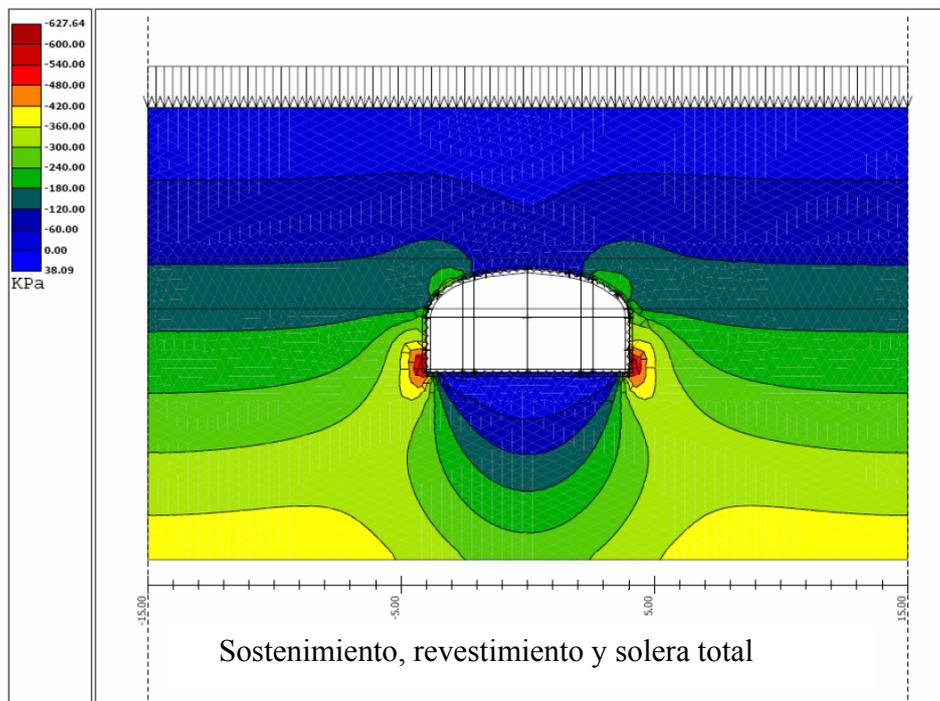
Sostenimiento y excavación total: En esta etapa se considera la excavación total de la sección del túnel y la contribución del sostenimiento definido

sin revestimiento. Se han encontrado valores de esfuerzos principales de σ_1 de 0.603 MPa y σ_3 de 0.050 MPa.



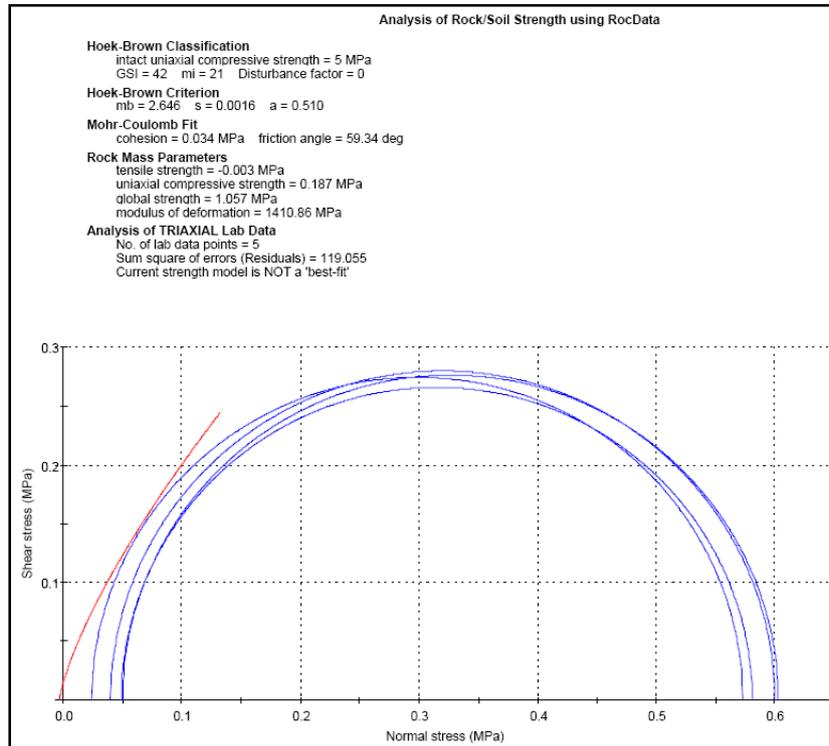
Sostenimiento, revestimiento y solera total: En esta etapa se considera la excavación total de la sección del túnel y la contribución del sostenimiento definido sin revestimiento. Esta

