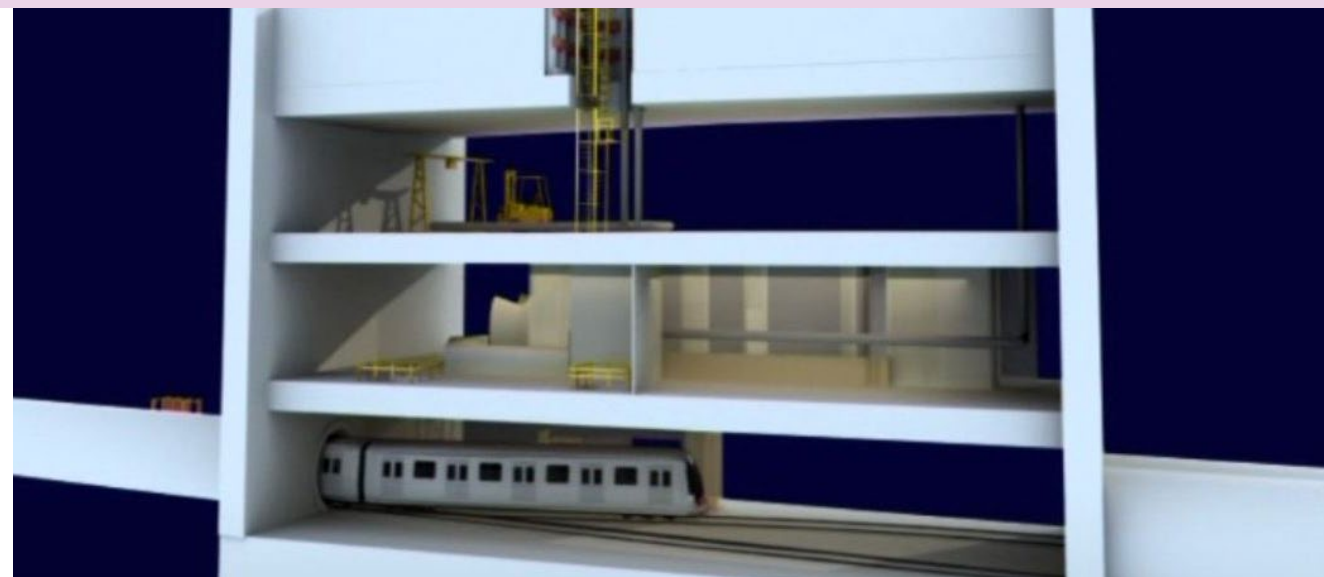


ARTÍCULO TÉCNICO

La innovación en las técnicas de ingeniería para obras subterráneas como impulsora de crecimiento en los mercados emergentes



Dra. Ananya RAJAGOPAL
Profesora Investigadora
Facultad de Economía y Negocios
Universidad Anáhuac

Resumen

Este artículo discute las perspectivas de crecimiento de los mercados emergentes impulsadas por la innovación en las técnicas de construcción de obras subterráneas a través de la revisión de un caso de éxito. Se analiza el uso de una máquina de desmantelamiento de túneles (TDM) para la construcción de la extensión de un túnel de desbordamiento preexistente en la línea West Island (WIL), en Hong Kong. El proyecto consistió en la demolición y rehabilitación de un túnel ferroviario que, después de una nueva alineación, conectara con dicho proyecto. El empleo de la TDM se justificó para minimizar los riesgos de construcción asociados con la geología compleja y el espacio limitado característico del entorno urbano, lo cual se consiguió mediante el retiro controlado del endovelado del túnel y la colocación de un revestimiento temporal mediante la técnica de concreto lanzado. La TDM permite reducir en gran medida la exposición de los trabajadores a las condiciones

hiperbáricas, ya que el aire comprimido se ubica en la cámara de demolición, lo que constituye una importante mejora en las condiciones de seguridad y salud de la obra. Cabe señalar que el concepto del *Tunnel Boring Machine* (TBM) se replica en el TDM para garantizar la estabilidad del frente de excavación del túnel. Con base en lo anterior, se documentan los principales atributos tecnológicos de dicha tecnología y el documento se centra en las iniciativas empresariales impulsadas por la innovación dentro de la industria de la construcción de obras subterráneas.

