

Reflexiones desde la ingeniería de consulta

El concreto en el diseño de túneles y obras subterráneas

Ingeniero Jorge E. Ardila R., Ingeniero Antonio J. Rodríguez J.
Geotúneles S.A.S.

Fotos: Cortesía Geotunnel & Getúneles S.A.S



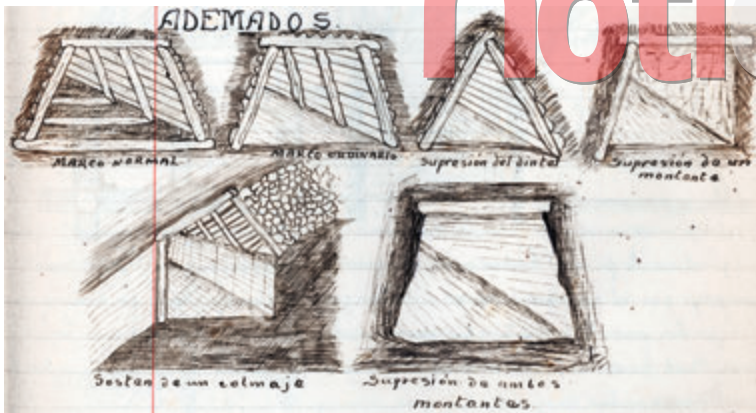
↑ Túneles de Kachotis terminados en la doble calzada Ancón Sur -Primavera, Municipio de Caldas, Antioquia, Colombia.

En este artículo se presentan las principales reflexiones que desde la ingeniería de consulta han hecho los autores con respecto a la importancia del concreto en el diseño de túneles y obras subterráneas en Colombia. Se incluyen dentro de los aspectos más importantes, los antecedentes que se tienen con respecto al uso del concreto en las actividades de diseño y la de construcción; las diferentes aplicaciones y tipos de concreto; algunos ejemplos de lecciones aprendidas en el país; principales ventajas y desventajas y, finalmente, las recomendaciones que desde la ingeniería de consulta se deben contemplar dado que se estima sean construidos cerca de 300 km de estas fantásticas obras de ingeniería en los próximos 20 años a lo largo de las tres cordilleras para diferentes fines.

Antecedentes

Los orígenes de los túneles y obras subterráneas de carácter civil se remontan a la minería subterránea, la cual, aproximadamente desde la edad media, según los reportes de Georgius Agricola en su conocida obra *De Re Metallica*¹, comenzó a tecnificarse e introducir elementos rudimentarios de soporte temporales para los túneles, pozos y galerías de explotación, tales como los pilares, marcos de madera, empalizados o actualmente conocidos en la industria de la minería como “Puertas Alemanas”, los cuales salvo escasas variaciones subsistirían hasta nuestros días.

Las primeras explotaciones de carbón estuvieron localizadas en el centro de producción denominado Carboneras de San Jorge en el Departamento de Cundinamarca, en cuyas minas se emplearon como métodos de explotación los de tambores paralelos, tajos largos, cámaras y pilares, inicialmente con condiciones de ventilación, desagüe, iluminación, entibación y de soporte (Puertas Alemanas) precarias; sin embargo, dichas condiciones evolucionarían a la par con el estado del arte de la época, al tiempo que aportaron como legado fundamental experiencias y aplicaciones que en lo sucesivo serían empleadas extensivamente en la construcción de túneles y obras subterráneas de carácter civil, principalmente en la construcción de los túneles férreos que emprendería el país a finales del siglo XIX.



