

Túneles en México y en España: semejanzas y diferencias

Tunnels in Mexico and Spain: similarities and differences

Manuel Romana Ruiz. Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Catedrático Emérito de Ingeniería del Terreno.
Universidad Politécnica de Valencia. Valencia (España). mromana@stmr.es

Resumen: Los túneles en México tienen una larga historia. Hay un túnel en Teotihuacan, varios del periodo virreinal, bastantes túneles ferroviarios de los siglos XIX y XX y numerosos túneles modernos (en carreteras, autopistas, metro, urbanos, proyectos hidroeléctricos y drenaje). La principal diferencia con los túneles españoles modernos es conceptual: en México es poco frecuente el uso del Nuevo Método Austriaco. Las semejanzas son muchas: tipología de los túneles, métodos de sostenimiento, uso de tuneladoras, instrumentación geotécnica. Es deseable más comunicación entre los mundos de la ingeniería de túneles de México y España (y en general entre las sociedades civiles de ambos países) La Jornada sobre "Túneles en México", organizada en Barcelona por la Cátedra Payma-Cotas, fue una excelente aportación en este sentido.

Palabras Clave: Construcción; Túneles; México; España

Abstract: Tunnels have a long history in Mexico. There is one tunnel in Teotihuacan, various from the viceroyalty period, a large number of railway tunnels from the 19th and 20th centuries and numerous modern tunnels (road, motorway, metro, urban, hydroelectric projects and drainage). The main difference with that of modern Spanish tunnels is more a conceptual one as in Mexico the New Austrian Tunnelling Method is rarely employed. There are, however, many similarities: type of tunnels, methods of support, use of tunnel boring machines, geotechnical instrumentation. There should be more communication between the tunnel engineering worlds of Mexico and Spain (and between the civil societies of both countries in general). The Conference on "Tunnels in Mexico", organised by the Payma-Cotas Chair in Barcelona, has served as an excellent contribution in this regard.

Keywords: Construction; Tunnels; Mexico; Spain

1. Introducción

El 7 de junio de 2011 se celebró, en Barcelona, en la Universidad Politécnica de Cataluña, una Jornada sobre Túneles en México, organizada por la Cátedra de empresa Payma-Cotas (1).

En su presentación se decía: "En esta Jornada Técnica del Aula PaymaCotas el tema lo da un país: México. Durante los últimos años, y al socaire del fuerte impulso recibido por la inversión en infraestructuras, la actividad tunelera en México y las obras subterráneas en su sentido más amplio están teniendo un desarrollo muy importante. La Jornada que aquí se presenta trata de dar un panorama de esta actividad. Para ello

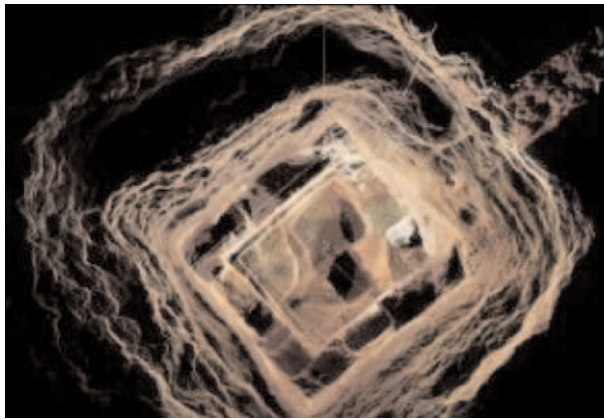
se cuenta con algunos de los actores principales (destacados ingenieros mexicanos) de estos desarrollos, con puntos de vista tanto de promotores como de empresas constructoras y de ingeniería".

"La Jornada se cierra con una mesa redonda en la que (Ingenieros españoles) con amplia experiencia en obras subterráneas tanto en México como en España expondrán su punto de vista sobre como trasladar mejor las experiencias al respecto de uno a otro país".

Este artículo recoge, con leves retoques, mi intervención en esa Mesa Redonda y su objetivo es presentar a los asistentes (casi todos ellos españoles) el mundo de los túneles en México.



Arriba, fig. 1. Pirámide del Sol en Teotihuacan. A la derecha, fig. 2. Pozo de acceso al túnel bajo la Pirámide del Sol en Teotihuacan.



