



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Programa de Posgrado en Ingeniería.

Facultad de Ingeniería.

**Control de procesos para la excavación
de suelos blandos típicos del valle de
México mediante el empleo de una TBM
de tipo EPB**

TESIS

Que para optar por el grado de:

Maestro en Ingeniería (Construcción).

Presenta:

Ing. Felix Octavio Segura Meneses

Director de Tesis:

Dr. José Anselmo Pérez Reyes

Programa de Maestría y Doctorado en Ingeniería

Ciudad Universitaria, Ciudad de México, marzo del 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente:

Secretario:

Vocal:

Primer suplente:

Segundo suplente:

Lugar en donde se realizó la tesis:

Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, Ciudad de México

Director de tesis

Dr. José Anselmo Pérez Reyes

“Control de procesos para la excavación de suelos blandos típicos del valle de México mediante el empleo de una TBM de tipo EPB”

Ing. Félix Octavio Segura Meneses

Maestría en Ingeniería Civil Construcción y Obras Subterráneas

Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

Agradecimientos:

A mi madre, que con su apoyo y dedicación me ha incitado a seguir buscando esas oportunidades de superación a medida que los tiempos se van tornando de una manera mas compleja, así como tambien la exigencia que cada día es mayor a partir de las necesidades que se deben cubrir para encontrar una estabilidad emocional y, a su vez, tener las bases del conocimiento que nos da la oportunidad de ofrontar los diversos problemas sociales que demandan de la opinion para encontrar las soluciones a los mismos.

A mi esposa e hijos, quienes tienen un papel importante en mi vida para alcanzar y concluir las metas que me he forjado, ya que ellos son el motor que determinan cada una de las actividades que he iniciado, y en muchas ocasiones me han dado la oportunidad de ser escuchado, así como también me brindan esas palabras de aliento para continuar con lo que he iniciado y no darme por vencido tan facilmente.

A mi asesor y tutor, quien con su esfuerzo y dedicación me ha dado la oportunidad de realizar un trabajo adecuado para poder obtener el grado. Gracias a sus comentarios, palabras de motivación y enseñanza me ha orientado, haciendo que pueda alcanzar la motivación para poder lograr el objetivo trazado en estas actividades.

Contenido

INTRODUCCIÓN	07
Resumen	07
Abstract	08
Planteamiento del problema	09
Objetivo general	10
Objetivo específico	10
Antecedentes.....	11
CAPÍTULO 1.- Caracterización geológica del valle de México	12
1.1.- Caracterización geotécnica del valle de México.....	13
1.2.- Geohidrología del valle de México.	15
CAPÍTULO 2.- Tipos de máquinas tuneladoras (Tunnel Boring Machine - TBM)	18
2.1.- Historia de fabricación de las máquinas tuneladoras (TBM).	18
2.2.- Máquinas convencionales para roca dura.....	22
2.3.- Hidroescudos (Slurry).....	25
2.4.- Escudos de presión de tierras (EPB).....	26
CAPÍTULO 3.- Control de procesos de excavación	29
3.1.- Introducción.....	29
3.2.- Parámetros clave.....	30
3.3.- Modos de operación.....	33
3.4.- Ciclo de trabajo.	34
3.5.- Incorporación del sistema de auscultación.....	37
3.6.- Ventajas en el empleo del control de procesos de TBM-EPB.	40
CAPÍTULO 4.- Instrumentación geotécnica y estructural	42
4.1.- Introducción.....	42
4.2.- Objetivo del sistema de auscultación.	42
4.3.- Instrumentación geotécnica.....	43
4.4.- Instrumentación estructural.	52
CAPÍTULO 5.- Control de procesos de excavación en suelos blandos	54

5.1.- Características de los suelos blandos.	54
5.2.- Parámetros clave considerados en la excavación de suelos blandos.	58
5.3.- Descripción de la máquina (EPB).....	65
5.4.- Control y proceso de ejecución de las etapas de construcción.	67
5.5.- Medidas de mitigación de deformaciones.	71
CAPÍTULO 6.- Manejo contractual	75
6.1.- Objetivo.	75
6.2.- Ejecución y cumplimiento de los requisitos de contrato (desarrollo de contrato).	76
6.3.- Solución de controversias mediante elementos legales.	78
CAPÍTULO 7.- Caso de estudio: excavación mecanizada en suelos blandos y sus repercusiones al sistema de sellos del faldón	81
7.1.- Reporte tipo de control de procesos para la excavación de suelos blandos.	83
7.2.- Implicaciones de los parámetros clave.....	91
7.3.- Conclusiones y recomendaciones.	96
Recomendaciones.-	98
Conclusiones.-	100
Bibliografía.-	101

INTRODUCCIÓN

RESUMEN

La presente tesis parte de la revisión de las prácticas actuales en la excavación de suelos blandos para, después de ello, proponer las mejores alternativas de excavación y su control de procesos ocupando recientes experiencias a nivel internacional, lo que reditúa en una oferta de opciones técnicas que desembocan en una mejor operación y, consecuentemente, en mejores rendimientos. Para lograrlo, se hace uso de la descripción de actividades que se realizan en el desarrollo de los proyectos de construcción de túneles mediante el empleo de máquinas tuneladoras de tipo EPB. A su vez, dentro de una visión integral de los aspectos que influyen en el éxito de este tipo de proyectos, se identifican las herramientas legales y contractuales que optimizan la resolución de controversias con la intención de evitar un impacto negativo en el desarrollo del proyecto en cuanto a su tiempo y costo.

Para conseguir un control de procesos adecuado en la excavación de suelos blandos es necesario conocer con detalle la forma de trabajo y operación de los escudos de tipo EPB. Se busca, entonces, mostrar los parámetros esenciales para lograrlo y demostrar que su uso permite incluso un retro-análisis en donde se lleva a cabo la evaluación de los datos recabados con las causas positivas y negativas del proceso de excavación. Esto puede permitir la simulación mediante métodos numéricos que conceden un mejor entendimiento de los fenómenos asociados al tipo de frentes que se abordan en el trabajo -suelos blandos-.

ABSTRACT

The following thesis is a revision of the most current practices for soft soil excavation and their control processes on an international level. This research will provide information about improved techniques that will lead to better operations and subsequently improved outcomes. To achieve this a detailed description of the operational processes of tunnel construction is provided, with a focus on the use of tunnel boring machines such as Earth Pressure Balance (EPB). In addition to this, an analysis of the aspects that influence the success of these projects is also provided in which legal and contractual tools were found to optimize the resolution of negative and controversial influences on the development of such projects, their time and cost.

To achieve proper understanding of tunnel excavation on soft soil surfaces, knowledge on the mechanism of action of the various types of shields used on EPB is needed. The intention is to identify the necessary parameters of achieving such projects and furthermore, providing a retro analysis of evaluation of data that includes positive and negative consequences of the excavation process. This will allow for the simulation of numerical data needed to better understand the phenomena associated with soft soil projects.

Planteamiento del problema

La excavación en suelos blandos presenta una serie de retos que deben ser considerados por la ingeniería con el fin de realizar las obras con los procedimientos adecuados que garanticen la vida útil de las estructuras de desarrollo. Esto obliga a tener mayores conocimientos para la solución de los problemas que están relacionados con la construcción de este tipo de obras subterráneas. Las experiencias obtenidas en el medio han brindado la oportunidad de conocer el comportamiento de los suelos blandos a medida que el espacio subterráneo es ocupado.

