

Los suelos cementados y su comportamiento en el túnel de Olesa de Montserrat (Barcelona)



Rolando Justa Cámara

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director del Departamento de Túneles de
Acciona Infraestructuras



Marc Canals i Borràs

Acciona Infraestructuras S.A., Jefe de Obra
UTE Autovía B-40, Olesa de Montserrat,
Barcelona

Resumen

En el presente artículo se detalla el proceso que se llevó a cabo para optimizar el método constructivo del proyecto original, modificándolo del método Alemán previsto en el proyecto por el método convencional con avance y destroza, con la particularidad de que el mencionado túnel presenta unas dimensiones considerables para excavarlo con este método.

También se explica cuál es el método de excavación más adecuado, a juicio de los autores, para excavar el mencionado túnel, considerando principalmente la geología prevista y las dimensiones del túnel.

Palabras clave

Túnel, autovía, suelos cementados

Abstract

In this article, the process carried out in order to optimize the constructive method of the original project is detailed, modifying the German method planned in the original project by the conventional top heading and bench excavation, with the particularity that the tunnel has considerable dimensions to be excavated with this method.

In addition, it explains according to the authors opinion what is the most appropriate equipment to excavate the mentioned tunnel, taking into account the expected geology and dimensions of the tunnel.

Keywords

Tunnel, Highway, Cemented Soils

1. Introducción

El proyecto de Construcción de la Autovía Orbital de Barcelona (B40) Tramo: Olesa de Montserrat-Viladecavalls, es una obra adscrita a la Demarcación de Carreteras del Estado de Cataluña del Ministerio de Fomento, cuya construcción se adjudicó a la UTE Autovía B-40 (Acciona-Comsa-Copisa) en el año 2007. Una parte importante del proyecto consiste en la construcción de dos túneles viales paralelos denominado túnel de Olesa.

En el presente artículo se detalla el proceso de optimización del método constructivo del proyecto original, modificándolo del método Alemán previsto en el proyecto inicial a otro propuesto con métodos convencionales, con la particularidad de que el mencionado túnel presenta unas dimensiones considerables para excavarlo con el método de avance y destroza.

Una de las particularidades de este túnel radica en su elevada sección de excavación, del orden de 185 m², aseme-

jándose más a la excavación de una caverna que a la de un túnel.

También se detalla cuál es el método de excavación más adecuado para excavar el mencionado túnel, considerando principalmente la geología prevista y las dimensiones del túnel.

Por último, se expone cuál es comportamiento real del terreno una vez iniciada la ejecución del túnel y se contrastan las deformaciones previstas en el proyecto (calculados con un programa 2D) con una nueva modelización del túnel calculada en 3D (manteniendo los mismos parámetros geotécnicos en ambos cálculos).

2. Descripción del proyecto

El Túnel de Olesa de Monserrat se encuentra situado en el término municipal de Abrera (Barcelona), con una orientación este-oeste, formando parte de la futura autovía orbital de Barcelona (B-40) en el tramo Olesa de Montserrat-Villadecavalls.

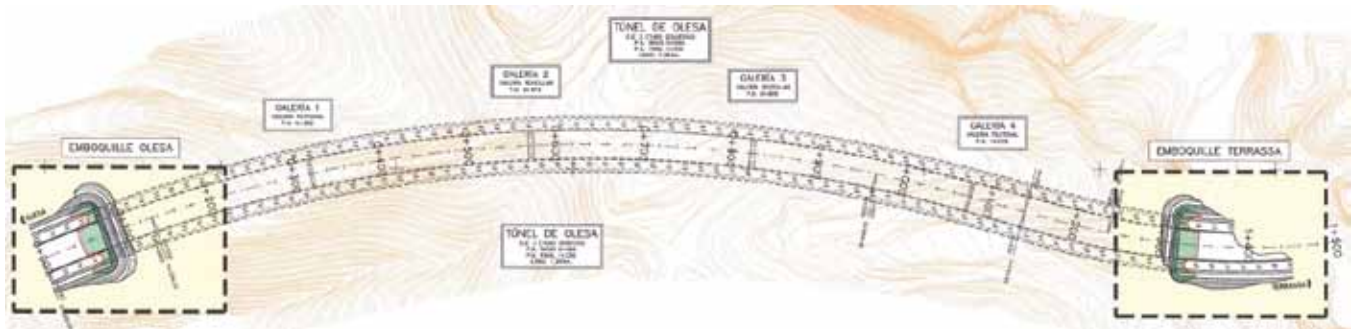


Fig. 1. Planta general del Túnel de Olesa (autovía B-40)