2. México y España

México (1.960.000 Km², 112.000.000 de habitantes) y España (500.000 Km², 47.000.000 de habitantes) son los dos países más poblados de Hispanoamérica y las dos mayores economías de los estados en que se habla español. Sus relaciones políticas son excelentes (y lo han sido en los últimos 45 años), no tienen ningún contencioso, ni sus intereses comerciales originan ninguna competencia. A iniciativa del Presidente Lázaro Cárdenas México acogió con gran cariño a muchos españoles “trasmigrados” a México (según el término acuñado por el filósofo español José Gaos, exiliado también a México) tras nuestra guerra civil de 1936-39.



Fig. 3. Aspecto actual de la Pirámide de Cholula.

España (el 5º miembro, por orden de importancia, de la Unión Europea) es la “plataforma” natural para el contacto de México con Europa y México lo es para el contacto de España con Iberoamérica. Como apuntaba Ferrer Bohórquez (2) México está llamada a ser, en el futuro, una de las más grandes potencias culturales y económicas del planeta, probablemente la primera del ámbito hispano.

Y, sin embargo, las sociedades civiles de ambos países tienen una relación escasa, mucho menor de la que tienen, por ejemplo, las sociedades civiles de Estados Unidos e Inglaterra. En general ambos pueblos se conocen poco entre sí, aunque hay excepciones en los mundos literario, artístico o taurino, en los que las “estrellas” de los dos países se mueven con gran fluidez entre ambos, y en ambos son recibidos con gran simpatía.

En el campo de la ingeniería civil ocurre lo mismo, aunque en los últimos años ese desconocimiento mutuo empieza a disminuir. Por eso son importantes las iniciativas (como la Jornada sobre Túneles en México) que ayuden a reducir el desconocimiento de los ingenieros civiles españoles sobre la notablemente desarrollada tecnología de construcción de túneles en México. Sería de desear la celebración de más jornadas similares en otros sectores de la construcción y obra pública.

3. Túneles antiguos en México

Nos referiremos como túneles “antiguos” a los túneles construidos antes de la 2ª Guerra Mundial. Recordemos que el primer Congreso Internacional de Mecánica del Suelo se celebró en Boston (USA) en 1936, que la clasificación de Terzaghi para túneles se publicó en 1947 y que el primer túnel del mundo con sostenimiento de hormigón proyectado se construyó en Venezuela en 1954. La tecnología “moderna” de construcción de túneles comenzó entonces.

Hace un par de años se descubrió un túnel, a 12 m de profundidad bajo la Pirámide del Sol de Teotihuacan (figura 1), posiblemente conectado con algún enterramiento (hay nichos laterales y síntomas de saqueos), que sería el más antiguo de Mesoamérica. El túnel, de 103 m de largo, arranca de un pozo de 7,5 m de profundidad situado frente al pie de la escalera de la pirámide y termina en un conjunto de 4 cámaras con planta en forma de pétalos de flor. (3). La figura 2 muestra el pozo de acceso al túnel.



Para explorar las numerosas pirámides mexicanas los arqueólogos han construido galerías dentro de ellas. Por citar un solo caso, en el interior de la pirámide de Cholula (figuras 3 y 4) hay 8 kilómetros de túneles, de los cuales 800 metros son visitables para el público (4).

En el México virreinal se construyó el primer túnel en 1657. El ingeniero Bernardo Quintana (5) lo cuenta así: “Durante la Colonia, la capital de la Nueva España pronto enfrentó inundaciones periódicas. En 1555, por decisión del gobierno virreinal, los ingenieros levantaron el albaradón de San Lázaro. En 1580 el albaradón fue rebasado por las aguas de las lagunas interiores. En 1607 el virreinato encargó –al técnico y científico alemán Enrico Martínez- la construcción del primer desagüe para drenar las lagunas de Xaltocan y Zumpango, a través de un túnel y un tajo en Nochistongo, obra que construyeron 461 mil indígenas en tan solo 11 meses”.

Después de la Independencia de México las primeras obras de ingeniería que requirieron la cons-

trucción de túneles fueron los ferrocarriles. La primera concesión, entre las ciudades de México y Veracruz, se adjudicó en 1837, pero la línea completa no se terminó hasta 1873. En 1880 la red ferroviaria era de 1073 km. Alcanzó 5731 km. cuatro años más tarde. La red de ferrocarriles se extendió durante el período conocido como “época porfirista”, bajo la égida de Porfirio Díaz. En 1910 existían cerca de 20,000 km. de vías.