La excavación en este material –inevitablemente- trae consigo posibles hundimientos del terreno en superficie. Estos desplazamientos verticales se incrementan a medida que los suelos son más compresibles y menos resistentes, además, será más notorio si el sostenimiento empleado es más deformable y si la cobertura del túnel es menor. Otro punto que también es de suma importancia y que no puede pasar desapercibido -ya que es uno de los temas que causa mayor impacto en la construcción de túneles- es la presencia de agua en el frente de excavación. Si se permite el flujo de este líquido hacia el túnel, éste puede provocar efectos negativos y de gran impacto, ya que quizá se traduzca en un incremento en las fuerzas actuantes circundantes a la excavación, además de que el material presenta una pérdida en su rigidez, posiblemente provocando una falla que trae consigo consecuencias que se manifiestan en subsidencias del terreno mayores a las consideradas.

La sobre-excavación como efecto del funcionamiento de la máquina tuneladora puede llegar a ser un tema relevante. Debido a que, dependiendo de la geometría de la máquina, la holgura puede ser favorable para que el terreno pueda ocasionar un efecto negativo de atasco, lo que se traduce en una limitante de avance y en un tiempo que se debe aplicar para realizar las actividades de rescate de la maquinaria.

La experiencia adquirida con base en los diferentes procesos de construcción de túneles dio como origen la mejora constante en el desarrollo de técnicas que

ofreciera mayores rendimientos para obtener mejores resultados. Además, con ello, poder crear la infraestructura subterránea que proporcionará el servicio que demanda la sociedad y la seguridad que ésta necesita para salvaguardar la integridad física de los usuarios. Es por ello que el empleo de técnicas mecanizadas no se dejó esperar para cubrir y satisfacer las necesidades de la población -sin olvidar el cuidado del medio ambiente-.

El empleo de las tuneladoras de tipo EPB -que por sus siglas en inglés significa: Earth Pressure Balance, y una interpretación al idioma español pudiera ser: escudo de presión de tierras- da como resultado una serie de procedimientos que deben ser analizados para poder llevar a cabo las obras que ameritan estas actividades de construcción de túneles en suelos blandos. Cabe mencionar que lo antes descrito puede ser mitigado mediante la implementación del control de procesos, ya que al ser aplicada de manera adecuada la interpretación de los datos en combinación con la información disponible que ha sido trabajada en proyectos anteriores, es posible representar el desarrollo de la máquina tuneladora y su relación directa de interacción con el suelo.

Objetivo general

En función de las mejores prácticas reconocidas y la elaboración de una propuesta que integra las principales opciones técnicas y contractuales, se proporciona una recomendación que se debe entender como la más adecuada para este tipo de proyectos.

Objetivo específico

1. Analizar los parámetros geotécnicos y geológicos del proyecto que permitan un previo conocimiento a posibles situaciones de falla que se puedan presentar en los suelos blandos.
2. Conocer los parámetros clave de la máquina tuneladora EPB y definir los esenciales para las condiciones geotécnicas descritas.
3. En función del conocimiento de los conflictos legales y contractuales más comunes en este tipo de proyectos, determinar las alternativas de resolución de controversias más apropiadas.

Antecedentes

Es importante mencionar que en los procesos de construcción de las obras subterráneas -hasta hace algunos años atrás- el problema era abordado mediante el empleo de todo lo que se tenía al alcance, con la finalidad de solucionar las situaciones adversas que se enfrentaban en el desarrollo de las actividades correspondientes con las etapas de ejecución de la obra. Las prácticas empleadas como inicio y arranque de la construcción de túneles trajeron consigo el tema de la industrialización en las obras subterráneas, dando así origen a las nuevas técnicas aplicables en las tareas de ejecución de obra, mediante las cuales se pudo concretar el ciclo que favoreció a la construcción de estos trabajos de infraestructura.

El ciclo clásico que definió los procesos de construcción de túneles -y que a su vez hicieron más adecuadas las etapas de ejecución- está compuesto por el proceso de excavación, retiro de la rezaga, colocación de soporte temporal e instalación de soporte definitivo. Aquí estas prácticas son ejecutadas mediante tareas que en un punto determinado de la construcción se vuelven repetitivas, lo que trajo como consecuencia que dichas tareas fuesen susceptibles de realizar de manera mecanizada, es decir, que con el empleo de maquinaria y equipo pudiesen desarrollarse de manera rápida y segura.

Con el paso de los años y con el desarrollo de las nuevas tecnologías, se aprovecharon de tal manera que fue posible realizar los procedimientos de construcción de forma segura y con tiempos menores en el desarrollo de las etapas de ejecución. Además de que fue el momento clave que ofreció la oportunidad de hacer uso de máquinas que pudieran efectuar los procesos de manera más rápida y segura. Dichas máquinas recibieron el nombre de escudos, los cuales tienen la capacidad de poder excavar, transportar el material producto llamado rezaga y colocar el sostenimiento adecuado mediante el empleo de dovelas, las cuales garantizan la seguridad en los trabajos realizados al interior del túnel.

CAPÍTULO 1.- Caracterización geológica del valle de México

Es importante considerar que la zona metropolitana del valle de México está altamente poblada -se alberga el 20 % de la población del país-. Es por ello, que en su crecimiento acelerado y sin control, se ha presentado una serie de complicaciones que ha demandado sin medida el desarrollo de las actividades y el crecimiento masivo de la población. Es decir, el incremento desproporcionado de los servicios públicos ocasiona la atención casi inmediata por cubrir estas necesidades y, por ende, sus efectos se han hecho notar a medida que se satisfacen. Sin embargo, el surgimiento de los problemas geológicos ha encendido los focos rojos para que los servicios puedan ofrecerse siempre y cuando éstos no traigan efectos secundarios altamente severos.

Cabe mencionar que la zona metropolitana de la Ciudad de México está situada en un valle cerrado, el cual presenta una altura sobre el nivel del mar mayor a los 2000 metros, en donde se presenta la mayor densidad de población de la república mexicana. Al ser la ciudad más concurrida, presenta un gran número de necesidades sociales que deben ser cubiertas con la finalidad de brindar una calidad de vida adecuada para los habitantes que se encuentran en esta zona geográfica.

De acuerdo con los estudios realizados por Mazari y Mackay (1993), se definió o estableció tres zonas fisiográficas que caracterizaron a la zona del valle de México: la zona lacustre, de transición y montañosa. Esto dio la posibilidad de conocer que el origen del subsuelo de la Ciudad de México pertenece a una secuencia de deformaciones de rocas que tuvieron influencia en la era geológica correspondiente al cretácico, con una cubierta realizada por depósitos volcánicos como lavas, tobas, ignimbritas y brechas -que son de una composición intermedia máfica-.

Estos sucesos que acontecieron dando origen a las rocas y que además están asociados a eventos volcánicos, tienen presencia de sedimentos clásticos de cierta granulometría considerada como variada que rellenaron las depresiones que surgieron

en la era geológica del pleistoceno. Este evento trajo consigo situaciones comprometedoras como el taponamiento al drenaje natural al sur del valle de México, produciendo una formación lacustre.

Adicionalmente, el origen de los depósitos y las rocas presentes en este valle que no son consolidadas, pueden llegar a clasificarse en tres unidades principales que caracterizan al suelo: rocas y sedimentos consolidados -que son muy permeables y que permiten el libre tránsito o flujo del agua-; rocas consolidadas -que suelen ser muy poco permeables, pero que la conductividad hidráulica sí provoca arrastre de partículas-; y por último, se presentan los depósitos lacustres -no consolidados de muy baja permeabilidad-. Estas características se lograron identificar de acuerdo a los estudios realizados por Vázquez y Jaimes (1989), Mooser y Molina (1993) y DGCOH (1994), quienes, de acuerdo a su experiencia, lograron establecer lo antes mencionado.

