

Avances en el proyecto y construcción de túneles



Rolando Justa Cámara

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director del departamento de Túneles de
Acciona Infraestructuras

Resumen

Este artículo trata de hacer un repaso de los avances que se están produciendo en el proyecto y construcción de túneles, por diferentes métodos, con el fin de divulgar estos en la medida de lo posible para un uso racional de los mismos en un futuro próximo. La mejora del conocimiento del comportamiento del terreno así como de los elementos estructurales que configuran la solución final para el método de excavación elegido, a saber, sostenimiento dispuesto, número de fases de excavación, impermeabilización y tipo de revestimiento final, hacen que todo este proceso se optimice y se añada valor en la configuración de espacios subterráneos, hecho de gran necesidad en el mundo de hoy.

Palabras clave

Espacio subterráneo, túneles, avances, innovación

Abstract

This article attempts to undertake an overview of the recent developments on design and construction of tunnels, using different methods, in order to disseminate them as far as possible for its foreseeable rational use. Improving the knowledge on the soil behavior, as well as on the structural elements used to achieve the final solution of the excavation method chosen, namely, rock support arrangement, number of excavation phases waterproofing system, and final lining typology, make this process optimum and generates and adds value in the underground space creation, being a factor greatly needed in today's world.

Keywords

Underground space, tunnels, progress, innovation

1. Antecedentes

Cuando uno se plantea cómo abordar el tema enunciado en un título tan sugerente como 'Avances en el proyecto y construcción de túneles', cabe pensar primero en lo primordial que es hoy en día la creación de espacio subterráneo para diferentes usos, todos ellos reclamados fuertemente, como son nuevas líneas de metro debido a la sobrepoblación de las zonas urbanas, nuevas líneas de ferrocarril de alta velocidad para la conexión rápida y económica de las grandes urbes, nuevos aeropuertos y sus enlaces de transporte público con los centros de las ciudades, nuevos abastecimientos de agua y nuevos colectores para aguas residuales con limitada afectación a los servicios públicos existentes y nuevos túneles para acomodar fácilmente diferentes servicios públicos dentro de la ya intrincada maraña de servicios existentes en una ciudad.

La necesidad de crear espacio subterráneo está clara. Se necesitan más y más túneles por una y otra razón y la ejecución de estos túneles se debe hacer de forma segura, sin afectaciones a las personas y las propiedades, es decir sin que

se note excesivamente, sin ruido, sin vibraciones, sin polvo, sin afecciones molestas al tráfico, con transparencia informativa, con excelencia constructiva y con gran calidad estética.

Sobre la base de esta fuerte necesidad de creación de espacio subterráneo, toca pensar cómo se puede atender hoy en día esta necesidad imperiosa, mejorando las técnicas antiguas con las técnicas más novedosas de todo tipo que se le puedan añadir en un proceso de innovación altamente demandado por la sociedad y que surge inmediatamente como título de cualquier conferencia a nivel de país, a nivel continental o a nivel mundial.

Este artículo se va a centrar en describir los aspectos más novedosos tanto en el diseño como en la construcción de túneles tanto en método convencional como mecanizado, sin entrar a describir procesos propios de los túneles en 'cut and cover' ni los túneles de pequeño diámetro hechos con la técnica de hinca de tubos, perforación horizontal dirigida o no, ni los túneles sumergidos.

Nos hemos planteado, para este escrito, repasar los avances que están posibilitando un mejor hacer en la construcción de túneles desde la etapa inicial de diseño hasta la propia construcción de los mismos.

2. Diseño de túneles

En cuanto al diseño de túneles cabe hablar de algunas herramientas de cálculo que hoy en día son habituales y quizás no del todo conocidas fuera del ámbito de la ingeniería especializada y que constituyen herramientas de gran valor para el dimensionamiento de sostenimientos y revestimientos en detalle, cálculos de asentamientos y de los efectos estructurales del proceso de excavación, así como de diversas acciones de mejora del terreno bajo edificios o estructuras existentes, u otras que pudieran considerarse.

La gran ventaja de estos programas de cálculo es la posibilidad de introducir en el análisis estructural global hasta mínúsculas interfaces del proceso constructivo, ya sea en caso de un túnel convencional con sus diferentes fases de sostenimiento en avance y destroza, con o sin galerías laterales, y su evolución hasta y después de completar el revestimiento final estructural, como en el caso de un túnel mecanizado, donde igualmente se pueden analizar todo tipo de secuencias litológicas, ya sean en suelos o en roca, pudiendo analizar el efecto tridimensional de la velocidad de perforación en los asientos y en los esfuerzos sobre el revestimiento introduciendo para ello en el modelo tridimensional el mortero de relleno de trasdós con su curva de evolución de resistencias, las presiones de trabajo de acuerdo con la metodología de trabajo y las posibles actuaciones en el trasdós del escudo.