La figura 5 muestra uno de los primeros túneles ferroviarios, todavía en servicio a pesar de su gálibo estricto. Es uno de los 8 túneles entre Cárdenas y Tamasopo (SLP) del ferrocarril KCSM (6).

Para drenar la ciudad de Guanajuato se construyó en 1883 una serie de túneles que están aún en servicio, pero con un fin distinto: reducir la congestión urbana. La figura 6 muestra uno de ellos en la actualidad.

Para drenar el valle de México “en 1900, el Presidente Díaz inauguró el Gran Canal del Desagüe

A la izquierda, fig. 4. Pie restaurado de la Pirámide de Cholula. A la derecha, fig. 5. Túnel en el ferrocarril KCSM en San Luis de Potosí (Eaton, 2008).



A la izquierda, fig. 6. Túnel urbano en Guanajuato. A la derecha, fig. 7. Embocadura del túnel de drenaje de Tequisquiác.



Fig. 8. Aspecto de un túnel en la carretera México-Acapulco (1930).

–con 47 kilómetros de longitud– y el Túnel de Tequisquiác, con 10 kilómetros. El canal... descargaba las aguas –a través del Túnel– en el Tajo de Nochistongo, de 2.5 kilómetros de longitud, que se une al río Tequisquiác” (5). La figura 7 muestra la embocadura original del túnel.

El desarrollo de la red de carreteras, durante el siglo XX requirió más túneles. La figura 8 muestra un ejemplo: un túnel en la carretera México-Acapulco en 1930.

3. Diferencias conceptuales entre Norteamérica y Europa en el arte de los túneles

En la industria de la construcción del siglo XXI los trasvases de tecnología son casi instantáneos, de forma que las máquinas (o los aditivos químicos) se estrenan a la vez en todas partes y sus instrucciones de uso y ejecución son mostradas simultáneamente en todos los países del mundo. Y si queda algo por detallar los viajes y las comunicaciones de los constructores bastan para transmitirlo muy deprisa. Recuérdese por ejemplo la rapidez con la que se conocieron las roturas en la pantalla de hormigón de la presa brasileña de Campos Novos o los éxitos en la excavación del túnel de base transalpino suizo de San Gotardo.

Pero los sistemas conceptuales mentales tardan mucho en desaparecer. Es difícil cambiar los conceptos que se aprendieron en la Universidad. Hay un dicho, muy cínico, que afirma que un concepto erróneo solo desaparece cuando se retiran de la docencia todos los profesores que lo enseñaron alguna vez. Pero si en vez de un concepto erróneo se

trata de una manera de ver las cosas es mucho más difícil el cambio de punto de vista.

En el arte de los túneles la tecnología actual de sostenimientos en túneles excavados por voladuras es la misma (aunque con nombres diferentes): anclas pasivas, concreto lanzado y formas en México; bulones, hormigón proyectado, y cerchas en España.

Pero el sistema conceptual básico es distinto: los criterios de Terzaghi en México; los criterios de Rabcewicz en España (lo que llamamos el “Nuevo método austriaco de construcción de túneles” o, de una forma más neutral, “Método secuencial de construcción de túneles”).

Es curioso constatar que ambos, Terzaghi y Rabcewicz, entraron simultáneamente en el mundo de los túneles, en la década 1940-50: El austriaco Terzaghi asesorando durante la construcción del metro de Chicago y escribiendo para el Prontuario de la “Shearing and Stamping Company” (1947). El austriaco Rabcewicz como oficial de ingenieros de la Wehrmacht en la campaña de Rusia durante la 2ª guerra mundial, construyendo bunkers subterráneos para aeropuertos militares de campaña, y como ingeniero civil implicado en la reconstrucción europea después de la 2ª Guerra Mundial (obtuvo en 1948 la Patente Austriaca nº 165.573, como primera definición de su método).