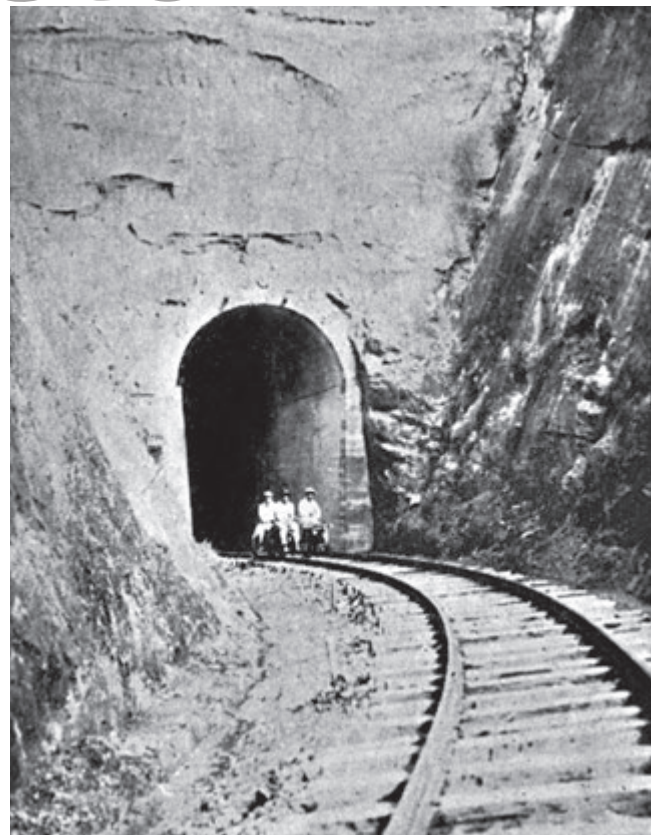
↑ Diagrama de primeras explotaciones, diferentes soportes (Puertas Alemanas).

Los primeros usos del concreto en túneles se implementaron inicialmente en las obras férreas que construyó el país a finales del siglo antepasado y también en los primeros túneles hidráulicos para conducción de agua potable a comienzos del siglo XX. En aquellos túneles la concepción geomecánica era entendida como la forma de interpretar la distribución espacio-temporal de los esfuerzos o presiones actuantes sobre un túnel, y radicaba en determinar tanto la magnitud como la dirección de los esfuerzos actuantes sobre el contorno de la excavación. Ahora bien, desde el punto de vista de aplicación del concreto como elemento de revestimiento, se suponía que este transmitiría al terreno una presión radial que era capaz de garantizar la estabilidad general de la obra, y también que el terreno no contribuía como tal a dicha estabilidad y por lo tanto se procedía a dimensionar el revestimiento definitivo del túnel como el único elemento estructural de la obra, bien en concreto convencional, mampostería o una combinación de los mismos.

1 Agricola G. (1950) *De Re Metallica*. New York: Dover Publications. 672 pp.



↑ Ferrocarril Ibagué - Armenia (1929). Gran Túnel de Calarcá; túnel en concreto vaciado y mampostería férrea.



↑ Ferrocarril de Caldas. Túnel la Doctora, 1932.

El concreto lanzado, definido por el American Concrete Institute ACI 506 R como un mortero o concreto lanzado neumáticamente a una gran velocidad contra una superficie fue inventado originalmente por el naturalista y

embalsamador estadounidense Carl E. Akeley, en 1907, mediante el empleo de la Cement-Gun Company, con el propósito de recubrir esqueletos metálicos de animales prehistóricos. Posteriormente, al final de la segunda guerra mundial, George Senn, inventaría un equipo conocido como máquina de tornillo, que permitía la proyección por vía seca de concretos con tamaño máximo de agregados de 25 mm, lo que daría origen al concreto lanzado moderno y sus técnicas especializadas para túneles y obras subterráneas.

Finalmente, como antecedente es importante mencionar que el origen y evolución del concreto lanzado aunado a la aparición del Nuevo Método Austriaco de Construcción de Túneles – NATM, cambiarían la concepción geomecánica de estabilidad al interior de los túneles a partir de la segunda mitad del siglo pasado, dado que bajo esa concepción la roca como tal haría parte fundamental de los elementos constitutivos de soporte de la obra subterránea. Esta concepción geomecánica marcaría las pautas y directrices para el diseño y construcción de túneles en el mundo mediante el empleo del concreto lanzado como uno de sus pilares esenciales.