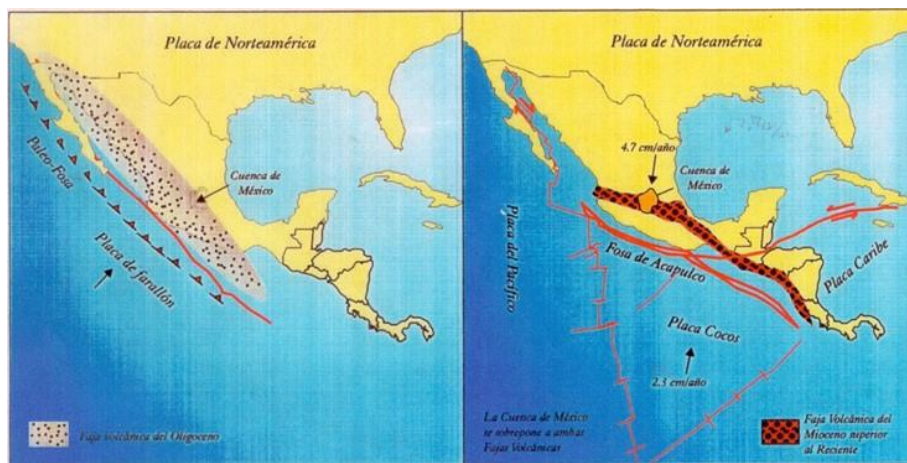


Figura 1.- Placas Farallón y Cocos (“revisión y evaluación en geotecnia y estructuras” para “resolver la problemática del transporte aéreo en el centro del país” convenio de colaboración no. asa-unam-13-002 primer informe parcial, avance de los estudios específicos).

1.1.- Caracterización geotécnica del valle de México

De acuerdo al reglamento de construcción para la Ciudad de México en el artículo 170 del Capítulo VIII del Título Sexto del Reglamento, esta ciudad se divide en tres zonas con las siguientes características generales:

a) Zona I. Lomas, formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona es frecuente la presencia de oquedades en rocas, de cavernas y túneles excavados en suelos para explotar minas de arena y de rellenos artificiales no controlados (Reglamento de construcción para la Ciudad de México, 2004, p.29).

b) Zona II. Transición, en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 metros de profundidad o menos, y que está constituida –predominantemente- por estratos arenosos y limo arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre; el espesor de éstas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros (Reglamento de construcción para la Ciudad de México, 2004, p.29).

c) Zona III. Lacustre, integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son en general medianamente compactas a muy compactas y de espesor variable de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales, materiales desecados y rellenos artificiales; el espesor de este conjunto puede ser superior a 50 metros (Reglamento de construcción para la Ciudad de México, 2004, p.29).

En la figura 2 se muestran las porciones de esta misma ciudad cuyo subsuelo se conoce aproximadamente en cuanto a la zonificación anterior. La investigación del subsuelo del sitio mediante exploración de campo y pruebas de laboratorio se apoyará en el conocimiento geológico e histórico general y local que se tenga de la zona de interés y deberá ser suficiente para definir de manera confiable los parámetros de diseño de la cimentación y la variación de los mismos en la zona en estudio. Además, deberá permitir obtener información suficiente sobre los aspectos siguientes:

- 1) En la zona I se averiguará si existen en ubicaciones de interés materiales sueltos superficiales, grietas, oquedades naturales o galerías de minas y, en caso afirmativo, se obtendrá la información requerida para su apropiado tratamiento (Gaceta oficial de la Ciudad de México, 2017, p.15).

2) En las zonas II y III se averiguará la historia de carga del predio y la existencia de cimentaciones antiguas, restos arqueológicos, rellenos superficiales antiguos o recientes, variaciones fuertes de estratigrafía, suelos inestables o colapsables, o cualquier otro factor que pueda originar asentamientos diferenciales de importancia, de modo que todo ello pueda tomarse en cuenta en el diseño. Asimismo, en estas zonas se deberá investigar la existencia de grietas en el terreno, principalmente en las áreas de transición abrupta entre las zonas I y III, tal como se pueden apreciar en la figura 2. En la zona II la exploración del subsuelo se planeará tomando en cuenta que suele haber irregularidades en el contacto entre las diversas formaciones, así como mantos de agua colgada y variaciones importantes en el espesor de los suelos compresibles (Gaceta oficial de la Ciudad de México, 2017, p.15).

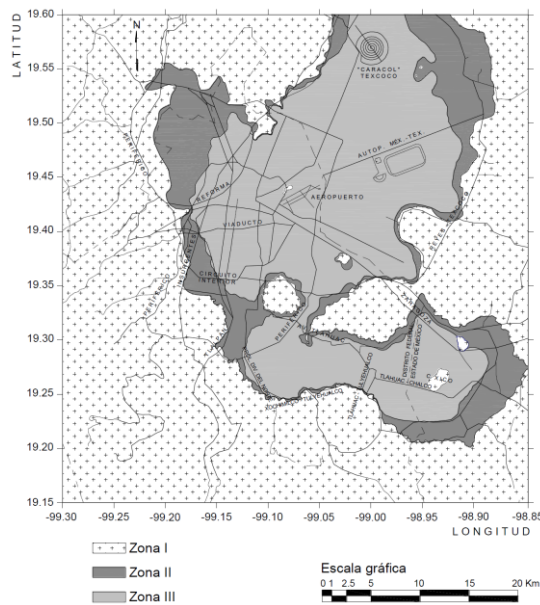


Figura 2.- Zonificación Geotécnica, De gaceta oficial de la Ciudad de México, (p.14), Normas técnicas complementarias para la revisión de la seguridad estructural de las edificaciones, (NTC-RSEE), 2017.

1.2.- Geohidrología del valle de México

El valle de México geográficamente está delimitado entre montañas. He ahí el origen de la cuenca del valle de México, que es una cuenca endorreica, es decir, se caracteriza por no poseer ninguna salida -ni a otra cuenca, mucho menos al mar-. Esta zona -como se comentó anteriormente- ha sufrido diversos cambios geológicos que han originado formaciones diferentes, por ejemplo, la cuenca se encuentra circundada por montañas y, a su vez, está cubierta en diferentes puntos por áreas lacustres, o sea, son zonas de lagos que remontan su aparición desde la época glacial de acuerdo a los estudios realizados por la CONAGUA.

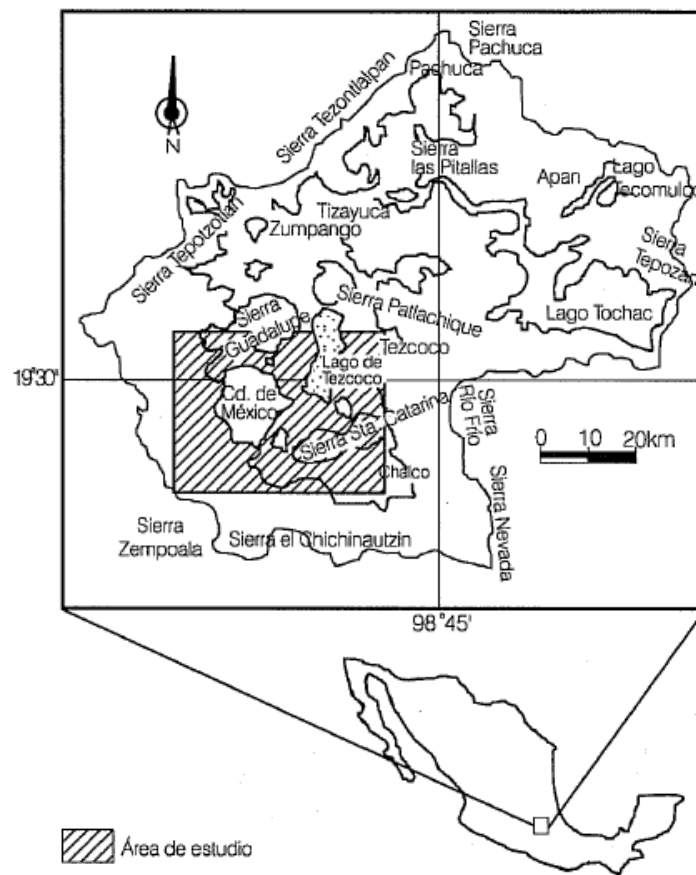


Figura 3.- Ubicación geográfica de la cuenca del valle de México, los datos son de modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el valle de México, por Antonio Cardona y Noel Hernández, ingeniería hidráulica en México.