El sistema “europeo”, el Nuevo Método Austriaco, ha empezado a utilizarse en México en algunos casos, incluso en suelos tan complejos como los del Valle de México. Como ha pasado en Madrid y en Barcelona, el Nuevo Método Austriaco puede plantear problemas. La figura 9 muestra una rotura (“falla”) en una conexión de la línea 7 del Metro de México D. F. El discurso de ingreso del Ingeniero Rodríguez González en la Academia de Ingeniería de México este mismo año (7) contiene, además de este, otros varios casos de análisis forense de roturas con causas geotécnicas (varias de ellas en excavaciones con pantallas) en el difícil subsuelo de la ciudad de México. Y una de sus observaciones no tiene desperdicio: dice el Ingeniero Rodríguez González que “*el que esté libre de una falla geotécnica, que tire la primera piedra*”

En cambio los métodos de análisis y cálculo son muy similares en todo el mundo y están basados, actualmente, en los conceptos del magisterio de Hoek y en los métodos numéricos de cálculo. No llegan a la media docena los códigos numéricos que

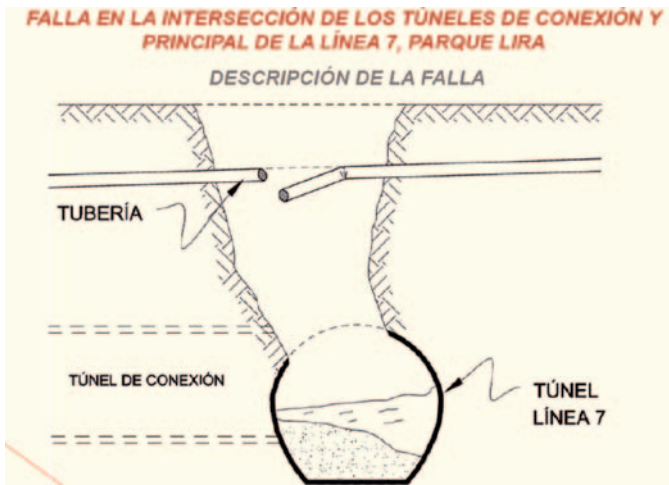


Fig. 9. Croquis de la rotura ("falla") en una conexión de la línea 7 del Metro de México D. F. (según Rodríguez González, 2011). A la derecha, fig. 10. Husos granulométricos más adecuados para cada tipo de escudo según De la Paz & Yañez (2011).

se utilizan en todas las partes del mundo: FLAC en diferencias finitas, ABAQUS; ANSYS, PHASE, PLAXIS y otros en elementos finitos.

4. Túneles excavados con tuneladora en México

En los túneles excavados con tuneladora (TBM, "Tunnel Boring Machine") no hay diferencia alguna entre Norteamérica y Europa porque el concepto básico lo desarrolló la industria, brillantemente liderada por los Robbins, (padre e hijo), primero en USA, después en Alemania, Austria, Canadá, Francia, Italia y Japón y ahora en cualquier sitio del mundo.

El año 2010 he visto, en la construcción de la línea 12 del metro de México D. F., como empezaba a perforar una tuneladora montada por primera vez a pie de obra con piezas procedentes de Canadá, China y USA.

Que las prácticas son iguales en México y España lo demuestra la figura 10 (8) en la que se resumen las características granulométricas de los suelos más adecuadas para el uso de los diferentes tipos de escudos (EPB o BP).

Un buen ejemplo de dovelas puede verse en la figura 11 que presenta un conjunto de fotos del túnel del Río de la Compañía, con un diámetro de más de 5 metros y una longitud en fase inicial de 6,7 kilómetros (se prolongará 25 kilómetros más en 2ª fase), a 30 metros de profundidad, para el drenaje de una zona oriental del Valle de México. Este túnel fue el primero construido en México con una tuneladora EPB. En este

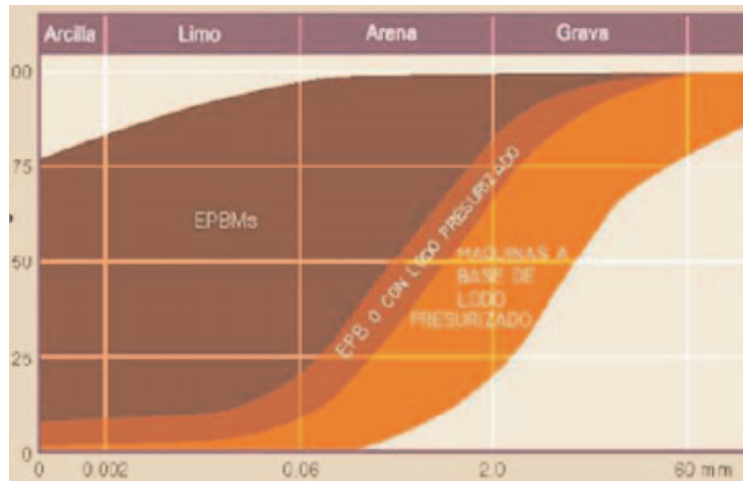


Fig. 11. Dovelas e instrumentación en el túnel de drenaje del Río de la Compañía (cortesía ICA).