Caso Histórico en Colombia

El Sistema Chingaza como tal se empezó a estudiar en 1966, posteriormente luego de terminar los estudios definitivos, empezó su construcción en 1972, el proyecto contempló la desviación de las hoyas hidrográficas del Río Guatiquia y del Río Chuza hacia Bogotá por gravedad. El proyecto está constituido por un embalse, conducciones superficiales y cerca de 40 Km de túneles, con un suministro a Bogotá cerca de 14 m³/s desde 1984 cuando entró en operación.

Dentro del Sistema Chingaza, se encuentra el Túnel Palacio Ríoblanco con una longitud total de 28,5 Km, 3,70 m de diámetro de excavación y tramos a flujo libre y presión. El diseño del revestimiento de los túneles consistió en la aplicación de concreto lanzado con espesores variables entre 5 y 20 cm según la calidad de la roca, e incluso en algunos lugares se contempló la implementación de revestimiento en concreto convencional de 25 cm. En ese momento, a finales de la década de 1970 el uso del concreto lanzado o *shotcrete* como era conocido en ese momento, hacía diferencia básica entre soporte primario y soporte definitivo; sin embargo, el estado del arte tanto del concreto lanzado como de la ingeniería de túneles, según se evidencio a partir de controversias del Board de consultores del Banco Mundial tales como L. Von Rabcewicz y J. B. Cooke² no hacía diferencia entre el soporte de un túnel como tal y posterior revestimiento, entendiéndose este último como aquel elemento que se instalaba por cualquier método (lanzado o fundido *in*

➔ Túnel Palacio Ríoblanco durante su construcción.



Una vez se inauguró el proyecto en 1984, se presentaron los primeros derrumbes y Bogotá fue sometida al racionamiento. El daño le costó a la ciudad US\$20 millones de la época. A finales de 1985 la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá contrató un nuevo empréstito de US\$220 millones para revestir el túnel. Desde entonces han ocurrido desprendimientos en 1990, 1992, 1993 y 1994 y 1997, lo que obligó a la empresa a emprender un exhaustivo programa de revestimiento en concreto convencional y “recubrir” los revestimientos en concreto lanzado implementados originalmente, actividad aún vigente, decisión que ha permitido al principal sistema de abastecimiento de agua potable de la ciudad reducir su vulnerabilidad.

➔ Primeros derrumbes en el sistema Chingaza, 1997.



² E. Silva Monteil (2017) Comunicación personal Sistema Chingaza.



↑ Después del derrumbe en el sistema Chingaza, se emprendió un exhaustivo programa de revestimiento en concreto convencional; trabajos de emergencia 1997.

El concepto de revestimiento en los túneles viales de carretera

En líneas generales existen actualmente en el mundo dos conceptos acerca del revestimiento para túneles viales de carretera: aquel empleado con mayor frecuencia consiste en suponer que durante el proceso de excavación del túnel, según el tipo de terreno se implementan en mayor o menor grado los diferentes elementos de soporte, tales como el concreto lanzado, bien sea refor-

zado o no, los pernos de acero, los arcos metálicos y la implementación de la solera curva, entre los más importantes, con los cuales se logra la estabilización del macizo rocoso y por lo tanto, el revestimiento a implementar, al menos desde el punto de vista conceptual, no se tendría en cuenta su aporte como presión ejercida sobre el contorno de la obra subterránea y se diseña exclusivamente desde el punto de vista constructivo como aquel espesor mínimo posible de implementarse; la otra concepción, por su parte considera que debe despreciarse el aporte estructural y geomecánico que hacen los elementos de soporte primario y por ende el revestimiento en concreto convencional debe ser diseñado para resistir la totalidad de presiones al interior del macizo rocoso.