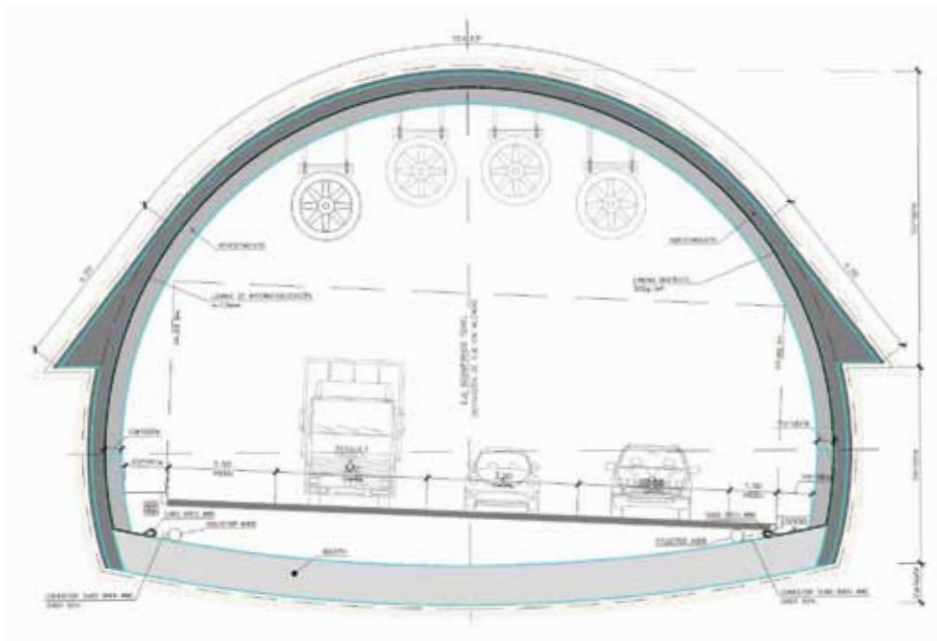


Fig. 2. Sección tipo funcional de uno de los túneles de Olesa

El túnel tiene una tipología bitubo por lo que el tráfico es unidireccional en cada tubo, siendo la longitud de cada uno de 1.310 m. De ellos 1.246 m son en mina y el resto son falsos túneles en los emboquilles. La separación entre tubos es de tres diámetros, medida entre ejes geométricos de los túneles (33 m de terreno inalterado).

La pendiente del túnel es aproximadamente de un 3 % con la boca este situada a una cota superior que la boca oeste.

La velocidad de diseño del túnel es de 100 km/h. La calzada tiene tres carriles de 3,50 m cada uno con dos arcenes de 2,50 m y 1,00 m cada uno y una acera a cada lado con ancho mínimo de 0,75 m (anchura a nivel de firme de 15,50 m). El gálibo mínimo para el tránsito de vehículos es de 5 metros.

Están proyectadas cuatro galerías de conexión entre ambos tubos para el uso de vías de evacuación en caso de emergencia, distantes entre ellas aproximadamente 250 m. Las dos centrales están diseñadas para el paso de vehículos y las otras dos son exclusivamente para peatones.

3. Geología, geotecnia e hidrogeología

La topografía de la zona por donde discurre el túnel alcanza los +243 m sobre el nivel del mar, mientras que la rasante de la calzada se sitúa entre +100 y +140 m. Esto implica que el túnel tiene un recubrimiento máximo del orden de +110 m.

Los terrenos atravesados son en la práctica totalidad de origen mioceno, aunque a pequeña escala están constituidos por niveles, horizontes y lentejones variables e imbricados,

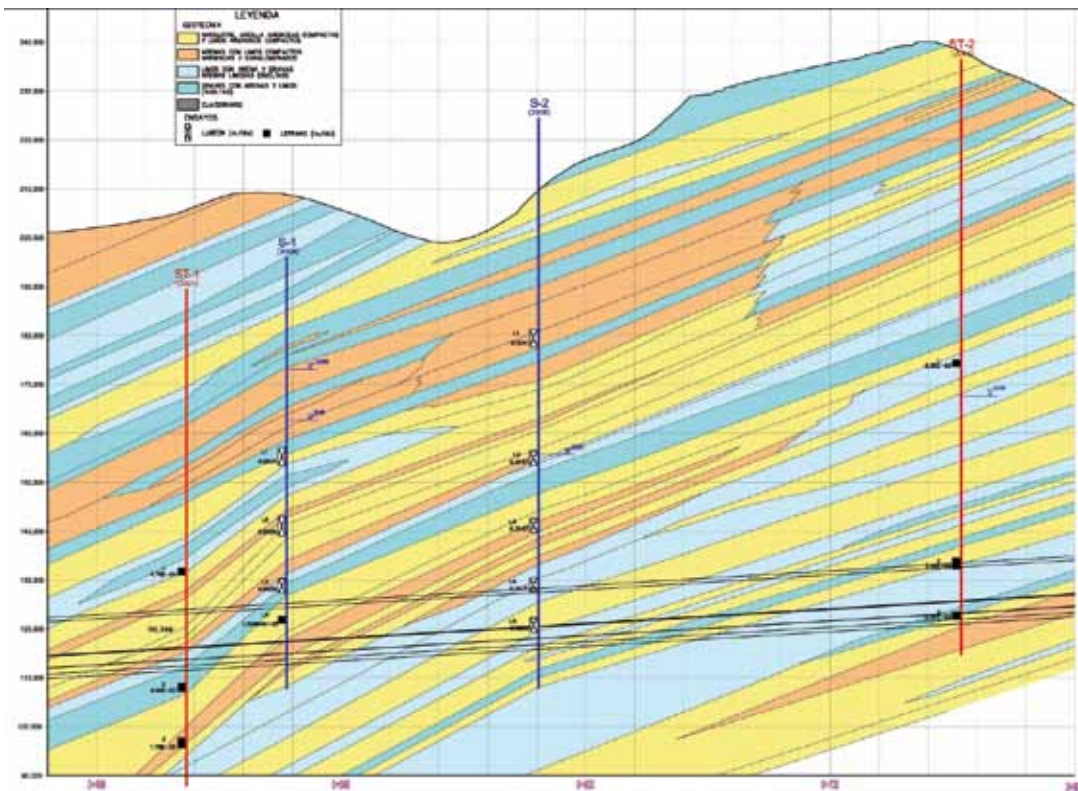


Fig. 3. Perfil geológico del tramo con máxima cobertera sobre túnel (110 m)

formados por lutitas, arenas y gravas cementadas. Desde un punto de vista global constituyen un material único, no diferenciable a priori.