túnel se ensayó, con éxito, un sistema novedoso de construcción de pozos (denominados "lumbreras" en México) en terrenos blandos, utilizando ampliamente las suspensiones bentoníticas: "las lumbreras de flotación"⁽¹⁾. Su descripción cae fuera del alcance de este artículo. Puede consultarse una excelente y breve reseña en Schmitters J. J. (9).

En la misma figura se aprecia también su instrumentación, perfectamente adaptada. La instrumentación y auscultación completas de las obras es una práctica tan totalmente desarrollada en México como en España.

(1) Hjort, E. (2011) "Comunicación personal".





A la izquierda, fig. 12. Bocas del Maxitúnel de Acapulco. A la derecha, fig. 13. Interior del Maxitúnel de Acapulco.



5. Túneles carreteros en México

La compleja orografía de México hace necesarios los túneles carreteros. Por ejemplo el acceso al Puerto de Acapulco se resolvió mediante un túnel (conocido con el nombre de "Maxitúnel") que tiene casi 3 km. de longitud. Consta de dos tubos en las bocas y uno en el interior con tres carriles. Esta curiosa disposición deriva del hecho de que se trata de un túnel de peaje en concesión y está adaptado en superficie para una segunda fase en la que el tráfico crezca hasta requerir los cuatro carriles en toda su extensión. La figura 12 muestra una de las bocas y la figura 13 el interior del túnel central.

Fig. 14. Túnel en servicio en la autopista Amozoc-Perote. (Poon, 2009).



México está construyendo una extensa red de autopistas. Véase por ejemplo la figura 14 que muestra un túnel en servicio en la autopista Amozoc-Perote

El Director General de Carreteras, Ingeniero Clemente Poon Hung definía la situación actual de la construcción de túneles carreteros en México (en una reunión auspiciada por la UNAM el 2 de septiembre de 2009) con estas palabras: "En los últimos 25 años se construyeron 19 túneles (de carretera) con una longitud (total) de 7,547 km, por lo cual el desarrollo en México de esta especialidad durante ese tiempo quedó un tanto estacionado. Destacando en las obras: Libramiento de Puerto Vallarta, Cuernavaca-Acapulco y Pátzcuaro - Uruapan - Lázaro Cárdenas (Túnel el Tigre.) Durante éste y los próximos cinco años se contempla la construcción de 80 túneles con una longitud total de 26,300 metros, destacando las autopistas de Durango-Mazatlán, México - Tuxpan y Mitla - Tehuantepec" (10).

Solo en la autopista Durango-Mazatlan "El proyecto consideró la construcción de 63 túneles con una longitud conjunta de 18.000 metros, y el túnel "El Sinaloense" que será el más largo con una longitud de 2.600 metros". Varias empresas españolas participan en su construcción.

Las figuras 15, 16 y 17 muestran respectivamente la sección tipo adoptada (para la segunda fase de explotación), uno de los túneles en construcción y otro de los túneles con la construcción terminada.

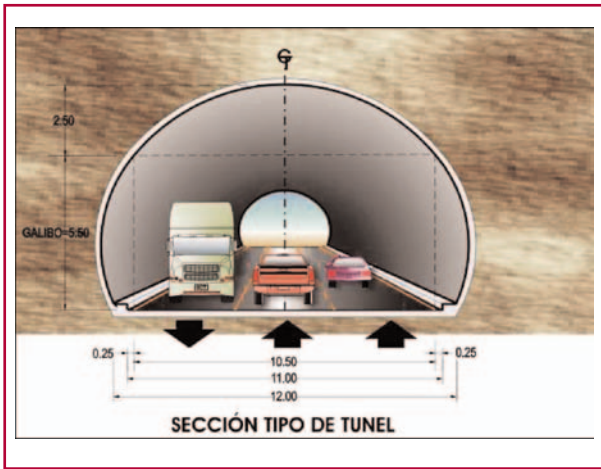


Fig. 15. Autopista Durango-Mazatlán. Sección tipo 2ª fase (Poon, 2009).