El concreto convencional como revestimiento definitivo en los túneles viales de carretera, permite que la geometría de la sección transversal sea uniforme, caso contrario de la obtenida con el revestimiento en concreto lanzado. Es importante mencionar que algunos profesionales y diseñadores, manifiestan que una de las ventajas del concreto lanzado es que este se acomoda a las superficies irregulares del túnel y evitan sobrecostos dado que no se requiere llenar las sobre excavaciones en la sección, lo cual se considera que por el contrario, al dejar sectores con geometría irregular favorece en el tiempo a la inestabilidad del propio túnel y más con las consecuencias asociadas con un incidente y una eventual explosión que se presente durante la operación del túnel.

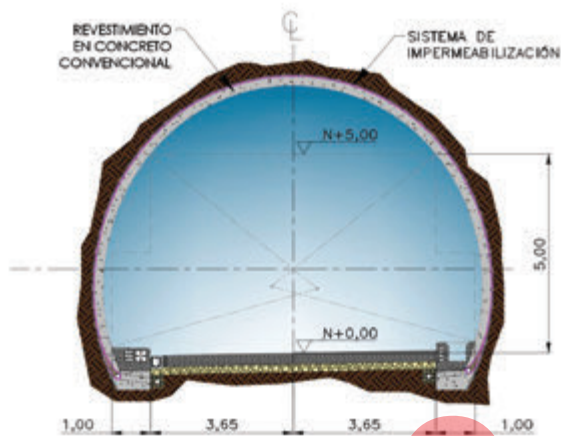
Ahora bien, cuando un túnel es revestido en concreto convencional, previo a su implementación se instala un sistema de impermeabilización que evita que el agua de infiltración llegue a este concreto, lo que mitiga el fenómeno de falta de adherencia, y evita que en el túnel se presenten infiltraciones. Aunque esta práctica se ha utilizado también en túneles con revestimiento en concreto lanzado, y en principio parece una decisión adecuada, tiene como inconveniente, el hecho de que la solución va encaminada a evitar la presencia de infiltraciones al interior del túnel, más no a evitar que el agua llegue



↑ Túnel de la Estrella. Longitud: 315 m.

al concreto lanzado, debido a que la membrana impermeabilizante al ser colocada sobre el concreto lanzado de revestimiento, y sin capas adicionales de concreto, esta queda a la vista y al realizar la inspección del túnel, no permite detectar visualmente fallas en el concreto de revestimiento, que se encuentra detrás de la membrana, como lo son grietas, descascamientos locales etc., con lo cual no pueden ser intervenidas oportunamente, por lo que a priori no es tampoco una solución equiparable

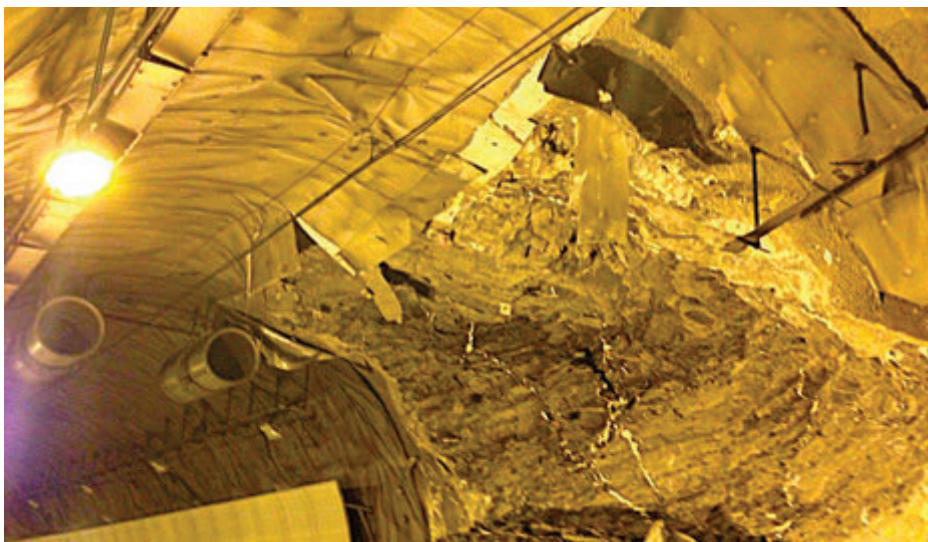
← Geometría de sección transversal de túnel revestido con concreto convencional.