Estas herramientas permiten hacer buenas correlaciones entre el comportamiento real y el predicho con los modelos tridimensionales siempre que se tenga una parametrización geotécnica suficientemente correcta de las distintas unidades litológicas.

Entre estas herramientas se encuentra el programa FLAC^{3D} y el programa Plaxis 3D.

FLAC^{3D} es un programa de diferencias finitas (método explícito), en contraposición de programas similares de elementos finitos, como el Plaxis 3D (método implícito).

Sin entrar en demasiadas disquisiciones teóricas, algunas de las diferencias entre uno y otro método son:

- El método de los elementos finitos (Plaxis 3D) crea una solución integral para el modelo a partir de un sistema de ecuaciones algebraicas. Es decir, crea una matriz de rigidez común para todo el modelo y resuelve la ecuación (Similar a los programas de estructuras tipo SAP2000).

- En el método de diferencias finitas (FLAC^{3D}) las ecuaciones son escritas para cada elemento, con lo que no se tiene un sistema de ecuaciones, sino un conjunto de ecuaciones simultáneas. El cálculo se realiza de forma iterativa hasta que el error del sistema queda por debajo de un cierto umbral de error definido.

- FLAC^{3D} trata las interacciones entre elementos como condiciones de contorno, es por ello que no existe el concepto de 'joint element'.

Algunas ventajas que habitualmente suelen apuntarse a FLAC frente a otros programas de elementos finitos son:

- Es posible el cálculo en grandes deformaciones.

- Permite introducir todo tipo de no linealidades.

- Al no requerir la creación de un sistema de ecuaciones global los requerimientos de memoria de cálculo son menores.

- Al realizar un proceso iterativo siempre puede obtenerse una solución. Esta herramienta permite analizar también los mecanismos de rotura en caso de colapso.

Básicamente, el esquema de cálculo de FLAC^{3D} corresponde a un método cíclico que se puede sintetizar en el diagrama siguiente (figura 1). Este esquema de cálculo se produce de forma cíclica en cada uno de los elementos y en cada uno de los pasos de cálculo de manera independiente.

Por todo ello se considera que la herramienta FLAC^{3D} es especialmente adecuado para problemas que impliquen:

- Mecanismos de colapso.

- Ejecución por fases.

- Implementación de no linealidades.

- Problemas en grandes deformaciones.