Fig. 16. Autopista Durango-Mazatlán. Portal en construcción (Poon, 2009).



Fig. 17. Autopista Durango-Mazatlán. Túnel construido. (Poon, 2009).

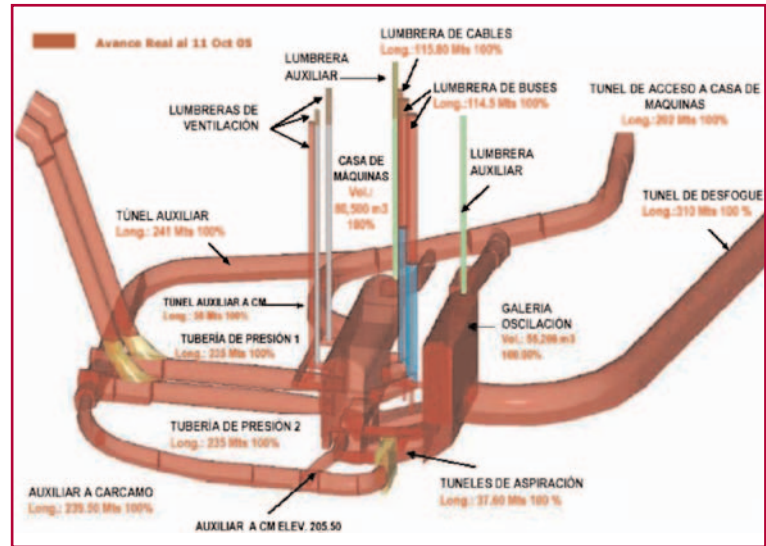


Fig. 18. Central hidroeléctrica El Cajón. Cavernas y túneles complementarios y auxiliares (tomada de Yáñez, 2006).

6. Túneles y cavernas hidroeléctricas en México

La excavación de cavernas hidroeléctricas es, y ha sido siempre, un campo mucho más homogéneo porque los ingenieros hidroeléctricos trabajan preferentemente según el método del caso y están al tanto de lo que se hace en cualquier caverna hidroeléctrica del mundo. En general son prudentes y cuando extrapolan lo hacen en pasos pequeños.

México tiene una gran tradición en la construcción de presas de escollera con núcleo de arcilla y/o pantalla de hormigón. El libro de Marsal y Reséndiz (11) fue una primicia mundial y estuvo en todas las bibliotecas (y aún está porque los ensayos de resistencia de las escolleras publicados en él se siguen utilizando como referencia).

El dilatado programa de construcción de proyectos hidroeléctricos de la CFE (Comisión Federal de Electricidad) continúa e implica la construcción de numerosos túneles y cavernas.

Por citar un solo caso, el último proyecto inaugurado fue El Cajón (2003-2007), que incluye una presa de escollera con pantalla de hormigón de 188 m de altura y una central subterránea de 750 Mw cuyo esquema se muestra en la figura 18, tomada de Yáñez, (12).

La figura 19 (tomada también de Yáñez, 2006) muestra un esquema de los túneles de predesvío y desvío del río. La suma de longitudes de los túneles de predesvío, desvío y central alcanza los 4.000 m.

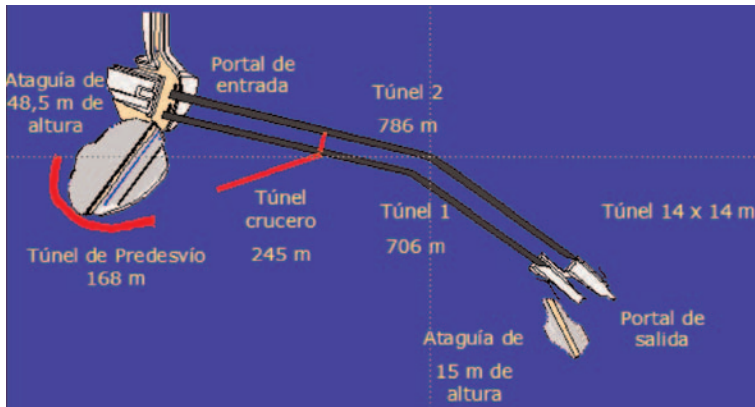


Fig. 19. Presa de El Cajón. Túneles de predevío y desvío (tomada de Yáñez, 2006).