← Geometría de sección transversal de túnel revestido con concreto convencional.



↓ Derrumbe de concreto lanzado de revestimiento y membrana a la vista en túnel Lesarri en la autopista Eibar-Eskoriaza-Mondragón, País Vasco durante operación.



con la ampliamente definida y empleada en el caso del revestimiento en concreto convencional.

Conclusiones

El menor costo de dejar los túneles con revestimiento en concreto lanzado en la realidad es aparente porque más temprano que tarde va requerir mantenimiento, sin tener en cuenta el riesgo y sus posibles consecuencias en cuanto a la seguridad aquí mencionadas, y más aún, al tener en cuenta que este fenómeno se puede presentar transcurridos 5, 15, 25 años o más.

A manera de referencia, entre otros, se presentan casos recientes de túneles viales de carretera en España, que han requerido reparaciones tempranas, posterior a la puesta en operación, y los cuales fueron revestidos en concreto lanzado, donde todas las reparaciones han conllevado no sólo a sobrecostos adicionales, sino también con afectación directa a los usuarios, por la suspensión parcial o total de la operación de la vía, y que a pesar de ser intervenidos, tampoco se garantiza a largo plazo, la no reincidencia de los fenómenos presentados, que además representan probables implicaciones en seguridad:

- Túneles de Solsona. (Lérida). Longitud 700 m. Año de construcción 2004. Reparación del concreto lanzado de revestimiento, refuerzo del mismo con malla electro-soldada y pernos, posteriormente se lanza una capa de concreto lanzado de 15 cm, en toda la longitud del túnel. Tiempo total de reparación: 4 meses de trabajo.
- Túnel de Lesarri (Bergara. País Vasco). Año de construcción 2004. Reparación del concreto lanzado de revestimiento motivado por el agrietamiento del mismo.
- Galería Evacuación del túnel de Somport (Huesca). Reparación del concreto lanzado de revestimiento por desprendimiento del mismo.
- Túnel Ferroviario de Gordenxola (Bilbao). Reparación del concreto lanzado de revestimiento por filtraciones de agua.

Todas estas reparaciones se realizaron entre 6 y 8 años después de la construcción y entrega de los túneles para su puesta en operación. Se considera que Colombia debe adoptar una posición determinante con relación a la impermeabilización y el revestimiento de los túneles, donde este último debe ser primordialmente en concreto convencional, minimizando los efectos negativos durante la operación, con los argumentos validados y las experiencias nacionales e internacionales, donde es inminente la necesidad de impermeabilización y construcción de un revestimiento en concreto convencional, por ser la decisión técnica, económica y en términos de seguridad más favorable para los proyectos y su futura puesta en operación. 

45 AÑOS

COMO NO. 1
EN EL MERCADO

SU EMPRESA NO PUEDE QUEDAR POR FUERA DE LA CONSTRUCCIÓN DEL MEJOR DIRECTORIO



ORDENE YA SU AVISO CON DESCUENTOS DE CIERRE

Llamando al **425 52 01** en Bogotá o a la línea gratuita nacional **01 8000 510 888**



Túnel SILVAPLANA - Suiza

Sika, SU SOCIO ESTRATÉGICO EN OBRAS DE INFRAESTRUCTURA

Aportando tecnología para mejorar la competitividad de las grandes obras en el mundo.