El conjunto de materiales presentes en el subsuelo de la traza del túnel, según los sondeos realizados para la redacción del proyecto original, vienen a clasificarse en dos grandes conjuntos: uno minoritario, de arenas limosas o arcillosas (SM-SC) y otro mayoritario, como arcillas y arcillas limosas (CL), junto a algunos niveles netamente más limosos (ML). También, en esa masa general se intercalan niveles o lentejones en los que predominan los tamaños gruesos, tipo gravas, que de modo análogo al resto de materiales, se encuentran cementados.

Desde el punto de vista plástico, se trata de suelos de baja plasticidad y su estado cabe calificarlo como de alta compacidad/consistencia (en los ensayos SPT, se han obtenido índices de resistencia a la penetración muy altos).

Desde el punto de vista geomecánico, cabe indicar el siguiente rango de valores asignables a los terrenos miocenos a efectos de cálculo:

- Densidad seca: 1,8-2,1 gr/cm³
- Ángulo de rozamiento interno: 36° a 38°
- Humedad natural: 15 %-20 %
- Cohesión efectiva: 3 a 7 t/m²

Del estudio hidrogeológico del proyecto original se desprendería que existía un nivel freático general, localizado a cotas sobre la clave del túnel que oscilaban entre 20 y más de 70 metros, y que si bien se trataba de unos materiales calificables en su conjunto global como de baja permeabilidad, no podía obviarse el efecto del agua, tanto en las presiones ejercidas sobre el sostenimiento y revestimiento, como su influencia en la fase constructiva, en la que, además, no era descartable la existencia de bolsas o niveles locales de terrenos escasamente cohesivos con agua a alta presión.

Los resultados del reconocimiento hidrogeológico llevado a cabo, indican un comportamiento de los materiales ensayados que tiende hacia la impermeabilidad. Las permeabilidades medidas en el pozo de bombeo, el vaciado de los piezómetros, y las deducidas de los ensayos Lefranc son del mismo orden de magnitud (10⁻⁷ a 10⁻⁹ m/s).

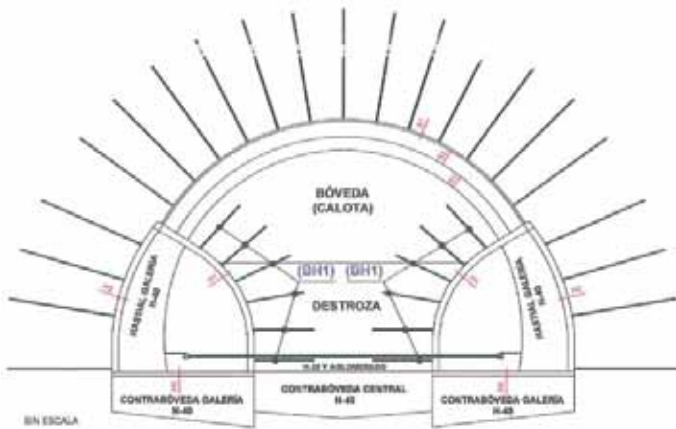


Fig. 4. Sistema Constructivo proyectado. Método Alemán

4. Sistema constructivo proyectado y su modificación

El sistema constructivo del proyecto original del túnel, estaba basado en el denominado Método Alemán. Lo esencial de este método es la construcción previa de los hastiales laterales que constituyen la cimentación o base de apoyo de la bóveda o calota, que se ejecuta a posteriori.

Así pues se parte de dos galerías laterales, con un revestimiento muy robusto de hormigón, tras los cuales se excava la bóveda, cuyo revestimiento se apoya sobre los hastiales de las galerías laterales. Posteriormente, se excava la destroza central y, finalmente, se ejecuta el cierre de la contrabóveda.

La magnitud de la sección resultante de excavación es de 226 m² por cada tubo.

El diseño robusto proyectado para este túnel se basaba en las características geotécnicas del terreno atravesado (homogéneo) y de la presión ejercida por el nivel freático existente por encima de la clave (70 m).

A partir del análisis previo de la documentación del proyecto original y siendo conocedores de la geología de la zona, se estableció la prioridad de realizar una nueva campaña complementaria de reconocimiento geológico, geotécnico e hidrogeológico, pues las hipótesis iniciales no parecían del todo correctas.

Posteriormente, integrando los datos existentes en proyecto y los nuevos aportados por la campaña de reconocimiento complementaria se han distinguido realmente dos grupos de materiales (miocenos cohesivos y miocenos granulares) en función de su composición granulométrica y su origen geológico. Aproximadamente el 60 %-70 % de los materiales que se espera encontrar en el túnel corresponden a materiales cementados, debido a la presencia de CO₃Ca, y muy compactos, en ambos grupos.