En la Jornada Payma-Cotas se describieron con detalle los túneles y las excavaciones subterráneas incluidos en el Proyecto Hidroeléctrico de La Yesca, que está actualmente en construcción muy avanzada, y es similar pero de tamaño algo mayor que El Cajón: la presa, con más de 200 m de altura, es la segunda en altura en el mundo en su tipo; la central hidroeléctrica subterránea es de igual potencia (750 Mw.) pero de mayor salto que la del proyecto de El Cajón. Tengo la satisfacción profesional de colabo-

rar en la construcción de esta obra de forma permanente desde su comienzo.

7. Conclusión

La historia de los túneles en México es antigua, tanto como la de cualquier país europeo. Y, como se puso de relieve en la Jornada Payma-Cotas, continua pujante y con gran actividad. Tanto el metro de México D. F. (el 3° del mundo en número de viajeros) como el sistema de drenaje del Valle de México tienen una gran longitud de túneles y están actualmente en ampliación: el Metro con la línea 12; el drenaje con el Túnel Emisor Oriente (el "Teo").

Volvemos al principio: sería de desear la celebración de más contactos interprofesionales entre España y México en los distintos sectores de la construcción y de la obra pública. Todos aprenderíamos.

Y, hablando de túneles, espero que esta breve panorámica haya mostrado que, en el campo de los túneles, son mayores las semejanzas que las diferencias entre las industrias de la construcción de México y España. ♦

Referencias:

- (1) Cátedra de empresa Payma-Cotas en la Universidad Politécnica de Cataluña (2011). "Jornada sobre Túneles en México" Ed. E. Alonso & M. Arroyo.
- (2) Ferrer Bohórquez, J. C. (2009) "El papel de la sociedad civil en las relaciones México-España" Diario El País, 26/09/2009.
- (3) Alfaro R., Belmont E., Cervantes A., Grabski V., Lopez Robles J. M., Manzanilla L., Martínez Dávalos A., Morano M., Sandoval A. y Menchaca A. (2007) "Pirámide del Sol" Revista Investigación y Ciencia, septiembre.
- (4) Wikipedia (2011) "Great pyramid of Cholula" http://en.wikipedia.org/wiki/Great_Pyramid_of_Cholula.
- (5) Quintana, B. (2010) "La ingeniería en el desarrollo y el crecimiento económico de México" Discurso de ingreso en la Academia de Ingeniería de México.
- (6) Eaton D. (2008) "KCSM, Kansas City Southern México. Conectividad ferroviaria-portuaria. Clave para el desarrollo industrial de México" http://www.google.es/url?sa=t&source=web&cd=5&ved=0CD4QFjAE&url=http%3A%2F%2Farchivos.diputados.gob.mx%2FComisiones%2FOrdinarias%2FTransportes%2FMesa1%2FDavidEaton.ppt&rct=j&q=%22David%20Eaton%22%3A%20%20%22%20filetype%3Appt&ei=fQ7UTdbQHc6w8QP3mL3nCG&usg=AFQjCNGahjBaPP8ag_AQoNP9ocuM5KOazQ.
- (7) Rodríguez González, L. B. (2011) "Ingeniería geotécnica forense; análisis de algunos casos" Discurso de ingreso en la Academia de Ingeniería de México.
- (8) De la Paz, M. A. & Yáñez, D. (2011) "Funcionamiento de máquinas tuneladoras" Boletín ICA-Ingeniería, n° 17, marzo - abril.
- (9) Schmitters, J. J. (2010) "Ingeniería y consultoría geotécnicas en el México del siglo XXI". En "El siglo de la mecánica de suelos" Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos (*) Pp 213-218.
- (10) Poon, C. (2009) "Programa carretero 2007-2012. Proyectos de ingeniería en México. Situación actual y perspectivas" Conferencia de Carreteras en México. UNAM.
- (11) Marsal, R. & Reséndiz, D. (1975) "Presas de Tierra y Enrocamiento". Ed. LIMUSA, México.
- (12) Yáñez D. (2006) "La ingeniería en la construcción del proyecto Hidroeléctrico de El Cajón". Fundación ICA. Colección Ingeniería y Desarrollo.

(*) Su nombre actual es Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica (SMIG) y engloba las antiguas sociedades mexicanas de mecánica de suelos y de mecánica de rocas, que se fusionaron a finales de 2010.