La cuenca del valle de México está formada principalmente por un conjunto de lagos que dieron origen a esta zona. Entre ellos se puede mencionar -hacia el centro-

el lago de México; muy cercano, pero en dirección hacia el este se encuentra ubicado el lago de Texcoco; en dirección hacia el sur están el lago de Xochimilco y el de Chalco -que originalmente dieron lugar a un solo lago-; y, por último, en la zona norte, se encuentra ubicada la laguna de Zumpango.

De acuerdo a los diferentes estudios realizados -con el fin de definir su ubicación y localización geográfica- resultó que la cuenca del valle de México se encuentra dentro de 13 alcaldías de la Ciudad de México y siete municipios del Estado de México, los cuales se mencionan a continuación:

Tabla 1.- Municipios de ubicación y localización geográfica de la cuenca del valle de México en la Ciudad de México

Estado	Alcaldía
Ciudad de México	Coyoacán
	Tlalpan
	Xochimilco
	Álvaro Obregón
	Benito Juárez
	Magdalena Contreras
	Azcapotzalco
	Cuajimalpa de Morelos
	Cuauhtémoc
	Gustavo A. Madero
	Iztacalco
	Miguel Hidalgo
	Venustiano Carranza

Tabla 2.- Municipios de ubicación y localización geográfica de la cuenca del valle de México en el Estado de México

Estado	Municipio
México	Atizapán de Zaragoza

	Huixquilucan
	Jilotzingo
	Lerma
	Naucalpan de Juárez
	Tlalnepantla de Baz
	Xonacatlán

El valle de México presenta una fisiografía que posee diversas características. Forma parte del denominado Eje Neovolcánico o Faja Volcánica Transmexicana, misma que se alarga en dirección este-oeste atravesando la república (Manuel Álvarez Jr, 1958). Por otro lado, el suelo de la cuenca del valle de México está constituido principalmente por intercalaciones de productos volcánicos de los cuales se pueden identificar lavas, tobas y cenizas, que a su vez incluyen materiales con una granulometría mayor que fueron transportados por ríos y arroyos que surgieron en las zonas altas y que circulaban hacia el valle. Además, derivado de las corrientes de estos cuerpos de agua, dichos materiales que dieron origen a esta zona fueron cubiertos por arcillas y arenas finas de diferentes espesores, que en origen son el producto del sedimento de los antiguos lagos.

CAPÍTULO 2.- Tipos de máquinas tuneladoras (Tunnel Boring Machine-TBM)

2.1.- Historia de fabricación de las máquinas tuneladoras (TBM)

Las máquinas tuneladoras -o también conocidas por sus siglas en inglés como TBM (Tunnel Boring Machine)- son equipos integrales que permiten realizar las actividades de excavación, retiro de material producto de la excavación y la colocación de un sostenimiento para desarrollar las diversas acciones que conlleva la etapa de construcción de obra -como en el caso de los túneles-, siendo éstos el tipo de infraestructura que permite adaptarse a las necesidades actuales de comunicación y de optimización de espacios que demanda la sociedad. Esto coloca a la ingeniería en tomar nuevas técnicas de construcción que den oportunidad de ejecutar las etapas de

manera segura y con el menor tiempo posible. He ahí el punto en que las tuneladoras juegan un papel importante, ya que debido a la demanda por satisfacer las necesidades sociales, la construcción de túneles más largos y en condiciones adversas, las TBM presentan un rol de mayor interés. Los primeros vestigios del desarrollo de esta tecnología datan desde el año de 1825 -fecha en la que se considera el comienzo de la construcción de túneles-, misma que se le atribuye a Marc Brunel, quien desarrolló un túnel bajo el río Támesis. Con el objetivo de lograr el cruce de dicho obstáculo en un suelo blando y con presencia de agua, se vio en la necesidad de implementar un sistema que permitiera el sostenimiento del terreno y, a su vez, la protección del personal que desarrollaría las actividades de los trabajos durante las etapas de excavación y revestimiento. Además de que la excavación de dicho túnel se llevaría a cabo a sección completa, rompiendo con el criterio de los métodos convencionales de construir primeramente un túnel piloto que después permitiría el ensancharlo hasta llegar a la sección deseada. Asimismo, para poder alcanzar el objetivo ideó un sistema de control y exclusión de la presencia de agua en los trabajos. La solución a estos requerimientos la pudo alcanzar mediante la idea de construir una máquina que permitiera el cumplimiento de estos aspectos. Aquí surge la idea innovadora de emplear un escudo. Marc Lamberth Brunel, por sus ideas revolucionarias, es considerado el padre que dio origen al primer escudo empleado para las actividades de construcción de túneles en el año 1818.

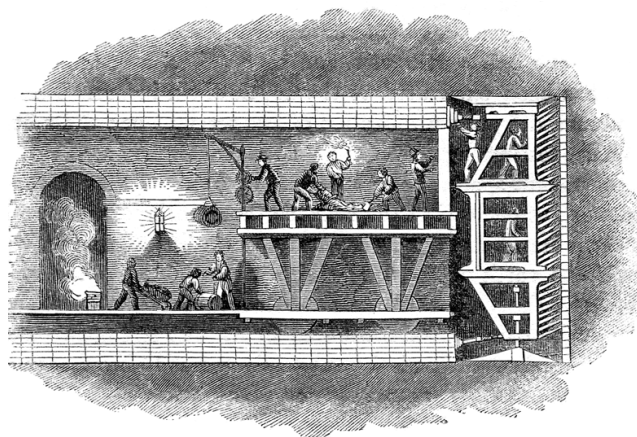


Figura 4.- Esquema del escudo de Marc Lamberth Brunel 1818, Adaptado de excavación de túneles en frentes mixtos mediante tuneladora tipo EPB, (p. 2), por Alberto González Pascual, tesis, Ciudad de México.

En la imagen se observa que dicho escudo estaba compuesto por gabinetes y mamparas que permitían realizar la excavación parcial correspondiente. Con esto, surge la idea de implementar las máquinas excavadoras con escudo que se emplean en los trabajos de excavación a sección completa en cualquier tipo de material que se caracteriza en el espacio subterráneo -con los diferentes aspectos mecanizados dentro de un cilindro-, el cual permite almacenar y proteger de las malas condiciones del terreno y de situaciones adversas -como son los posibles desprendimientos que ponen en riesgo de atasco a la máquina-. A su vez, dan la oportunidad de colocar un soporte inmediato y la instalación del revestimiento definitivo desde el interior del escudo.

Con la implementación de esta herramienta se dio la oportunidad de considerar otras formas que permitieran la realización de las actividades de excavación. Es decir, se alcanzó un desarrollo oportuno de la tecnología con la que se dio paso al empleo de aire comprimido como elemento de estabilización del frente. Sin embargo, éste no fue del todo eficiente, ya que se escapaba entre el escudo y el terreno, lo que no permitía alcanzar el objetivo de estabilizar el frente de trabajo, puesto que no se lograba mantener una presión constante dentro de la cámara de excavación, así como otros problemas que eran graves para el personal -hasta el extremo de provocar enfermedades severas-, además de causar boquetes en superficie.

Con las limitaciones que se encontraron a través del uso del aire comprimido, se dieron a la tarea de buscar la solución a estos temas. La respuesta llegó en el momento en que se empezó a utilizar el lodo. Este es un elemento que se conocía con anterioridad en la realización de perforaciones petroleras o, bien, en la excavación para el desplante de muros y pilas que eran coladas in-situ. Con la idea de poder realizar los trabajos de excavación en suelos que se pensaron en algún momento que eran inexcavables, surge la noción de utilizar arcilla bentónica y agua a presión. A través de esta mezcla se logró estabilizar el frente de excavación.