Consecuentemente, se prevé que el conjunto de materiales presentará una estabilidad suficiente, excepto en el caso de los niveles más granulares no cementados como pueden ser los niveles de gravas por su menor proporción de finos. La gran mayoría de materiales son de grano fino (lutitas y argilitas), ya sean de consistencia media o firme, por lo que no se prevé que sobre el sostenimiento definitivo actúen las presiones de agua freática.

Desde el punto de vista geomecánico los ensayos referidos a corte directo y a compresión triaxial proporcionan los parámetros incluidos en la siguiente tabla.

Unidad	Granulo	Plasticidad			Húm	Densidades		RCS	Parámetros de corte	Deformabilidad			
	%	LL	LP	IP	w	Seca	Apar.			C' (kp/cm ²)	f'	v	E _{ycomg} (MPa)
	Finos	%	%	-	%	T/m ³	T/m ³						
Mco	74,6	33,6	19,1	14,5	9,4	2,14	2,32	21,6	1,5	33,8	0,3	433,7	
Mgr	23,8	NP	NP	NP	8,9	2,17	2,36	27,0	1,1	37,6	0,3	580,0	

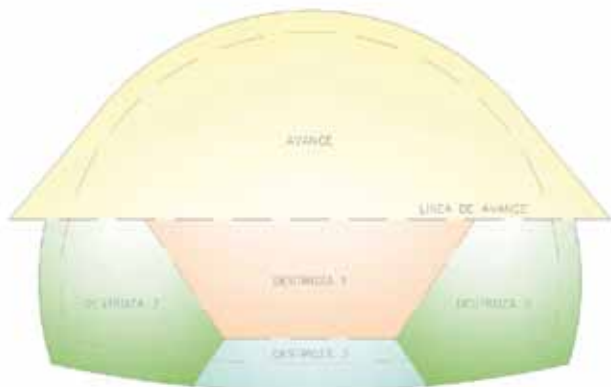


Fig. 5. Sistema constructivo modificado. Método convencional (avance y destroza)

En base a los resultados obtenidos de la nueva campaña de estudios hidrogeológicos, hay que indicar que realmente no existe un nivel freático por encima de la clave del túnel. Los nuevos resultados obtenidos indican una permeabilidad de los materiales desde baja a muy baja, por lo que la capacidad acuífera de los diferentes tramos es desde muy baja a prácticamente impermeable.

Como resultado de los nuevos datos obtenidos de las distintas campañas y ensayos, se pudo descartar el sistema constructivo robusto denominado Método Alemán y proponer ejecutar el Túnel de Olesa de acuerdo al método de ejecución convencional: excavación por medios mecánicos en fase de avance, más destroza (dividida en partes) y contrabóveda.

Todo ello quedó recogido en el Proyecto Modificado nº 1 (PM-1), en el que también se estudian y evalúan diversas secciones de sostenimiento representativas situadas a lo largo del túnel, especialmente los puntos más desfavorables correspondien-

tes a la máxima cobertura. A partir de estas secciones se llevaron a cabo diferentes cálculos, mediante el programa de elementos finitos Plaxis bidimensional, con el fin de verificar la idoneidad de los sostenimientos propuestos. Estos se basan principalmente en cerchas metálicas con pata de elefante en sección de avance, hormigón proyectado (gunita) y bulones autoperforantes en hastiales. Finalmente, la definición del sostenimiento en el PM-1 queda constituido por cuatro secciones tipo en función de la cobertera existente por encima de la clave del túnel, distribuida del siguiente modo (ver tabla inferior).

Por último, se cierra la sección global con la ejecución del revestimiento definitivo mediante hormigón en masa dispuesto con carro de encofrado desplazable.

5. Método de excavación a emplear

Una vez aprobado el PM-1 y, por tanto, el sistema constructivo propuesto, antes de empezar los trabajos se estudia cuál es el mejor método de excavación del túnel en base a los datos disponibles del terreno y la experiencia de excavación en terrenos similares.

De los sondeos y ensayos realizados, se obtiene según informe geotécnico del proyecto modificado, que el material a excavar se encuentra en el límite entre rocas blandas y un suelo. En todo caso, nos encontramos con materiales no aptos para ser excavados con voladura, de valores RQD entre 25 y 50 % para los terrenos cohesivos y de entre 0 y 25 % para los granulares, así como resistencias a la compresión simple de valores para el material cohesivo de 2,12 Mpa y de 2,65 Mpa para los materiales granulares.

Por todo ello, según Romana (ver fig. 6), el conjunto de materiales se clasifican como rocas de resistencia baja (zona G de la tabla), es decir adecuados para excavar mediante pala o ripper, pudiendo ser posible la excavación mediante martillo o rozadora de potencia entre 30 y 50 tn.

Sostenimiento	Longitud túnel (por tubo)	Cobertura sobre clave	Longitud de pase (m)		Tipo cercha	Gunita (cm)
			Avance	Destroza		
ST-I L	486 m – 38,95 %	h < 60 m	1,50	3,00	HEB-160	40 cm
ST-I P	120 m – 09,64 %	60 < h < 70	1,20	2,40	HEB-160	45 cm
ST-II L	360 m – 28,92 %	70 < h < 80	1,00	2,00	HEB-180	50 cm
ST-II P	280 m – 22,49 %	h > 80 m	0,75	1,50	HEB-180	55 cm