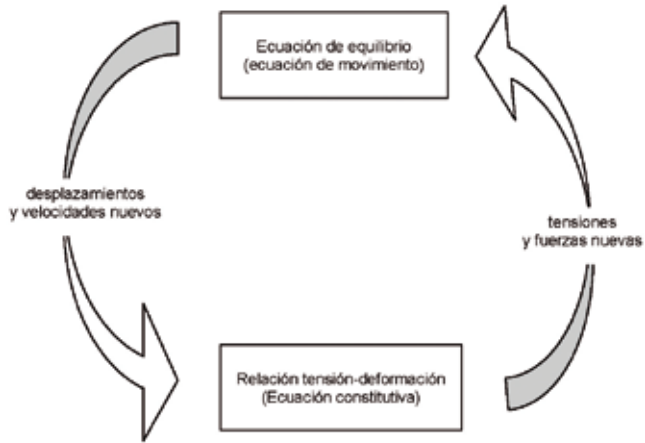


Fig. 1. Esquema de cálculo de FLAC^{3D}

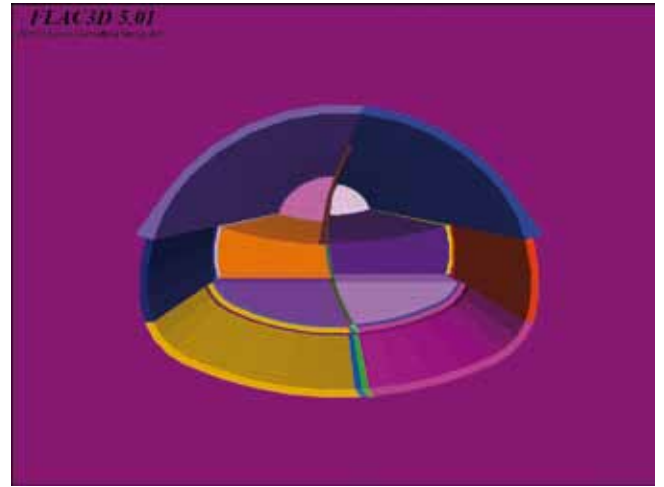


Fig. 2. Cálculo para el metro de Santiago de Chile

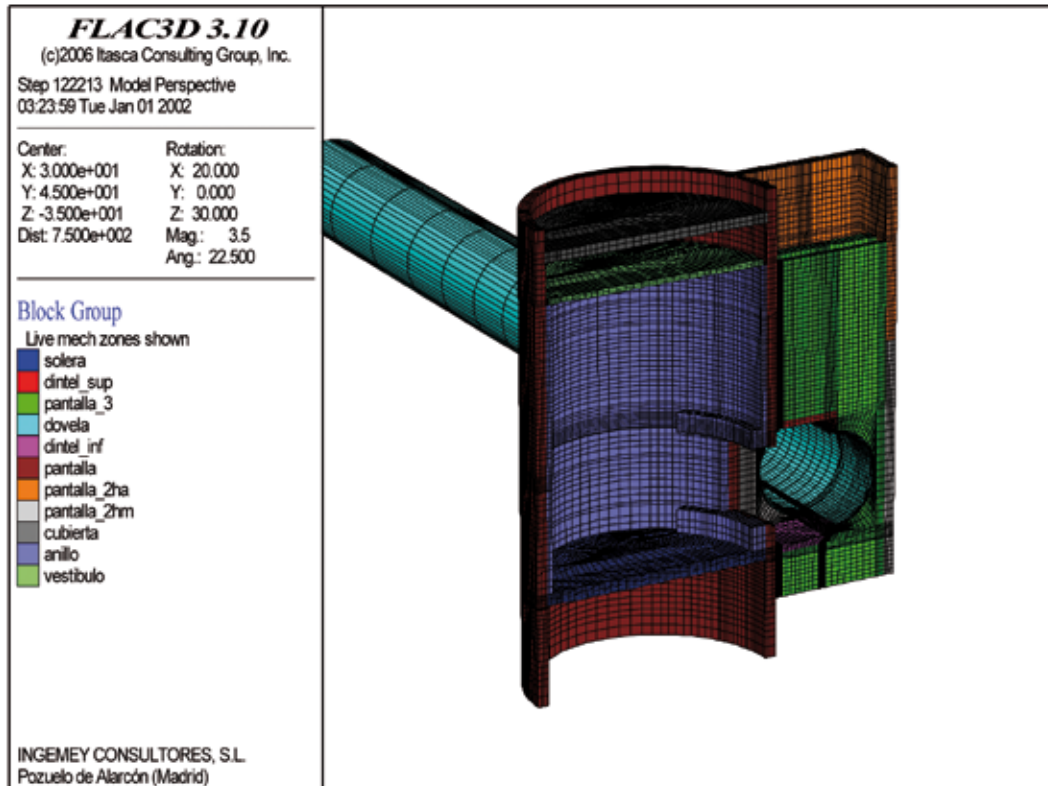


Fig. 3. Cálculo de la estación Provenzana.
Línea 9 del metro de Barcelona

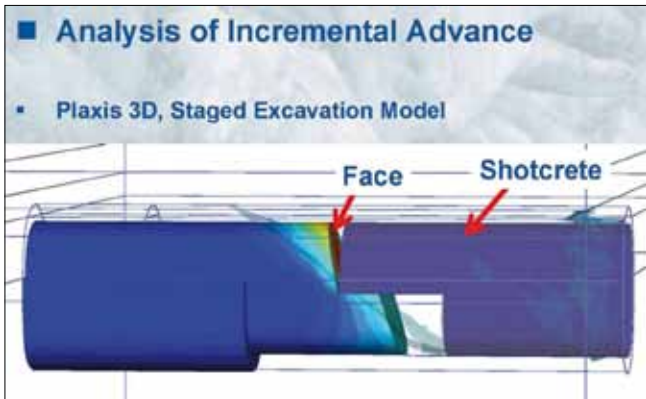


Fig. 4. Ejemplo de análisis con Plaxis 3D

A modo de resumen se incluye la tabla 1 con la comparación de los programas explícitos e implícitos.

3. Túneles convencionales

En relación con los procesos constructivos de túneles en modo convencional, ya sea con perforación y voladura, con perforación por medios mecánicos y con rozadora podemos apuntar como avances en los últimos quince años los siguientes:

- Uso de emulsiones explosivas bombeables: una de las innovaciones en la ejecución de túneles convencionales por perforación y voladura es la utilización como explosivo de emulsiones bombeables.

<u>MÉTODO EXPLÍCITO</u>	<u>MÉTODO IMPLÍCITO</u>
Pequeña cantidad de esfuerzo computacional por tiempo de cálculo	Gran cantidad de esfuerzo computacional por tiempo de cálculo
Necesita emplear más tiempo para llegar a la solución final. En modelos elásticos lineales es excesivamente lento	El tiempo de cálculo necesario es menor al empleado por el método explícito. En modelos elásticos lineales, la matriz de rigidez es constante y el cálculo es rápido y robusto
El método explícito es sensible a los cambios bruscos en las propiedades de los materiales del modelo (por ejemplo, grandes diferencias en la rigidez o en la permeabilidad)	El método implícito es más consistente ante cambios bruscos en las propiedades de los materiales del modelo
Las matrices nunca son creadas. Los requerimientos de memoria son siempre mínimos	Las matrices de rigidez tienen que ser almacenadas.
Desde que las matrices no son creadas, grandes deformaciones y desplazamientos son alojadas sin un esfuerzo computacional adicional	Se necesita un esfuerzo computacional adicional para seguir grandes desplazamientos y deformaciones
No es un método incondicionalmente estable. Puede seguir iterando en estados de colapso del modelo	Método incondicionalmente estable. En un estado plástico el programa deja de iterar
No es necesario iterar para seguir la ley constitutiva no-lineal	Es necesario el proceso de iteración para seguir la ley constitutiva no-lineal
Siempre que el criterio del tiempo de cálculo sea siempre correcto, las leyes no-lineales son siempre seguidas en un camino físico válido	Siempre es necesario demostrar que el procedimiento arriba mencionado es: (a) estable; (b) sigue el camino físicamente correcto