Con el uso de este método se originó una nueva tecnología que pudo brindar mayor seguridad para el desarrollo de estas actividades, ya que con ello dieron paso a los escudos especiales, nombrándolo como escudo de lodo presurizado. Este método llegó a revolucionar las condiciones de excavación, puesto que con el uso del escudo de lodo presurizado el terreno pudo ser excavado mediante el empleo de una

herramienta de corte rotatorio, misma que fue equipada mediante un número de ranuras con compuertas, las cuales podían ser accionadas con el fin de permitir que el material excavado pudiese ingresar a la cámara en donde se encuentra el lodo. Dicha cámara está compuesta por una mampara completamente sellada para evitar el escape del lodo. En este método la circulación del lodo es dada mediante un sistema de bombas que permite proporcionar una velocidad variable para poder efectuar el proceso de suministro y descarga del lodo, además de tener bombas impulsoras (booster) intermedias, válvulas que ayudan a controlar el flujo del lodo, un control de presión del mismo y una planta de tratamiento que es instalada en la superficie para que el flujo de lodo sea constante. Asimismo, incluye un tablero el cual es de suma importancia debido a que con él se mantiene un control más eficiente en el frente del túnel y en la misma circulación del lodo bentónico.

Este método llegó a representar un gran avance en la tecnología desarrollada en las máquinas tuneladoras, ya que hasta cierto punto tuvo una serie de ventajas al realizar las actividades con el empleo de estos escudos. Algunos de estos beneficios que el método de lodo presurizado ofrece pueden ser los siguientes:

1. Se omitió el uso de aire comprimido y se evitaron los riesgos que éste conllevaba.
2. Cuando se emplea este método, el frente de excavación no requiere de algún tratamiento distinto para mejorar sus condiciones mecánicas, de lo contrario, basta y sobra con el simple uso de la mezcla del mismo lodo.
3. Referente a las condiciones de trabajo y el aspecto ambiental al interior y en la superficie del túnel, este método logra tener una mayor oxigenación, brinda una disminución considerable de ruido, existe menos polvo en los trabajos, las vibraciones son menores, entre otros aspectos.
4. Con relación al nivel freático, éste no requiere ser abatido mediante el uso de este método, salvo en casos muy especiales. Por ende, se considera que las afectaciones a pozos son mínimos, sumando que gracias a ello se reduce el problema de asentamientos y afectaciones a estructuras adyacentes a la obra.
5. Este método hace posible que las actividades de excavación en la obra del túnel se desarrollen de la manera más adecuada.

6. Este proceso brinda una mayor seguridad en las etapas de ejecución, es decir, ofrece la estabilidad que se busca y, por ende, trae consigo la garantía de que los trabajos realizados sean más seguros al interior del túnel.
7. Por otro lado, las lumbreras no requieren ser muy grandes para el manejo de retiro de rezaga, ya que la extracción de la misma se realiza mediante el proceso de bombeo.
8. Se considera que con este método se obtiene un ahorro en cuestión de mano de obra.

Tras las ventajas mencionadas, se cree que, con el descubrimiento de la utilización del lodo como una forma de estabilizar el frente de excavación en las obras de los túneles, trajo consigo grandes beneficios que inmediatamente se vieron reflejados. Es por ello que este método es símbolo de garantía para el desarrollo de las etapas de construcción en los materiales incompetentes -como son los suelos blandos encontrados en el subsuelo-.

2.2.- Máquinas convencionales para roca dura

Las máquinas empleadas para la excavación en roca son un tanto diferentes en comparación con las máquinas de suelos o de frentes mixtos. En la cabeza de corte -que es la parte frontal de la TBM- presenta herramientas de corte exclusivo para roca. Dichos componentes son llamados discos cortadores. La función de estos elementos de corte es fragmentar la roca mediante un desgaste de la misma, con la finalidad de tener la configuración granulométrica adecuada llamada "chips" que permita ser captada en las ventanas de la cabeza de corte para ser transportado como material de rezaga.

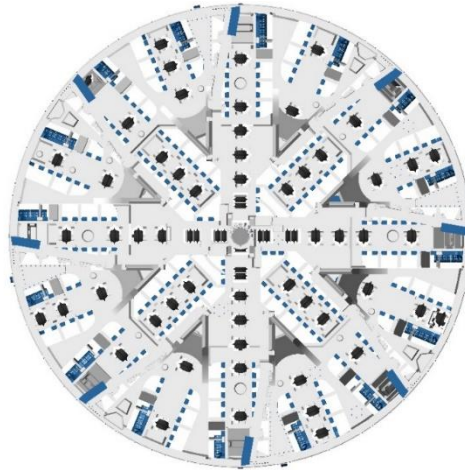


Figura 5.- Cabeza de corte con discos para excavación en roca, adaptado de presentaciones Ing. Roberto González Izquierdo, AMITOS Moldequipo Internacional, S.A. de C.V., notas de clase.

Estas máquinas también son conocidas como “Topos” y están diseñadas para excavar en rocas competentes, es decir, que tienen una capacidad para auto-soportarse. Cuando estas rocas se están excavando y no se coloca inmediatamente un soporte, ya sea de dovelas, marcos metálicos o algún otro, este material no colapsará. Estas máquinas se caracterizan por tener un buen desempeño y rendimientos adecuados en materiales de roca homogénea y sana. Además, se distinguen por no contar con un escudo cilíndrico protector, pero sí poseen una pequeña sección que protege la parte superior y que tiene forma de peine, el cual cumple con una función primordial -salvaguardar la integridad física de los trabajadores involucrados en las actividades- de los posibles fragmentos que representen un riesgo para generar una inestabilidad del material y dando con ello paso a producir un efecto negativo que puede provocar un colapso del túnel.

El mecanismo de avance de estas máquinas Topos consiste en el apoyo de dos o más zapatas denominadas grippers, que son de ayuda lateral y las cuales se acuñan en el terreno con el objetivo de tener un apoyo que permita generar un impulso a la máquina hacia el frente de excavación. Los grippers son elementos de la tuneladora los cuales están conectados mediante cilindros telescópicos o gatos hidráulicos de empuje. Cuando los cilindros telescópicos conectados a los grippers están retraídos,

una zapata de soporte debajo de la parte frontal de la TBM se extiende para cargar la tuneladora, pero al excavar, los grippers laterales se extienden y éstos son los que sostienen a la máquina y no a la zapata de soporte bajo del cabezal. Dichos cilindros se extienden y permiten a la rueda de corte dar el avance en el frente de excavación, es decir, a la carrera de estos cilindros concluida es el avance que tiene la máquina en cada ciclo de excavación.