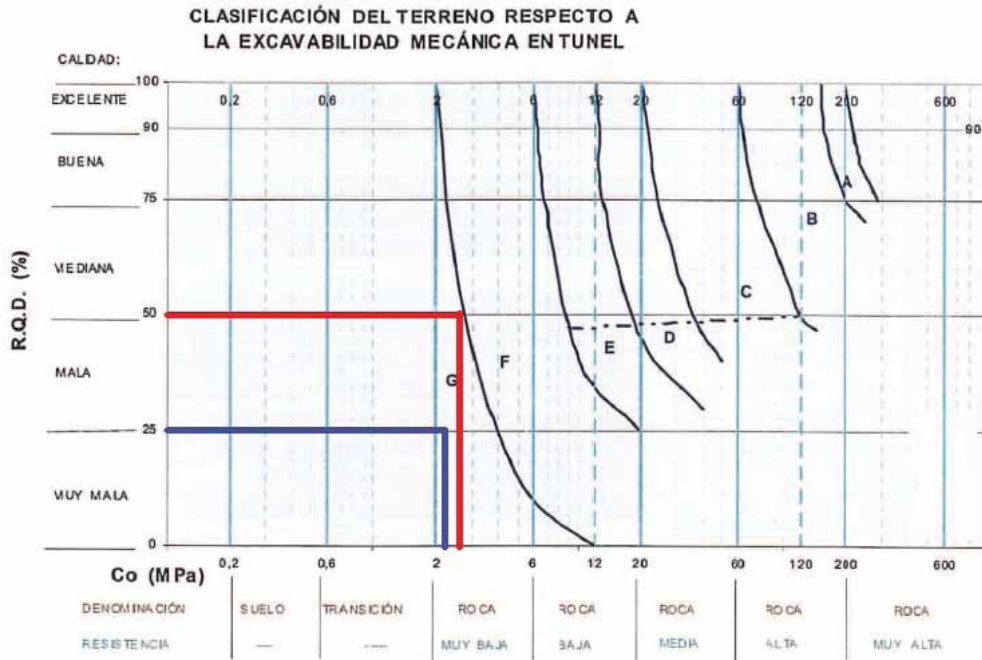


Fig. 6. Clasificación del terreno respecto a la excavabilidad (según Romana 1994)

Zona	Tuneladora		Rozadora			Escarificador	Pala
	$F_n > 25 t$	$F_n < 25 t$	$P > 80 t$	$80 t > P > 50 t$	$50 t > P > 30 t$	Martillo	Trailla
A	Posible?	-	-	-	-	-	-
B	Adecuado	Posible?	Posible?	-	-	-	-
C	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	-	-	-
D	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Posible	Posible?	-
E	Posible	Posible	Posible	Adecuado	Adecuado	Posible	Posible?
F	-	-	-	Posible	Adecuado	Adecuado	Posible
G	-	-	-	-	Posible	Posible?	Adecuado

Fig. 7. Clasificación de excavabilidad de los túneles mediante diferentes métodos de excavación (según Romana 1994)

Por otro lado, se dispone de la experiencia procedente de la excavación de la zona de los emboquilles del Túnel de Olesa. La excavación de estos emboquilles se ha realizado mediante sistemas de excavación mecánica (giratoria con cazo). La dureza de algunos niveles más cementados ha obligado a la utilización de medios mecánicos más energéticos (martillo picador).

En las siguientes tablas, se justifica la elección del procedimiento de excavación del túnel mediante máquina retroexcavadora frente a la excavación con rozadora, analizando las ventajas e inconvenientes de cada uno de los métodos, así como sus condicionantes, en base a criterios técnicos y geométricos de diseño de túnel.

MÁQUINA A EMPLEAR

CONDICIONANTES GEOMÉTRICOS (I)	RETROEXCAVADORA	ROZADORA	CONCLUSIONES
<p>El proyecto establece, en caso de que se generen inestabilidades del frente de excavación por empujes del terreno, ir con un machón central a modo de contención del terreno.</p>	<p>SI se puede ejecutar la excavación en avance con machón central.</p>	<p>NO es viable la excavación en avance con machón central por la propia geometría de la máquina.</p> <p>Interfiere la bandeja de carga con la parte inferior del machón, imposibilitando, por tanto, el desescombro y el fresado con el brazo al frente de la excavación, al no llegar éste.</p>	<p>Para ejecutar la excavación en avance con la rozadora, se debería suprimir el machón central.</p>
<p>La excavación del avance, según la geometría definida en Proyecto, presenta una altura en clave variable entre 6,75 y 7 m en función de la sección tipo.</p>	<p>SI se puede ejecutar la excavación en avance con alturas de 7 m.</p>	<p>La altura máxima de trabajo de rozado de las máquinas comerciales llegan a los 5,80 m de altura (rozadoras de 135 tn), con lo que NO se podría alcanzar la geometría de excavación definida en Proyecto para la sección de avance.</p>	<p>Para ejecutar la excavación en avance con la rozadora, sería necesario modificar la geometría de la excavación.</p> <p>Subir la altura de la rasante de excavación al menos 1,25 m, lo que implica variar también la geometría de las cerchas de sostenimiento y, por tanto, una modificación substancial del proyecto constructivo.</p>
<p>La excavación en avance presenta una sobreexcavación en hastiales de forma triangular para colocar una cercha con pata de elefante a modo de sostenimiento.</p>	<p>La excavación de la pata de elefante se puede ejecutar íntegramente con la misma máquina.</p> <p>No implica pérdidas de rendimiento en dicha operación.</p>	<p>La excavación de la pata de elefante, debido a la geometría de la piña de la rozadora, quedaría con un acabado curvo en el pie de la pata.</p> <p>Para poder apoyar plana la placa base de la pata de elefante, hay que sobreexcavar más debido al acabado curvo.</p>	<p>Para ejecutar la pata de elefante con la rozadora sin sobreexcavaciones ni sobreconsumos de gunita, siempre hay que terminar de perfilar dicha excavación con una retroexcavadora.</p> <p>Las consiguientes maniobras de intercambio de máquinas, implica pérdidas de rendimientos.</p>