Tabla 1

Una de las principales ventajas de este sistema es que los componentes por separado son inertes y no adquieren el comportamiento de explosivos hasta que son introducidos dentro de los barrenos de la voladura (figura 5).

- Aumento de la potencia de las rozadoras hasta 300 KW, y 135 tm de peso, y computerización de las mismas para mejorar la precisión de la excavación (figura 6).

- Incremento de los tipos de fibras utilizables como refuerzo de las gunitas de sostenimiento y de los hormigones de revestimiento (figura 7).

- Mejora de la precisión de excavación mediante proyección laser en el frente del contorno de la sección transversal en cada punto kilométrico.

En toda excavación realizada mediante perforación, explosivo o medios mecánicos es difícil asegurar que la sección obtenida se asemeje con gran exactitud a la de proyecto. A pesar de que se actúe del lado de la prudencia en la perforación y la disposición de carga de explosivo o la excavación con medios mecánicos, será inevitable obtener una sección que, en la mayoría de los casos, presente un exceso de excavación.

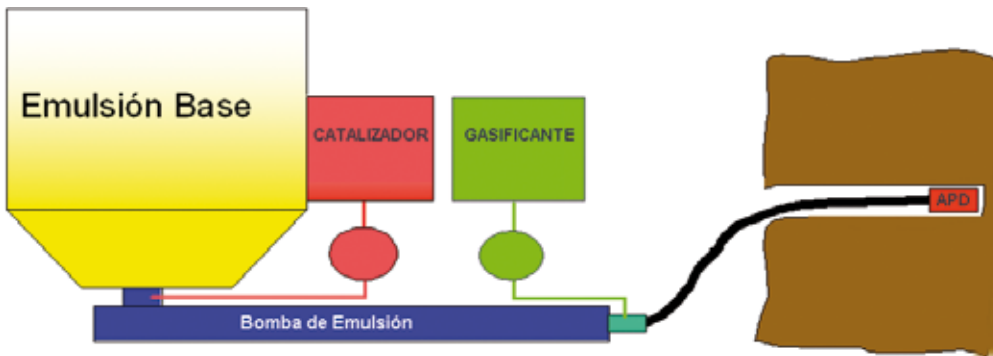


Fig. 5. Esquema de uso de una emulsión

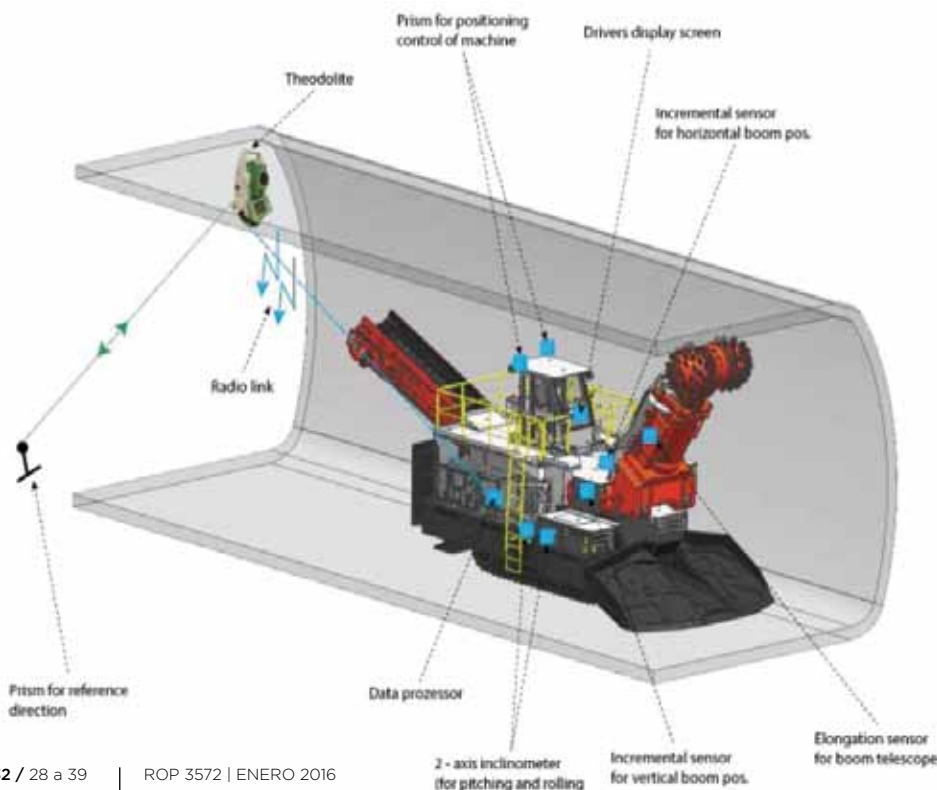


Fig. 6. Rozadora con ayudas de guiado

TIPO DE FIBRAS ÓPTIMO: EL QUE DE MAYOR TENACIDAD

CRITERIO DE OPTIMIZACIÓN:

Menor coste por m³ para obtener la misma resistencia a flexotracción

VARIABLES:

1. Fabricantes

- **acero:** Bekaert, Maccaferri, BMUS, Arcelor, IFT, Hook
- **fibras sintéticas:** Elastoplastic, Forta Ferro, BASF, SIKA, 3M

2. Material y forma Acero trefilado, fibras sintéticas estructurales de diferente composición

3. Longitud de las fibras habituales 33, 37, 48, 60, 54, 60 mm

4. Diámetro de las fibras habituales 0,5/0,75/1,0 mm



Fig. 7. Diversos tipos de fibras

La necesidad de proyectar la sección transversal del túnel, viene dada por los costes añadidos en los que se incurre al sobre o infraexcavar pues, en la actualidad, al usarse medios convencionales de replanteo, los operarios no tienen una referencia continua de la geometría del túnel y con suma facilidad se pueden desviar de la forma descrita en los planos. Dicha sección transversal, definida en proyecto, se proyecta en el frente de excavación con trazo continuo y de forma permanente mientras sea necesaria su proyección.

La proyección de la imagen se logra mediante un único sistema lumínico, sin la colocación de espejos adicionales, produciendo un trazo continuo y permanente. La geometría de la sección a proyectar no está limitada a una única forma o a un subconjunto de ellas, sino que es totalmente programable, y el ingeniero responsable del diseño del túnel la puede seleccionar con toda libertad en base al coste óptimo, sin las ataduras de estar restringido a una forma circular, como sucede en otros diseños.

El sistema de proyección puede estar colocado en la clave o en los hastiales, encargándose el propio sistema de hacer los cálculos geométricos correspondientes a cada localización para proyectar la sección objetivo de manera exacta (figura 8).

- Otra de las mejoras y avances recientes en la ejecución de túneles convencionales es la utilización de una membrana



Fig. 8. Muestra de los ensayos realizados por Acciona I+D+i en el túnel de alta velocidad de Padornelo (Zamora)



Fig. 9. Membrana proyectada con detalle de su instalación

proyectada impermeable. Su principal ventaja es la sencillez de instalación con respecto a las láminas impermeables sujetas por puntos al sostenimiento.

La membrana impermeable proyectada se instala sobre la primera capa de hormigón proyectado con regularización o sin ella, formando una barrera que impide el paso del agua.

A continuación, se incluyen dos fotos (figura 9) en las que se muestra en la primera una capa de impermeabilización proyectada entre dos capas de gunita y en la segunda se ve el sistema de aplicación de la impermeabilización proyectada en un túnel.

Las principales ventajas del sistema son: que se puede aplicar a geometrías complejas, es un sistema continuo sin juntas, es de rápida instalación y solo son necesarios dos operadores para su instalación con muy poca interferencia con otras actividades del ciclo de producción.

4. Túneles mecanizados

Es en este campo donde más novedades se han producido en los últimos quince años.

Marc Brunel patentó en 1818 lo que sería el primer escudo para la perforación de túneles en terrenos blandos, iniciándose en 1824 la construcción del túnel (figuras 10 y 11). La idea de Brunel era ir hincando horizontalmente un gran prisma hueco de unos 65 m² mediante gatos mecánicos constru-