Los principales elementos de los Topos son:

- Cabeza
- Grippers
- Cilindros de empuje
- Back-up
- Guiado

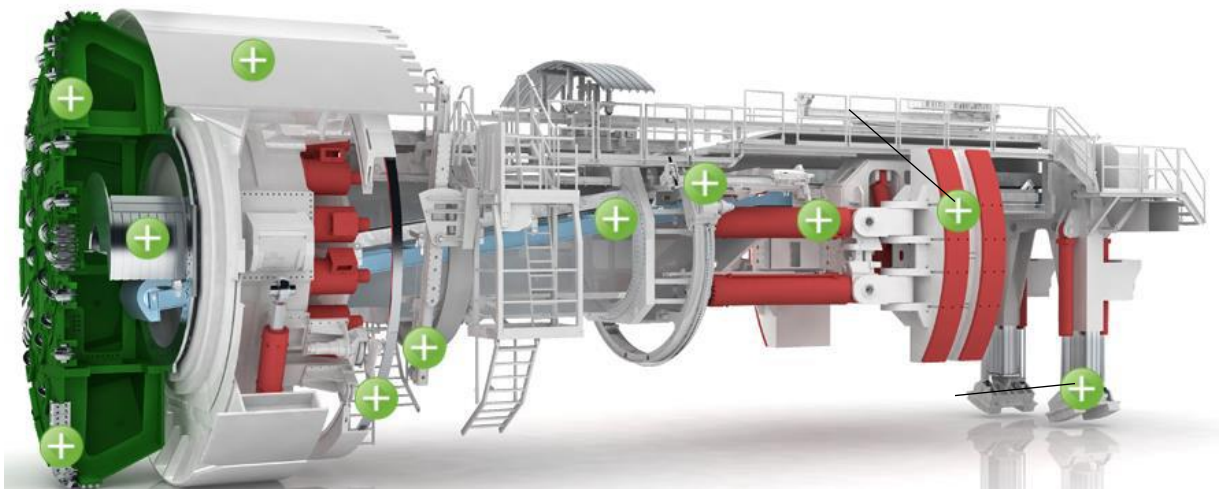


Figura 6.- Zapatas de soporte y grippers de TBM tipo Topo. Recuperado de www.herrenknecht.com.

Las zapatas son elementos de soporte de la máquina; mientras que los grippers son elementos de apoyo lateral que permiten a la máquina tener un empuje mediante gatos hidráulicos que tienen la capacidad de extenderse o retraerse para apoyarse en el terreno lateral que ya fue excavado.

2.3.- Hidroescudos (Slurry)



Figura 7.- Hidroescudo, adaptado de presentaciones Ing. Roberto González Izquierdo, AMITOS Moldequipo Internacional, S.A. de C.V., notas de clase.

Es importante hacer notar que el desarrollo de los escudos para la excavación de túneles es un claro ejemplo de la gran audacia, tenacidad e ingeniosidad para realizar la tarea de llevar las actividades del hombre más allá de lo antes pensado. Un modelo de ello son las máquinas tuneladoras de tipo EPB y Slurry -que por su evolución técnica y tecnológica- son consideradas las más adecuadas para la excavación de túneles en suelos blandos. Las tuneladoras tipo Slurry o hidroescudos son aquellas que requieren o utilizan lodos como bentonita para poder conseguir la estabilización del frente de ataque. Adicional de que estas máquinas cuando emplean la inyección en el frente de excavación, el lodo bentónico además de estabilizar el frente de trabajo, ayudan a conseguir el transporte mediante el bombeo del material producto de la excavación, en otras palabras, son máquinas que facilitan el trabajo en terrenos que presentan materiales difíciles, los cuales están constituidos principalmente por arenas y gravas u otros materiales que suelen ser blandos y fracturados.

Los hidroescudos tienen como función crear un amasado del material para que éste pueda ser extraído. Tienen una similitud a los escudos de tierras por su desempeño en suelo blandos, aunque presentan algunas diferencias con respecto a los EPB. Los escudos Slurry consiguen la presión en la cámara del frente de

excavación mediante la mezcla del terreno excavado con la preparación de un lodo que consta de agua y arcilla (Slurry), y con ello obtienen un excelente control de la presión en el frente a un coste energético mucho menor, además de que la extracción del material se realiza mediante la colocación de una tubería en la que se puede bombear la mezcla hacia el exterior -lo que representa un manejo más práctico comparado con las bandas transportadoras-. Aunque estas máquinas presentan una desventaja: el tratamiento del material extraído -al ser una mezcla con lodos- requiere y exige la colocación de plantas que ocupan grandes espacios en superficie para que la separación de las partículas finas de la mezcla de lodo se pueda conseguir.

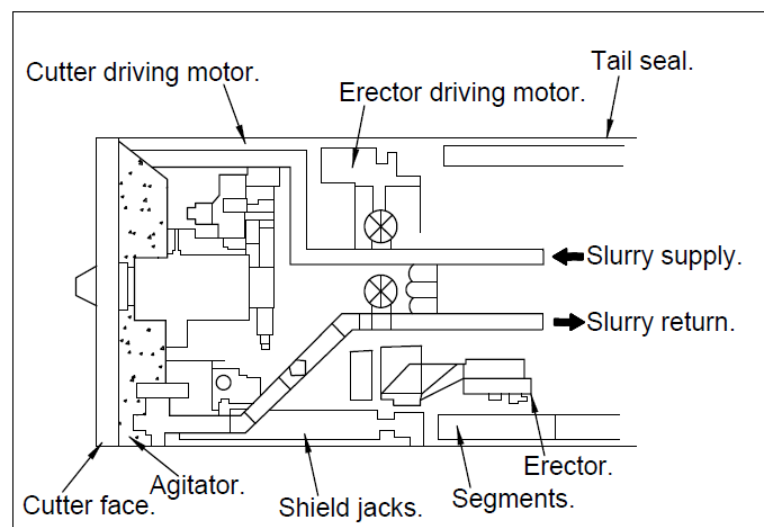


Figura 8.- Esquema de un hidroescudo. (Mair y Taylor, 1997).

2.4.- Escudos de presión de tierras (EPB)

El constante crecimiento y desarrollo de la ingeniería de túneles que se presenta en nuestros tiempos se distingue mediante los avances logrados en la tecnología de la maquinaria empleada para estos trabajos y los sistemas en la excavación de este tipo de obras. He aquí la importancia del sistema mecanizado de las TBM de tipo EPB desarrollado con la última tecnología, el cual tienen la peculiaridad de contar con la herramienta que permite la excavación total del frente. Los escudos EPB han logrado excavar en zonas donde antes se creía imposibles de hacerlo -debido a las características tan complejas de los suelos-. Esta herramienta es considerada

como la solución a los problemas presentes en este tipo de materiales. Las TBM de tipo EPB son la mejor opción para ser empleadas en la excavación de suelos blandos, ya que por su versatilidad permiten ser consideradas como la mejor herramienta, brindando la oportunidad de avanzar en zonas en donde los suelos blandos han tenido mayor presencia. Esta es la propuesta del presente documento.

Los escudos de presión de tierras son altamente empleados en frentes de excavación que presentan una inestabilidad. Es decir, estos escudos por lo general abarcan una amplia gama de terrenos que no son estables. Además, estas máquinas se recomiendan para terrenos cohesivos, ya que tienen un elevado rendimiento de extracción, un buen funcionamiento y un extremo cuidado con el medio ambiente. Los escudos de presión de tierras emplean el material excavado como medio de sostenimiento del frente, y este material es extraído mediante un tornillo sin fin o helicoidal que a su vez deposita este material en una banda transportadora que permite extraer la rezaga hacia la parte superficial para depositarlo en una fosa en donde se almacena el material temporalmente.

Estas máquinas se encuentran envueltas por un cilindro metálico el cual ayuda a realizar los trabajos de manera segura y permite el sostenimiento del terreno tras ser excavado. Adicional de que mediante un erector de dovelas se cumple con la función en su interior de colocar el sostenimiento primario (un anillo de dovelas de concreto) sin que se dé ninguna interferencia en su mecanismo de avance. En el frente existe una cámara de excavación la cual se mantiene bajo cierta presión en donde se permite amasar el material excavado, se mezcla dependiendo de las características del material, lo cual puede lograrse mediante el empleo de un agente espumante, polímeros o suspensiones arcillosas que a su vez permiten la extracción del mismo mediante un tornillo de Arquímedes estanco. La presión del frente se logra mediante el control de la entrada y salida en la cámara del material que está siendo excavado y con la regulación de la rotación del tornillo y la velocidad de avance. Un punto importante a destacar es la forma cónica de la máquina, y es que la rueda de corte es mayor al faldón de la máquina; igualmente el faldón presenta un diámetro exterior mayor al del anillo de dovelas lo que constituye que para ser llenado esta oquedad de unos 15-20 cm se requiere de una mezcla de mortero que debe ser colocada

rápidamente para que se eviten las subsidencias en superficie, y asimismo prever consecuencias que el escudo quede atrapado por el desprendimiento del material circundante a la excavación. Otro punto importante que se debe mencionar es que el mortero por ningún motivo debe entrar en la zona del escudo, ya que esto también puede ocasionar que éste se quede atrapado. Para evitar este efecto negativo se dispone de juntas de grasa colocadas en la zona de la cola, además de tener tres filas de cepillo de acero entre las que se inyecta grasa consistente para conseguir la estanqueidad.