MÁQUINA A EMPLEAR

CONDICIONANTES GEOMÉTRICOS (II)	RETROEXCAVADORA	ROZADORA	CONCLUSIONES
<p>Los pases de avance y la colocación de la cercha de sostenimiento previsto en proyecto pueden variar entre 1,50 y 0,75 m.</p>	<p>Si se puede ejecutar la excavación en avance con pases cortos (0,75 m) y cerchas colocadas a posteriori.</p>	<p>La geometría y dimensiones de la cabeza de rozado de la máquina, con un diámetro de 1,20 m, condiciona los pases de excavación.</p> <p>Este condicionante impide ejecutar pases de 0,75 m y 1 m, definidos en la sección tipo II.</p>	<p>Para excavar con rozadora, el pase de avance tendrá que adelantarse, sin sostener, al menos el diámetro de la piña (1,20 m) por delante de la última cercha colocada.</p> <p>Esto implicaría una modificación substancial del proyecto constructivo.</p>

MÁQUINA A EMPLEAR

CONDICIONANTES DE PREVENCIÓN	RETROEXCAVADORA	ROZADORA	CONCLUSIONES
<p>La excavación de un túnel con medios convencionales, al tratarse de un espacio confinado, implicará el montaje de un sistema de ventilación para evacuar el polvo procedente de la excavación y el proyectado de gunita, manteniendo el espacio de trabajo en buenas condiciones.</p>	<p>Para la excavación con retroexcavadora es necesaria una línea de ventilación impulsando el aire limpio desde el exterior.</p>	<p>Para la excavación con rozadora, además de un ventilador de impulsión desde el exterior, es necesaria una segunda instalación compuesta por un ventilador aspirante o captador de polvo en el frente de excavación.</p>	<p>El sistema de ventilación es más sencillo con el empleo de retroexcavadora en la excavación y requiere de menos instalación y consumo.</p>

MÁQUINA A EMPLEAR

CONDICIONANTES DEL MEDIO AMBIENTE	RETROEXCAVADORA	ROZADORA	CONCLUSIONES
<p>Consumo de agua industrial y vertido de aguas residuales al sistema fluvial del entorno del túnel.</p>	<p>La excavación mecánica con retroexcavadora se ejecutaría sin aportación de agua.</p> <p>El único caudal de agua presente en el túnel sería el de la propia aportación del terreno, en caso de que la hubiese.</p>	<p>La excavación con rozadora exige un aporte de agua en fase de excavación para la refrigeración de los útiles de perforación (aprox. 60 m³/h).</p> <p>El circuito del filtro de la ventilación aspirante para captar el polvo del rozado, también exige un aporte de agua adicional.</p> <p>Hay que añadir a estos volúmenes el agua presente en el túnel en caso de que la hubiese.</p>	<p>La excavación con rozadora implica una aportación mayor de agua al túnel (un mayor consumo de agua), un dimensionamiento mayor del sistema de bombeo para extraer el agua del frente (mayor consumo eléctrico), una mayor necesidad de tratamiento de depuración del agua (mayor consumo de elementos químicos) y, en consecuencia, un caudal de agua vertido en torrente mayor.</p>

MÁQUINA A EMPLEAR

CONDICIONANTES DE PRODUCCIÓN (I)	RETROEXCAVADORA	ROZADORA	CONCLUSIONES
Sobreexcavación del túnel respecto al perfil teórico.	<p>Con la retroexcavadora el perímetro de la excavación es irregular, generando crestas o dientes de sierra e incluso puntos angulosos al excavar solo con el martillo picador.</p>	<p>Con la rozadora el perímetro de excavación es homogéneo y minimiza las sobreexcavaciones.</p> <p>La excavación se puede controlar en todo momento mediante la monitorización en pantalla de la sección de excavación a través del sistema de guiado incorporado en la rozadora.</p>	<p>El perfilado de la retroexcavadora es más irregular que el de la rozadora, pero se puede mejorar incorporando una cabeza de fresado para el perfilado final, obteniéndose acabados y sobreexcavaciones muy similares a la rozadora.</p>
Rendimientos de excavación.	<p>El rendimiento de excavación de la máquina retroexcavadora, para este terreno, se puede estimar entre 15-20 m³/h.</p> <p>La ejecución del túnel con retroexcavadora permite simultanear la ejecución del avance con la ejecución de la destroza, optimizando el uso de la maquinaria.</p>	<p>El rendimiento de excavación con la rozadora, para este terreno y longitudes avance, se puede estimar entre 20-25 m³/h.</p> <p>En pases más largos (3-4 metros) su rendimiento estaría alrededor de los 40 m³/h, pero no es el caso, ya que la longitud de pase en este túnel siempre es inferior a 1,50 m.</p> <p>La ejecución con rozadora no permite simultanear la ejecución del avance con la destroza con el mismo equipo.</p>	<p>A pesar de ser un poco mayor el rendimiento de excavación de la rozadora, se ha de tener en cuenta que los movimientos de esta máquina son muy lentos, y al ser la sección de excavación tan grande esto le obliga a hacer más de un posicionamiento.</p> <p>Por otro lado, no es viable emplear la rozadora para la ejecución de la destroza, tanto por su lentitud de movimientos como por la necesidad de desplazamiento de todas las instalaciones que conlleva su uso.</p>
Materiales de excavación.	<p>La retroexcavadora puede excavar tanto materiales blandos (cazo) como materiales duros (martillo rompedor).</p>	<p>La rozadora está pensada para excavar materiales semiduros.</p> <p>Presenta dificultades en la excavación de materiales blandos, concretamente los materiales arcillosos.</p>	<p>El agua del terreno o la aportada por la rozadora, hace que las arcillas se apelmacen y se peguen a la piña de rozado del minador, taponando las picas y anulándole la capacidad de rozado.</p> <p>Implica tener personal limpiando la piña constantemente en el frente de excavación con la correspondiente pérdida de rendimiento e incrementando el riesgo de seguridad y salud de los trabajadores.</p>