Palabras Clave: Innovación, *Tunnel Boring Machine*, *Tunnel Dismantling Machine*.



◀ Figura 1. Soluciones integrales para la construcción de un túnel mediante técnica TBM.
Fuente: <https://tunnelingonline.com/deep-thinking-underground-solutions-2/>

Introducción

El desarrollo de técnicas para la construcción de obras subterráneas se ha basado en la necesidad de mejorar la calidad de los proyectos y en optimizar el rendimiento general de estos. En dicho contexto, la innovación es un proceso a través del cual las empresas constructoras se embarcan en la co-creación de productos y servicios para generar valor al cliente e impulsar el desempeño organizacional. Este tipo de comportamiento se ha visto en muchas industrias, pero particularmente en el caso de la construcción de obras subterráneas, se puede observar la integración de los avances tecnológicos en túneles urbanos, robótica de la construcción, modelado de información, materiales para la construcción y gestión de proyectos.

Las empresas motivadas por presentar soluciones innovadoras impulsan tales interacciones con las herramientas y procesos existentes para lograr un desempeño estratégico y posicionamiento en el mercado mediante la integración de mejoras tecnológicas y el compromiso de los empleados. Por ejemplo, VisualLive, una pequeña empresa con sede en los Estados Unidos, se especializa en desarrollar aplicaciones de visualización de modelos del tipo *Building Information Modeling* (BIM) a través de la nube, lo que permite tener acceso inmediato a los atributos de texturas, materiales y diseño de proyectos de construcción. Weston Robot, una empresa emergente con sede en Singapur, desarrolla equipos pesados para obras de construcción, que son autónomos por naturaleza y que se utilizan para el levantamiento de cargas, logística, patrullaje, inspección y desinfección.

Estos ejemplos de empresas constructoras y de diseño basadas en la innovación, en la mejora de la calidad, el rendimiento y el equipamiento pueden considerarse promotoras de las perspectivas de crecimiento impulsadas por la innovación dentro de la industria de la construcción.

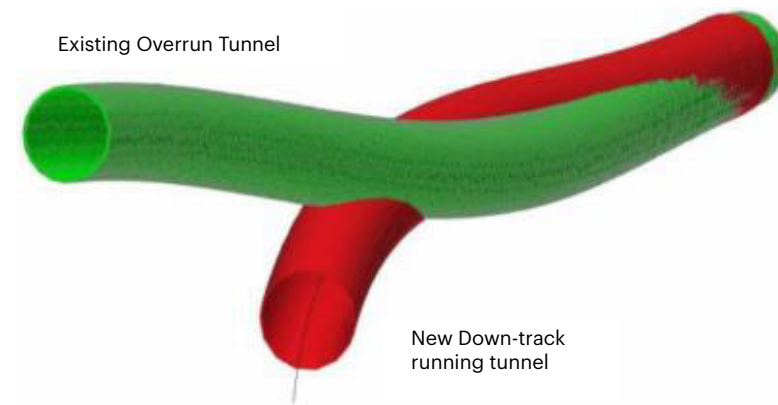
La industria de la construcción, particularmente la dedicada a la construcción de infraestructura subterránea, está en constante revolución y evolución. Desde el siglo XIX, se ha documentado un crecimiento sostenido en la evolución tecnológica que rodea a los métodos de excavación de túneles, desde la perforación y voladura hasta las máquinas tuneladoras. Las herramientas tecnológicas innovadoras, como monitores electrónicos, sensores y equipos de prospección geofísica, ayudan en la ingeniería basada en la precisión para lograr la excavación de terrenos complejos. De este modo, hoy en día la utilización de equipos TBM es fundamental en las técnicas de ingeniería subterránea, sin embargo, la aplicación reciente de máquinas de desmantelamiento de túneles (TDM) ha revolucionado la industria de la construcción. La TDM se considera una solución innovadora para este tipo de proyectos, ya que ayuda al aprovechamiento y rehabilitación de túneles preexistentes. La función principal de la máquina desmanteladora de túneles consiste en hacer uso de un túnel preexistente, al cual se le sustituye su revestimiento original por otro a base de concreto lanzado, lo que permite sumar al tiempo de vida útil de dicha estructura y, en

su caso, otorgarle un nuevo uso. Esto deriva en la generación de ahorros, así como la reducción del tiempo de construcción. Además, el uso de dicha tecnología facilita el diseño eficiente de túneles y la realización de análisis adecuados.