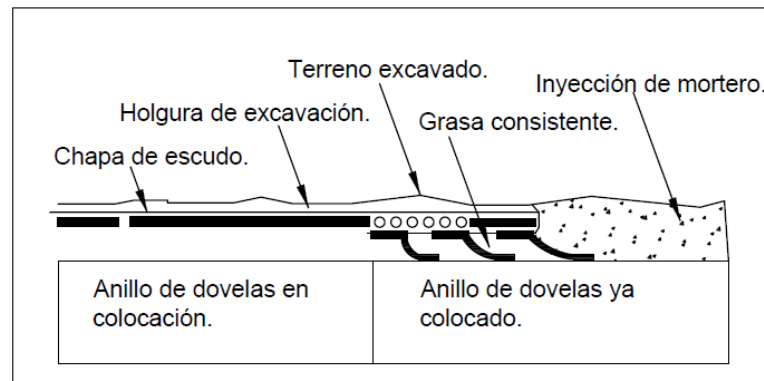


Figura 9.- Detalle de la junta de grasa para la estanqueidad del escudo (Geocontrol, 2001).

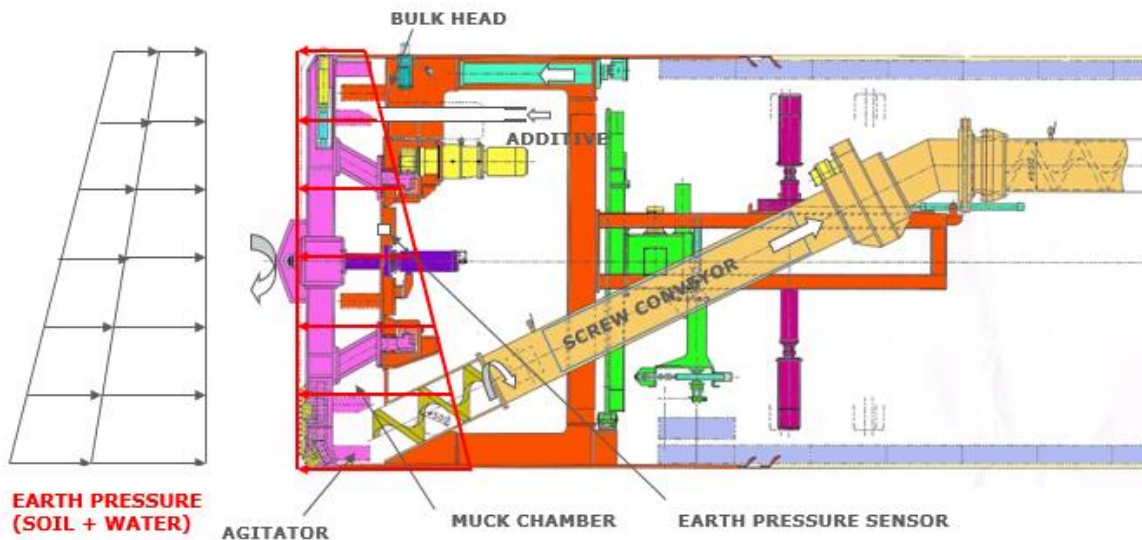


Figura 10.- Descripción de escudo EPB, adaptado de presentaciones Ing. Roberto González Izquierdo, AMITOS Moldequipo Internacional, S.A. de C.V., notas de clase.

3.- CAPÍTULO 3.- Control de procesos de excavación

3.1.- Introducción

Las máquinas tuneladoras -a través de los años y a medida de la experiencia adquirida en cada una de las obras desarrolladas, para así satisfacer las diversas demandas de la población- han mejorado su tecnología con el fin de desarrollar las actividades de excavación de manera más segura y eficiente. Por ejemplo, dicha tecnología se ha reflejado en la capacidad de datos que pueden registrar y almacenar durante su mecanismo de operación (hasta 600 parámetros operacionales en un tiempo transcurrido de 10 a 60 segundos en máquinas tuneladoras de gran diámetro).

Estos parámetros almacenados que se obtienen del funcionamiento en la mayoría de los proyectos, han ayudado a tener una documentación valiosa para el retro análisis después de experimentar los casos en donde los procesos se han desarrollado de manera adecuada y con éxito; también en donde las actividades por diversos factores han experimentado la ocurrencia de fallos. Gracias a ello, la importancia de que dicha información nos brinda la oportunidad de mejorar cada uno de los procesos desarrollados en el método mecanizado. Además de que con esta información disponible se alcanza el máximo provecho a los datos almacenados en las máquinas tuneladoras. Esta información se debe analizar de manera simultánea con el proceso de excavación.

Comulada Simpson M. (2009) sostiene que para alcanzar el mayor provecho y un eficiente control de los procesos de excavación desarrollados con máquinas tuneladoras, es necesario evaluar y analizar el proceso, y así también identificar y comprender los parámetros clave y la interacción con el suelo. Cabe destacar que la eficiencia se alcanzará a medida que los tiempos de control de estos procesos sean los mínimos posibles en relación entre el registro de los datos del proceso constructivo, el análisis de éstos y la toma de decisiones se acerque lo mayormente posible al tiempo real. Estos tiempos se han podido llevar a cabo en algunos proyectos de excavación de túneles con tuneladora, sin embargo, aún no se ha hecho un hábito para ser aplicado en todos los proyectos de esta índole. Dentro de todas estas actividades, también es importante mencionar que los equipos de cómputo son una

herramienta fundamental para poder alcanzar estos objetivos planteados, ya que el uso de un software adecuado permite llevar acabo de manera más efectiva el registro de cada uno de estos parámetros de operación.

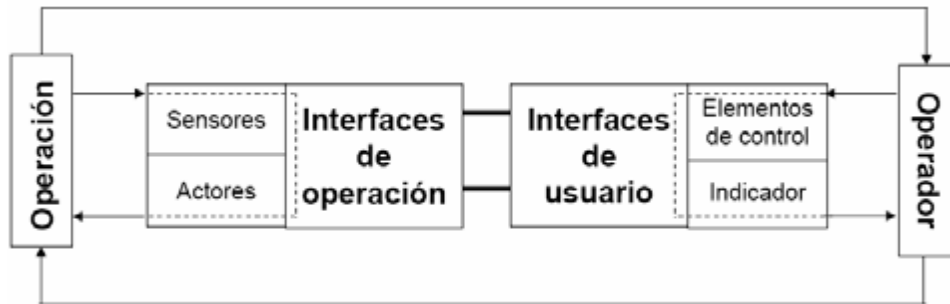


Figura 11.- Esquema de un modelo de interfaz de usuario, Control de procesos y gestión de datos para la excavación de túneles con tuneladora, Comulada Simpson M.

3.2.- Parámetros clave

En el desarrollo de las grandes obras de infraestructura como son los túneles - que tienen como objetivo satisfacer las necesidades de la sociedad-, así como el poder librar los obstáculos que se interponen en algunos casos para la conexión de dos puntos, es necesario tener un monitoreo en los principales parámetros que ayudan a lograr la ejecución de las etapas de construcción de manera apropiada para conseguir los objetivos planteados, ya que con la identificación de estas etapas críticas durante el proceso de construcción, se logra optimizar los tiempos y disminuir el impacto en el costo de la obra.