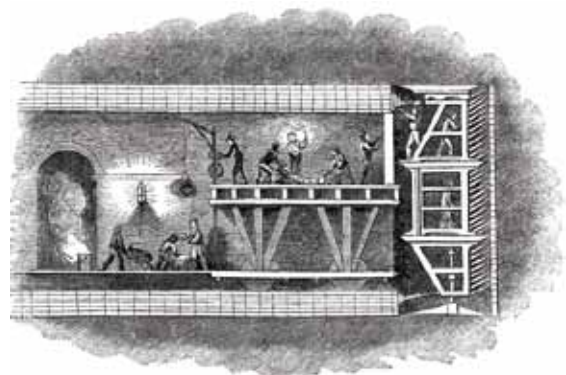


Fig. 10. Esquema de trabajo del primer escudo

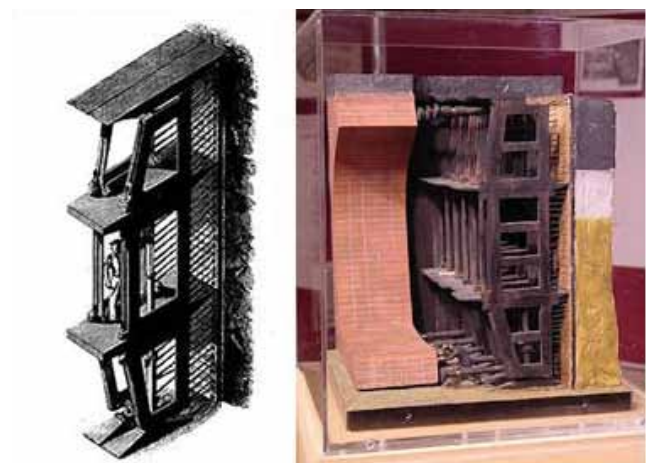


Fig. 11. Maqueta del primer escudo

yendo, por detrás del prisma, el sostenimiento definitivo del túnel, el cual a su vez serviría como reacción para el avance del propio escudo.

Para proteger de derrumbamientos la zona de construcción del sostenimiento definitivo existía un solape, a modo de protección, mediante chapas gruesas, entre el escudo y el recubrimiento.

El frente del escudo rectangular estaba dividido en 12 columnas cada una de ellas con tres celdas, pudiendo trabajar en cada celda dos operarios. Cada una de las columnas podía avanzar independientemente y las celdas estaban cerradas frontalmente con madera. En la figura 11 se puede ver la maqueta existente en el Museo Brunel.

La metodología de trabajo consistía, en función de la estabilidad del terreno a perforar, abrir más o menos celdas a la vez y excavar el frente unos centímetros, cuando una columna había sido excavada totalmente se avanzaba esta. El frente de cada celda estaba cerrado con tablonces de madera, de forma que en casos de terrenos muy inestables, se sacaba el tablón superior, se excavaban unos centímetros, se colocaba de nuevo el tablón y se pasaba al tablón inferior hasta que se completaban todos los tablonces de la celda.

En los últimos años la evolución ha sido hacia los escudos cerrados en la búsqueda del 100 % de seguridad, y el tra-

bajo de forma industrializada bajo una protección segura con escudos y mamparos frontales capaces de aguantar la presión pésima del terreno en cada proyecto, suma del empuje de tierras más la presión hidrostática.

4.1. Incremento de potencia de las tuneladoras

Por otra parte, debido a la presión económica para hacer túneles en un precio asequible se ha buscado la rapidez en la perforación y en el montaje mecanizado de piezas, primero de fundición o metálicas y, posteriormente, con dovelas prefabricadas de hormigón armado, fibro-reforzado o no, con tolerancias propias de un trabajo de calderería. Fruto de esa presión para conseguir mejores rendimientos ha sido el incremento de la potencia de las máquinas tuneladoras, y en particular en el caso español, derivado de ciertas recomendaciones, consideradas por mí acertadas, expuestas en su día por el profesor D. Manuel Melis.

4.2. Cinta continua

Otro de los aciertos introducidos en la excavación de túneles mecanizados es la evacuación por cinta del escombros generado por la rueda de corte, con sus carretes de extensión automática de cinta conforme progresa la perforación con paradas únicamente cuando se agota el carrete de banda de caucho. El uso de cinta continua (figura 13), al igual que el uso de tubería para la extracción del escombros en el caso de los hidroescudos aumenta de forma significativa el rendimiento en comparación con el



Fig. 12. Tuneladoras que alcanzaron record de tamaño, según su tipo, en el año de su fabricación



Fig. 13. Desescombro mediante cinta continua

sistema de evacuación de escombros mediante vagones ferroviarios.

La cinta continua se puede utilizar en túneles de más de 6 m de diámetro de perforación.

4.3. Evacuación por tubería y reutilización de escombros

Una apuesta muy reciente es el uso de tubería para la evacuación de escombros, pero con densidades superiores a las habituales en un hidroescudo, en el tubo de retorno del lodo a la planta separadora. Estas tuneladoras conocidas como tuneladoras de densidad variable implican una molienda a la salida del sinfín con un sobrecoste de energía, pero pueden ser una generalización a todo tipo de terreno, ya sea suelo o roca con una clara vocación por la separación de sólidos y su reutilización en terraplenes, rellenos o incluso como áridos para la elaboración de hormigones o morteros. El uso de tubería se puede acoplar a cualquier diámetro de perforación, desde los tamaños propios de una hincadora de tubos hasta los 17,50 m de diámetro de perforación alcanzados hoy en día.

4.4. Uso de vehículos sobre neumáticos

Los vehículos sobre neumáticos (figura 15) se introducen en el campo de los túneles debido fundamentalmente a razones de seguridad. Son vehículos multiplataforma pero bicabina, es decir se pueden conducir desde cualquiera de las dos cabinas de conducción situadas en sus dos extremos. Estos vehículos se utilizan fundamentalmente para la alimentación de dovelas y el transporte de diversos productos como tubos para el agua, carrete de cable eléctrico, grasas, aceites y otros materiales varios.