MÁQUINA A EMPLEAR

CONDICIONANTES DE PRODUCCIÓN (II)	RETROEXCAVADORA	ROZADORA	CONCLUSIONES
Consumos eléctricos.	Los consumos de las máquinas retroexcavadoras son exclusivamente de gasoil.	El consumo de la rozadora es con energía eléctrica.	<p>En el caso de avería del suministro eléctrico se produce la paralización del túnel, que puede suplirse con grupos electrógenos en <i>stand-by</i>.</p> <p>Para el caso de la retroexcavadora, con grupos pequeños que alimenten la iluminación y el sistema de bombeo de agua sería suficiente.</p> <p>Para la rozadora el consumo eléctrico es muy elevado y requiere de un dimensionamiento mucho mayor en cuanto a la acometida eléctrica y a los grupos en <i>stand-by</i>.</p>
Averías y recambios.	<p>En la excavación con retroexcavadora, en el caso que se produjese una avería importante en la máquina que la dejase fuera de servicio, se dispondría siempre de un equipo en <i>stand-by</i> que permitiría seguir con los trabajos sin ninguna interrupción.</p>	<p>En la excavación con rozadora, en el caso de que se produjese una avería importante en la máquina que la dejase fuera de servicio, se generaría una parada larga de la producción del túnel al tratarse habitualmente de reparaciones complejas.</p> <p>Resulta complicada la reposición de piezas originales de manera inmediata.</p> <p>No es viable económicamente disponer de este tipo de máquinas en <i>stand-by</i>.</p>	<p>Las averías de la retroexcavadora no condicionan la producción del túnel.</p> <p>Las averías importantes de la rozadora implican paradas largas en la producción del túnel, al tratarse de reparaciones complejas.</p> <p>En ciertos casos la avería puede impedir el desplazamiento del equipo, bloqueando el acceso al frente e imposibilitando continuar la excavación con cualquier otro medio.</p>

MÁQUINA A EMPLEAR

CONDICIONANTES DE PRODUCCIÓN (III)	RETROEXCAVADORA	ROZADORA	CONCLUSIONES
<p>Excavar el frente del túnel sobre materiales blandos.</p>	<p>La retroexcavadora puede trabajar habitualmente sin problemas sobre cualquier tipo de terreno blando, tanto seco como húmedo.</p> <p>El sistema de desplazamiento sobre orugas les permite desplazarse con facilidad.</p>	<p>La rozadora trabajará siempre en terreno húmedo por la propia aportación de agua de la máquina. Esta aportación adicional de agua disminuye la capacidad portante del terreno.</p> <p>El sistema de desplazamiento es sobre orugas. El alto peso de estas máquinas les implica desplazamientos muy lentos.</p>	<p>El peso de la retroexcavadora, así como su versatilidad en los movimientos (incluso apoyándose con el brazo de excavación) le permite una mayor adaptación a cualquier tipo de terreno.</p> <p>El alto tonelaje de las rozadora y su poca versatilidad de movimientos pueden generar en terrenos blandos, diferentes grados de asentamiento en la base con la consiguiente sobreexcavación del piso, errores en el sistema de guiado e incluso atrapamiento de la maquina en el frente, de difícil extracción (paradas de producción importantes).</p>

6. Estado de ejecución actual

El túnel de Olesa inició su excavación hace cuatro meses por la boca este y a inicio del mes de junio de 2016 se han ejecutado 310 m de excavación en avance y 16 m en destroza en el túnel 1 y 235 m en avance en el túnel 2.

La excavación se ejecuta con pendiente hacia abajo (3 %), por lo que se tendrá que achicar el agua del frente, pero por el contrario se excava a favor de la estratificación con la consiguiente mejora de estabilización del frente.

Durante estos metros de ejecución se ha observado la realidad del terreno a perforar y su comportamiento. Este corresponde a la serie descrita en el anejo de geología, con repeticiones de los estratos pero con potencias variables. En general, presenta una alta estabilidad, incluso con todo el frente de avance abierto (90 m²), por la longitud máxima prevista (1,5 m) y sin machón frontal de tierras a modo de contención. Por otro lado, recalcar que geotécnicamente parece más competente que lo descrito, pues para excavar el frente es necesario el uso de

un martillo picador de alta potencia (4.000 kg) implementado sobre una retroexcavadora específica para túneles (brazo de excavación más corto), siendo imposible el uso del cazo para la excavación.