modelación representa el estado de servicio del túnel de ventilación. Se han encontrado valores de esfuerzos principales de σ_1 de 0.603 MPa y σ_3 de 0.050 MPa.



Una vez encontrados todos los esfuerzos principales, se procede a representar gráficamente

los estados de esfuerzos principales mayores para cada una de las etapas anteriormente descritas.



En todos los casos, se observa que los esfuerzos principales no alcanzan el criterio de rotura calculado.

En cuanto a los niveles de asientos en superficie, la siguiente tabla muestra los valores encontrados en el análisis desarrollado empleando FEM de GEO4.

En la última etapa de carga, el asiento en superficie estimado es de 12.0 mm, valor menor que el tolerable admisible especificado por el proyecto.

9 CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES DE LAS FASES DEL PROCESO CONSTRUCTIVO

En el plan de obra se han previsto las siguientes actividades principales:

ETAPA	σ_1 * MPa	σ_3 * MPa	ASIENTO EN SUPERFICIE* mm
1	-	-	-
2	0.581	0.049	0.8
3	0.573	0.024	12.00
4	0.600	0.040	12.00
5	0.603	0.050	12.00
6	0.603	0.050	12.00

- Construcción de paraguas de micropilotes de 200 mm de diámetro, con armadura 139 x 9 mm, espaciados cada 30 cm.
- Excavación de hastiales laterales.
- Primera capa hormigón proyectado con un espesor de 5 cm.
- Colocación de apoyo para los perfiles HEB-140.

*FUENTE: Resultado del programa FEM de GEO4

- Instalación del perfil HEB-140, de los hastiales laterales.

- Instalación de puntales o apeos de 20 toneladas,
- Excavación de material situado bajo el techo del túnel,
- Instalación del perfil HEB-140, necesario para unir los hastiales laterales y sostener el techo del túnel,
- Retiro de los puntales o apeos de 20 toneladas,
- Excavación del material, para terminar de construir el drenaje subsuperficial y la solera del túnel,
- Hormigón proyectado e instalación de malla electro soldada de recubrimiento final, con un espesor de 17 cm, para una sección mixta de hormigón reforzado de 17 cm.
- En la zona de rellenos antrópicos puede ser necesario, para el avance con seguridad, introducir perfiles metálicos (tipo tablestacas de acero) en la zona inferior (debajo del paraguas de micropilotes) entre las cerchas (alternadamente para conseguir un efecto estabilizador mediante el principio de la palanca), a fin de sostener el empuje lateral de los rellenos. Aplicando técnicas mineras para la estabilización de fallas.

López Jimeno, C. Ed (2000). Varios autores. *"Manual de túneles y obras subterráneas"*. Madrid

Romana, M. (1994). *"Clasificación de macizos rocosos para la excavación mecánica de túneles"*. Ingeopres nº 18, Madrid.

Sagaseta, C y Oteo, C (1974). Análisis de la subsidencia originada por la excavación de túneles. 1^{er} Simposio Nacional de Túneles, Madrid.

10 REFERENCIAS

Barton, N. Lien, R. and Lunde, J. (1974). *"Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support"*. Rock Mechanics, Springer Verlag.

Bickel, J.O *"Tunnel engineering handbook"*. Florida, 1992.

Bieniawski, Z.T. (1979). *"Engineering rock mass classifications"*. John Wiley and Sons.

Burger, R. Sheehan, A. Jones, C. (2006). *"Introduction to applied geophysics – Exploring the shallow subsurface"*. Norton & Company, Inc.

Carranza Torres, C (2004) *"Modelling composite sections with FLAC and Phase 2"* Turin.

Hoek, E. and Brown, E.T. (1980). *"Underground excavation in rock"*. Inst. of Mining and metallurgy. London.