Fig. 14. Sistema de bombeo de escombros desde la TBM a superficie



Fig. 15. Vehículos sobre neumáticos usados en el proyecto Legacy Way

Los vehículos se dimensionan para el transporte de un anillo de dovelas, más una dovela base y en algunos casos para dos anillos. La ventaja primordial que introducen es la supresión de la vía, los cambiavías y las locomotoras de gasóleo, además de incrementar la seguridad en el trayecto por la existencia de dos cabinas. Las cargas a transportar pueden variar de 25 a 125 tm. Se pueden diseñar y fabricar vehículos de ancho especial para el cruce de dos vehículos en un túnel de 6m de diámetro de perforación. El radio de giro de estos vehículos es muy reducido. Permiten distancias de transporte de hasta 22 km. Los motores de tracción son diésel de la última generación antiemisiones, y están dotados de equipo antifuego. Los vehículos están diseñados para una emisión de ruido inferior a 80 dB(A) @ 7.5 m acelerando a plena carga. Alcanzan una velocidad de 5 km/hora cargado y de 10 km/hora cuesta abajo.

4.5. Mortero bicomponente

En mi opinión, otro avance que se ha realizado en los últimos años es la generalización del uso de mortero bicomponente, transportado por sendas tuberías desde la planta mezcladora situada en superficie, en el relleno de trasdós del revestimiento de los túneles con dovelas prefabricadas. Aunque este procedimiento ya se había extendido en los túneles ejecutados en suelos con máquinas EPB, se ha puesto en marcha en túneles perforados en roca incluso con doble escudo mezclando las inyecciones por las toberas inferiores del escudo de cola con las inyecciones por las toberas dispuestas en las propias dovelas, situadas en la parte alta del revestimiento.



Fig. 16. Maqueta a escala natural del mortero bicomponente en Legacy Way

El relleno con mortero bicomponente se basa en el uso de dos productos, uno formado por una lechada de cemento con adiciones pulverulentas y una cantidad de bentonita capaz de evitar la exudación de la lechada durante el transporte por tubería, con el fraguado inhibido más de 72 horas, y un activador de fraguado que se transporta por conducción independiente y que provoca la gelificación casi inmediata de la lechada al entrar en contacto con ella, en cuestión de un intervalo de tiempo de 10 segundos.

4.6. Sistemas de descarga rápida

Con el fin de anular las pérdidas de tiempos muertos y disminuir la duración de los ciclos de trabajo, suma del tiempo de perforación, montaje del anillo de revestimiento, inyección del trasdós y reposicionamiento de la máquina para iniciar el siguiente ciclo, se ha apostado recientemente por los sistemas de descarga rápida de las maniobras de alimentación de dovelas de revestimiento en los remolques de apoyo próximos a la rastra de alimentación al erector situado en el escudo, con el fin de reducir el ciclo de transporte y aprovechar al máximo la capacidad de los vehículos de alimentación de dovelas.

4.7. Mejora de la seguridad de los trabajadores durante la fase de construcción

Se han introducido medidas de seguridad de los trabajadores para los casos de emergencia que impidan la evacuación inmediata al exterior de los trabajadores ubicados en las diferentes plataformas de trabajo de una tuneladora. Para ello, se han acoplado dentro de los remolques de apoyo una o dos cabinas antifuego autoabastecidas para alojar todos los trabajadores de un ciclo de trabajo durante un mínimo de dos horas. Asimismo, se ha incorporado en las instalaciones auxiliares de ejecución del túnel sistemas de sectorización de la emergencia mediante cortinas de agua nebulizada.

4.8. Uso de hormigones de alta resistencia en las dovelas prefabricadas de revestimiento

Es habitual hoy el uso de hormigones de alta resistencia (50 Mpa de resistencia característica) en la fabricación de las dovelas de revestimiento de túneles mecanizados ejecutados con tuneladora (figura 17). Si bien esto se ha conseguido al tratar de producir de forma industrial dovelas de calidad en pocas horas de trabajo, es una realidad que los túneles ejecutados con tuneladora en España tienen un hormigón más denso y más duradero debido al empleo de una baja relación agua/cemento y el uso de superplastificantes de última generación conjuntamente con un aditivo antisegregación.



Fig. 17. Dovelas prefabricadas de hormigón de altas prestaciones

4.9. Optimización del armado de las dovelas

En los tiempos modernos las fibras de acero, nylon, poliéster, polietileno, polipropileno y poliolefina han ganado popularidad para remediar y mejorar ciertas características o propiedades del hormigón.

Desde hace ya más de una década distintas compañías se ha empeñado en investigar y desarrollar materiales compuestos metálicos y no metálicos con una especial atención por el estudio de fibras de acero y fibras macrosintéticas para mejorar las propiedades mecánicas de los morteros y hormigones.