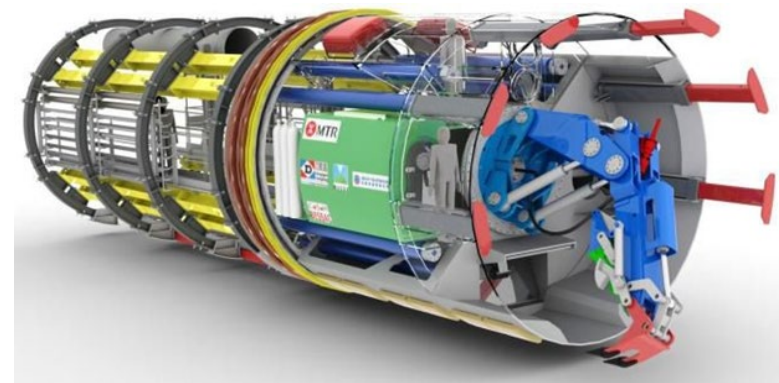
Este artículo se centra en las iniciativas empresariales impulsadas por la innovación entre las pequeñas y medianas empresas dentro de la industria de la construcción de obras subterráneas. El artículo ha destacado varias empresas que surgen para mejorar los procedimientos existentes o para resaltar formas nuevas e innovadoras de realizar las tareas habituales en el ámbito de la construcción subterránea. El caso de estudio que se discute con mayor detalle pertenece a la extensión de la línea de tren West Island en Hong Kong. El caso destaca los desafíos geológicos, los resultados basados en la ingeniería y la complejidad del trabajo, lo que condujo a la implementación de una máquina innovadora que permitió el desmantelamiento de túneles preexistentes y, al mismo tiempo, ayudó a navegar a través de las complejidades estructurales que protegen la densa construcción de viviendas en el entorno urbano.

El caso de la línea MTR West Island en Hong Kong

La construcción basada en la técnica que se empleó para la línea ferroviaria MTR West Island en Hong Kong marcó un hito en la evolución de los métodos de construcción de obras subterráneas. Este proyecto implementó la demolición y rehabilitación de una sección de 132 m de un túnel de desbordamiento preexistente. La construcción de este túnel fue muy compleja, ya que la sustitución y rehabilitación del revestimiento se dio bajo una zona urbana densamente poblada. Asimismo, la geología fue muy compleja. La TDM se eligió como método para la construcción de dicho proyecto con la intención de reducir el riesgo de los trabajadores y optimizar el rendimiento



▲ Figura 2. Esquema de la conexión en el proyecto.
Fuente: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.089>



▲ Figura 3. Máquina Desmanteladora de Túneles (TDM).
Fuente: <https://www.checkerboardhill.com/wp-content/uploads/2021/01/MTR-West-Island-Line-tunnel-dismantling-machine-doi-10.1016/j.proeng.2017.05.089-Fig.-5.-Conceptual-view-of-TDM.jpg>



▲ Figura 4. Línea del proyecto.
Fuente: <https://laprinhx.com/news/extending-the-mtr-using-a-tunnel-dismantling-machine-GNRO21/>

de la construcción. La forma en la que se consiguió fue mediante un ciclo de trabajo que iniciaba con la extracción de cada segmento del revestimiento del túnel original, la colocación de un soporte de revestimiento temporal y, finalmente, el relleno del vacío que se generó durante dicho proceso. Posteriormente, parte del túnel se volvió a excavar con una tuneladora de lodos para formar la conexión entre dos túneles de la línea ferroviaria (Fig. 1).