Para obtener un mejor conocimiento del comportamiento estructural del túnel, la UTE Autovía B-40 ha realizado una nueva modelización del túnel, esta vez mediante el programa de diferencias finitas FLAC 3D (tridimensional). Este *software* permite, a diferencia del modelo 2D del proyecto, modelizar el túnel con la secuencia de excavación real según el avance longitudinal de los procesos. En el modelo 2D se supone una relajación inicial del terreno como hipótesis de partida, mientras que el cálculo en 3D obtiene el estado tensional del terreno actuando sobre el sostenimiento fruto de la propia secuencia de ejecución establecida.

Para el nuevo cálculo se mantienen los mismos parámetros geotécnicos del terreno del proyecto, para poder comparar ambos modelos (2D vs. 3D) con el fin de verificar las deforma-



Fig. 8. Excavación en avance con dos martillos picadores



Fig. 9. Excavación de destroza central

ciones previstas y poder contrastarlas con los valores reales obtenidos a partir de la auscultación.

Según los resultados del nuevo cálculo, los valores de deformaciones de terreno y sostenimiento esperables resultan significativamente menores en el cálculo del modelo 3D.

A lo largo de la ejecución del túnel se han instrumentado en el interior dos tipos de secciones de control de movimientos del terreno. La sección de convergencias, compuesta de pernos, prismas y dianas (cada 25 m) y unas secciones más completas (cada 180 m) compuestas de extensómetros de varillas, piezómetros, células de presión de tierras (radiales), células de presión de hormigón (tangenciales), extensómetros en las cerchas y una sección de convergencias.

El principal objetivo de toda la instrumentación que se ausculta diariamente es, por un lado, el de control de la estabilidad del túnel y, por otro lado, ir contrastando los valores reales obtenidos respecto a los previstos en el cálculo.

A partir de los valores reales de deformación medidos, se observa que estos se aproximan más a los valores teóricos obtenidos mediante el programa de cálculo del modelo 3D.

Por último, el mayor grado de detalle del modelo 3D permite también analizar las repercusiones de las modificaciones en la secuencia de ejecución prevista, al tener en cuenta el proceso constructivo de forma más precisa en el cálculo estructural.

7. Conclusiones

Hay cierto tipo de materiales geológicos que son difíciles de caracterizar a priori. Uno de ellos son los suelos que por su grado de cementación se comportan in situ como rocas blandas. Este es el caso de los suelos miocénicos de los Túneles de Olesa. Los reconocimientos ordinarios a base de sondeos es fácil que no los identifiquen por la propia degradación de la cohesión durante la perforación. Quizás debiéramos remarcar como fundamental en toda investigación geotécnica la detección real de la presencia o no de agua freática en todo macizo rocoso y sugerir la ejecución de presiómetros de forma complementaria como una forma mejor de correlacionar y evaluar el comportamiento tenso-deformacional del terreno in situ.

Una obra larga y con diversas fases de ejecución permite cierto tiempo de reacción para adaptar los procesos y dise-

ños a la realidad geológica de la obra. Este ha sido en cierta medida el caso de esta obra, donde las lecciones aprendidas durante la primera etapa de excavación de taludes han permitido la optimización de la ejecución de la excavación y sostenimiento de los túneles. Para ello siempre es necesario una buena documentación y un conocimiento exhaustivo de la geología local conjuntamente con una clara justificación de los fenómenos observados.

8. Referencias

- Proyecto de construcción Autovía Orbital de Barcelona. Tramo Olesa de Montserrat-Viladecavalls. Julio 2006-Euroestudios.
- Proyecto Modificado N° 1 Autovía Orbital de Barcelona. Tramo Olesa de Montserrat-Viladecavalls. Mayo 2010-Euroestudios.
- Manual de Túneles y Obras Subterráneas. 1997-Varios Autores. Editor: Carlos López Jimeno.

9. Agradecimientos

Una obra de esta entidad no es posible, sin duda, sin la participación y el apoyo de muchas personas. En este caso queremos agradecer primero el esfuerzo al organismo que actúa como propiedad y dirección de Obra (Demarcación de Carreteras del Estado de Cataluña del Ministerio de Fomento), la empresa que ejerce como asistencia técnica (Euroestudios) y los propios socios de la UTE Autovía B40 empresa constructora, a saber, Acciona Infraestructuras, Comsa y Copisa.

En particular dentro del equipo de Acciona cabe mencionar el apoyo de los Servicios Centrales de la Dirección de Ingeniería. Y finalmente dentro del equipo de obra es justo hacer referencia a todo el conjunto de técnicos que han participado en la ejecución de la obra durante su dilatado periodo de ejecución: Stephan Celerier, Xavier Rossell y María Tomey como gerentes, Josep María Bertrán como jefe de Oficina Técnica, Lluís Fàbregas como jefe de Topografía, José María Sánchez como jefe de Calidad y un largo etcétera.

La publicación de este artículo ha sido posible gracias al apoyo y aportaciones de varios compañeros de la UTE Autovía B-40 y, en especial, a Diego José Rodríguez Felizia (director de Departamento de Obra Civil Acciona Infraestructuras Zona Este). **ROP**