La introducción de fibras ya sean metálicas o sintéticas estructurales en hormigones de altas prestaciones mecánicas, produce una mejora del comportamiento del material en varios aspectos de su funcionalidad en las estructuras de túneles, ya sean definitivas como los anillos de dovelas prefabricadas y los revestimientos in situ, como para sostenimientos provisionales como es el hormigón proyectado fibro-reforzado.

Las ventajas asociadas al uso de fibras, en particular aquellas que tienen el carácter de estructurales, en los elementos de revestimiento de túneles, están ligadas a los siguientes aspectos:

- ductilidad y tenacidad del hormigón;
- durabilidad en ambientes agresivos;

- comportamiento frente a la retracción;
- comportamiento frente al fuego;
- comportamiento estructural tridimensional.

Resumidamente, las principales ventajas que estos materiales introducen en el hormigón son:

- Aumento de la tenacidad en la superficie del hormigón, garantizando una capacidad mayor para resistir impactos y evitar roturas de los recubrimientos.
- Aumento de la ductilidad en la masa del hormigón, por la capacidad de las fibras de distribuir las fisuras tridimensionalmente, reduciendo el ancho de las mismas. Asimismo, con una cuantía suficiente y cumpliendo las disposiciones normativas, pueden garantizar la ductilidad de la sección de hormigón.
- Reduce la retracción plástica del hormigón durante el fraguado y endurecimiento, tanto más cuanto mayor número de fibras existan por kilogramo.
- En ambientes agresivos, las fibras sintéticas confieren al hormigón un aumento de la durabilidad, debido a la capacidad de las fibras de reducir la fisuración del hormigón y aumentar su impermeabilidad y resistencia al ataque químico.

- Producen un efecto favorable en las condiciones de fuego dentro de un túnel. Si bien no son las fibras específicas para tratar las patologías que el hormigón sufre durante los incendios, las ventajas frente a los refuerzos de acero son notables.

- Permiten reducir las cuantías de acero pasivo utilizadas en el refuerzo de las dovelas, disponiendo la armadura donde es necesaria por las cargas concentradas recibidas durante las diferentes fases de la construcción del túnel, manteniendo el comportamiento dúctil de la sección de hormigón fibro-reforzado. De este modo, se realizan refuerzos más racionales, pues son proporcionales a las cargas recibidas y garantizan el formato de seguridad de las normativas vigentes.

- Mayor rapidez de ejecución de la ferralla y mejores condiciones para los operarios durante las operaciones de hormigonado, redundado también en un incremento positivo de las condiciones de seguridad.

4.10. Juntas de estanqueidad

En este aspecto se están logrando avances importantes en el desarrollo de juntas de estanqueidad para las dovelas de revestimiento con mejores prestaciones, entre los que destacan las innovaciones en los detalles de unión y vulcanizado de las esquinas de los marcos de caucho que se colocan en cada una de las dovelas para garantizar una plena estanqueidad en condiciones de gran presión hidrostática, así como el empleo de soluciones mixtas incorporando pequeños cordones de caucho hidrofílico sobre el caucho sintético EPDM (figura 19). También se han desarrollado nuevas juntas ancladas que se colocan directamente en los moldes antes de verter el hormigón para evitar problemas de inhalación de disolventes emitidos por las colas de pega.

4.11. Investigación continua del frente a perforar

Uno de los principales problemas que tienen las máquinas tuneladoras es la perforación de secciones mixtas. Por ello es muy importante conocer en avance la tipología del frente en cuanto a si existen diferencias importantes de dureza o constitución de la sección circular que encuentra la cabeza de corte en el frente. Hoy en día existen patentes bien desarrolladas, como el sistema Mobby Dick, que en función de varios sensores ubicados en los discos de corte, que miden la velocidad de giro, la temperatura del disco y la presión ejercida por el disco sobre el frente, todo ello transmitido vía *wifi* al ordenador de la cabina de

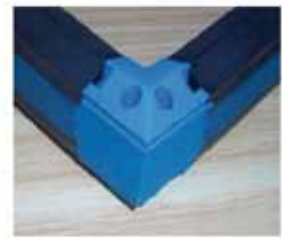


Fig. 18 Detalle optimizado de armadura de la dovela en barras

Hydrophilic corners to provide continuous hydrophilic top surface of EPDM coextruded profile



EPDM + hydrophilic coextruded profile



Hydrophilic corner

Fig. 19 Detalles incorporados en el los marcos de estanqueidad

mando, permiten graficar cada vuelta de la rueda de corte el aspecto que presenta el terreno en cada momento, con lo cual el piloto de la tuneladora y fundamentalmente el *staff* de mando de la misma puede decidir los parámetros de velocidad de avance y penetración en cada punto kilométrico, así como visualizar las necesidades de cambio de herramientas precisas en cada momento. **ROP**