La extensión de la línea existente MTR West Island (WIL) en Hong Kong se realizó desde la estación Sheung Wan (SHW) hasta la Kennedy Town (KET) a través de las estaciones Sai Ying Pun (SYP) y HKU, lo que agregó aproximadamente 3.3 km de vía férrea. La Figura 2 muestra el diseño general de la máquina de desmantelamiento de túneles (TDM). El túnel de desbordamiento (ORT) era un túnel sin drenaje con un diámetro exterior de 5.8 m y estaba revestido con anillos de dovelas de concreto armado prefabricado o hierro con grafito esferoidal (SGI). Cada anillo de revestimiento de concreto prefabricado tenía 1 m de ancho y 0.25 m de espesor, mientras que cada anillo de revestimiento SGI tenía 1 m de ancho y 0.15 m de espesor. El diámetro interior de la ORT era de 5.3 m en los tramos de revestimiento de concreto prefabricado y de 5.5 m en los tramos de revestimiento de SGI. La sección de 132 m de ORT comprendía 125 anillos de concreto prefabricado y 7 anillos SGI. El ORT tenía una curva en planta con un radio de curvatura mínimo de aproximadamente 600 m y descendía desde SHW hasta Ko Shing Street, con una pendiente del 0.5%. Las condiciones geológicas generales se caracterizaban principalmente por una formación de granito completamente fracturado, cubierto por aluviones y depósitos marinos. La carga máxima de agua subterránea por encima del nivel de excavación del túnel fue de 27 m. El ORT y el nuevo túnel en dirección oeste se ubicaron debajo de áreas urbanas densas con espacios libres limitados por pilotes de cimentación de edificios existentes, siendo el más cercano de alrededor de 400 mm al eje del túnel. Las restricciones anteriores exigieron un proceso constructivo muy preciso e innovador, que fue proporcionado por la TDM.

Antes de demoler el túnel de desbordamiento, el área de trabajo de la máquina de desmantelamiento de túneles se separó de la línea ferroviaria operativa mediante la construcción de un enorme mamparo de concreto. Se cementó la superficie que rodea al túnel de desbordamiento y se sellaron las juntas para minimizar la entrada de agua y cualquier tipo de fuga. La Figura 3 muestra el brazo de demolición que se utilizó para llevar a cabo varias funciones dentro de la cámara de demolición. La constitución mecánica de este brazo se basó en un martillo hidráulico retráctil, garras de agarre para trasladar las dovelas de su posición original a la traba de material, una placa rascadora para la limpieza de la solera, una lanzadora de concreto y un dispositivo para el control del espesor del

material. La capacidad de TDM para operar radialmente en 360 grados ayudó al brazo de demolición, que constaba de dos módulos articulados en una torreta horizontal. El diseño de este brazo de demolición sofisticado y resistente con muchas piezas móviles presentó enormes desafíos de ingeniería, lo que llevó al diseño de sistemas de protección robustos para el brazo sin interferir con su funcionalidad y movilidad (Figura 3).

El TDM estaba equipado con esclusas para dos hombres y una esclusa de material, que permitía comprimir y descomprimir a los trabajadores sometidos a intervenciones hiperbáricas en la cámara de demolición. Las duraciones de la compresión antes del trabajo hiperbárico, y la descompresión después de los trabajos hiperbáricos, se determinaron de acuerdo con las tablas de descompresión del proyecto aprobadas por el Departamento de Trabajo de Hong Kong para el trabajo con aire comprimido. El bloqueo de material permitió la transferencia de segmentos demolidos y escombros al aire libre para su eliminación. El anillo que se estaba demoliendo se apoyó temporalmente en una corona compuesta por seis brazos telescópicos que sostenían la mitad superior del anillo en su lugar para evitar una dislocación incontrolada una vez que se retiraba la llave. La parte superior del escudo frontal se equipó con placas telescópicas de protección de la corona para proteger a los trabajadores de la caída de material. Por lo tanto, se mantuvo el acceso seguro al brazo de demolición para reparaciones mecánicas y para limpiar la boquilla de rociado después de la proyección de concreto. Los escudos de TDM incluían el escudo frontal, el escudo central y el escudo trasero. Los escudos tenían un diámetro exterior de 5.1 m y una longitud total en sentido longitudinal de aproximadamente 6.8 m. Los escudos protegían los componentes de la TDM, contenían el aire comprimido y proporcionaban articulaciones (entre los escudos delantero y central y entre los escudos central y trasero) para atender la curvatura de ORT. En general, el desmantelamiento del túnel se completó de manera segura y a tiempo.

Conclusiones

Existe una necesidad constante de desarrollar infraestructura subterránea impulsada por la urbanización y el aumento de la presión demográfica en las ciudades modernas. La invención de las máquinas tuneladoras condujo a un crecimiento lento, pero constante, en la integración de la robótica, la automatización, el uso de técnicas de inteligencia artificial y el análisis de datos eficiente, impulsado por la innovación, lo que ha permitido un proceso de excavación más rápido y estable que cada vez es más seguro para los trabajadores y también más amigable con el medio ambiente. La mirada hacia el futuro en la construcción de obras subterráneas no se limita a los ejemplos y casos discutidos en este artículo, sino que las estrategias de innovación disruptiva incluyen el uso de nuevos dispositivos como drones, máquinas operadas con inteligencia artificial y robots semiautónomos para mejorar las técnicas ya existentes. En este punto, cabe destacar una cita del arquitecto francés Dominique Perrault, quien indicó que el valor creado por una construcción subterránea se consigue cuando el concepto de un espacio húmedo, oscuro e inhóspito, característico del imaginario colectivo para este tipo de estructuras, se convierte en otro de nuevas e ingeniosas posibilidades en beneficio de los usuarios. De este modo, la posibilidad de incrementar los desarrollos

urbanísticos sin afectar la densidad de población per cápita, plantea un enorme potencial que puede ser explorado en un futuro próximo.

El futuro de la construcción de túneles se puede apreciar en países asiáticos como China, Japón, Malasia, entre otros, donde la innovación no solo está ayudando, sino optimizando las necesidades de las ciudades en constante crecimiento. La asociación público-privada (financiamiento público en proyectos privados de construcción subterránea) conduciría a una reducción significativa en los costos que derivaría en el desarrollo de una red mejorada de infraestructura subterránea. Los factores clave que afectan un aumento en la demanda de proyectos de construcción subterránea incluyen mejoras tecnológicas, reducción en los costos generales y una mayor conciencia, que lleva a la aceptación social.

Referencias

- <https://www.startup-insights.com/innovators-guide/top-10-construction-industry-trends-innovations-in-2021/>
- P.L. Ng, T.N.D.R. Barrett, G. Roux, S. Polycarpe, M. Gonzalez, (2017). Development of Tunnel Dismantling Machine (TDM) in an Underground Railway Project. *Procedia Engineering*, 189, 560-568. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.089>.
- <https://www.floorature.com/dominique-perrault-exhibition-groundscape-experience-aedes-a-13530/>
- <https://www.britannica.com/technology/tunnel/Future-trends-in-underground-construction>



Somos una empresa mexicana, especializada en análisis y diseño de obras subterráneas y túneles.

NUESTROS SERVICIOS:

- Análisis y diseño de Túneles y Obras Subterráneas.
- Laboratorio de Mecánica de Suelos.
- Suministro e Instalación de Instrumentación Geotécnica
- Análisis y Diseño Geotécnico; Modelado Numérico.
- Servicios de Ingeniería Geotécnica aplicada a la Minería.
- Perito Profesional Certificado en Túneles y Obras Subterráneas por el CICM.
- Inspección y exploración de espacios confinados con Dron.



REPRESENTANTES TÉCNICOS COMERCIALES EXCLUSIVOS PARA MÉXICO

55 77 87 07 55

contacto@tidesa.mx

@tidesa0

www.tidesa.mx

Sucursal: TIDESA COLOMBIA S.A.S.