El proceso de excavación actual que se desarrolla en los túneles mediante el empleo de las máquinas tuneladoras -también conocidas como TBM-, cuando se considera que el tipo de tuneladora utilizada es una TBM de tipo EPB, se debe considerar que parte de un principio fundamental, el cual se enfoca en lograr o mantener un equilibrio en la presión que existe en el terreno excavado y la presión que ejerce la máquina, lo que conlleva a minimizar la posibilidad de sufrir ciertas alteraciones al terreno circundante. Es importante mencionar que el seguimiento, control y monitoreo del proceso de excavación se realizan mediante el empleo de un

software capaz de permitir la visualización en tiempo real de los parámetros de excavación, y con ello detectar el surgimiento de los posibles errores que pudiesen afectar la estabilidad del túnel. Dichos parámetros son alimentados mediante el empleo de información que se ocupa en el control de procesos, tal como se indica en la figura 12.

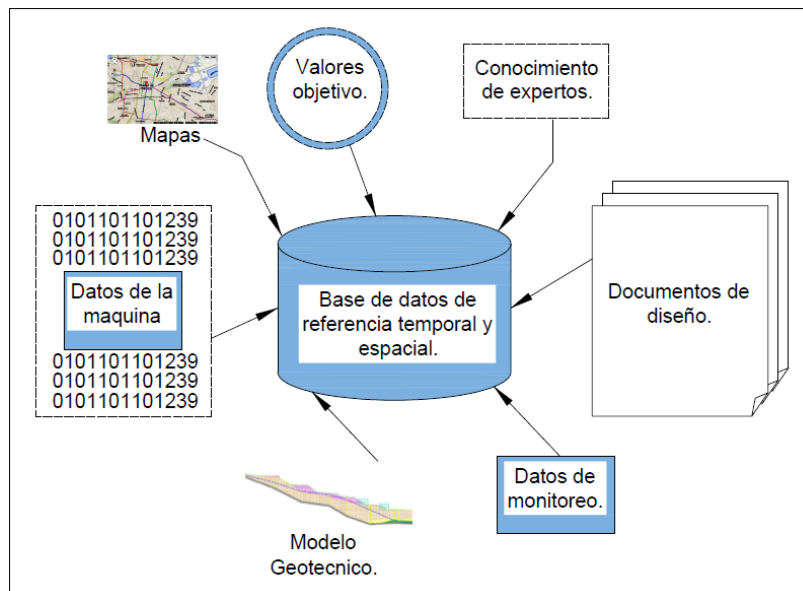


Figura 12.- Tipos de información empleada en el control de procesos para túneles mecanizados. Ulrich Maidl and Janosch Stascheit, Cloud-based computational process controlling in mechanised tunnelling, July 20 - 25, 2014, Barcelona, España.

Cabe mencionar que para poder llevar un control en el plan de avance o del proceso de excavación de la máquina, se requiere de conocer y definir los valores que serán tomados como referencia de los parámetros fundamentales que son ocupados para la operación de la TBM de tipo EPB. Para ello se deben establecer los siguientes parámetros principales a nivel teórico:

Tabla 3. Parámetros clave en el control de procesos

Parámetros de control	Descripción
Peso del material extraído	Se deben realizar los cálculos correspondientes a las características geotécnicas que definen al terreno en cuestión; el agua presente en el mismo y los posibles

	aditivos que pudiesen ser empleados para facilitar los trabajos de excavación.
Presión del frente	Se determina una presión teórica, la cual es afectada directamente por la suma de la presión hidrostática más la presión de la tierra en el frente, considerando que esto pudiese variar debido a la presencia o no de edificios e infraestructuras próximas que serán cruzadas en su parte inferior.
Volumen teórico de mortero	Es calculado mediante el análisis del volumen teórico del GAP, el cual se calcula tomando en cuenta el diámetro de excavación de la máquina tuneladora y el diámetro exterior del anillo.
Presión de inyección	Es el valor de referencia que puede ser establecido con respecto a la experiencia de 0.5 a 1 bar por encima de la presión de tierras en la parte superior de la cámara.
Velocidad de avance	Es la velocidad angular de la rueda de corte, es decir, es la velocidad de giro.
Penetración	Se calcula como el cociente de la velocidad de avance entre la velocidad angular de la rueda de corte; y las unidades son en milímetros por revolución.
Torque	Es en función de la rueda de corte y el contacto con el terreno, es un parámetro respuesta, esto es, qué tanto trabajo le cuesta a la máquina girar en las condiciones de terreno; se mide en KN/m.
Fuerza de empuje en KN	Es la fuerza que ejerce los gatos de la máquina hacia el escudo de la misma con la intención de avance.
Fuerza transmitida a la cabeza de corte	Es la fuerza que se transmite exclusivamente a la cabeza de corte descontando la fuerza requerida para el arrastre del equipo de la máquina.

Presión de los sellos de la máquina (cepillos)	Es el sello para evitar el ingreso al frente de excavación presión de grasa mayor a la presión hidrostática y al mortero.
Presión de sellos de la transmisión principal	Es la verificación que la presión de sellos sea mayor a 1 bar, mayor que la presión del frente.

3.3.- Modos de operación

A medida en que las necesidades de la sociedad y de la ingeniería han incrementado el desarrollo tecnológico de las máquinas tuneladoras de tipo EPB, se han conseguido mayores capacidades y mejores rendimientos de excavación, lo que ha resultado en el desarrollo de máquinas tuneladoras capaces de alcanzar mayores distancias; así como también realizar trabajos de excavación de tal forma que las actividades se pudiesen desarrollar de manera simultánea, es decir, sin la necesidad de parar ninguna de sus etapas. Con ello, se consiguieron tres ideas básicas que fueron consideradas para poder ejecutar el trabajo continuo -siendo un parteaguas para el funcionamiento de estas máquinas-. Puesto que todo surge a razón del planteamiento de dichas ideas, las cuales integraron el mayor número de ventajas posibles para lograr un sistema completo de operación y funcionamiento:

- Estabilizar el frente con un material a presión que, si bien es cierto, es el propio material excavado convertido con productos de adición en una mezcla que presenta características visco-plásticas.
- Lograr que dicha mezcla tenga la consistencia adecuada para ser transportada por cintas y vagones que sirven como elementos de acarreo.
- Además de lograr que esa mezcla que ha sido preparada en el frente de excavación pueda extraerse sin tener que perder la presión en el frente de trabajo para que con ello se pueda dar la continuidad del proceso.

Con lo anterior, se originó la idea de acondicionar una máquina que consiguiera alternar las formas de trabajo, de tal manera que fueran las más adecuadas para alcanzar y satisfacer las necesidades de los proyectos que surgen por medio de las

demandas sociales. Para lo que el rendimiento de un escudo abierto en el que el trabajo de extracción de la rezaga se hace por medio de una cinta transportadora - sobre la cual se vierten los cangilones de la rueda de corte de la máquina-, es superior a la extracción por tornillo helicoidal, lo cual, al ser considerados, llevó a dar origen a los escudos EPB -llamados de tipo dual-, que permitieran trabajar de tal forma que se adaptara a las condiciones del terreno en alguno de los modos siguientes:

- En “modo abierto” (frente “sin presurizar”) para trabajar en los tramos de terreno competente, con extracción por cinta desde el interior de la cabeza.
- En “modo cerrado” (frente “en presión de tierra”) para trabajar en los tramos de terrenos inestables, con extracción por tornillo helicoidal desde el interior de la cabeza.

Con ello se tuvo como resultado una máquina completa que se puede adaptar a las exigencias del terreno. Es decir, la TBM está equipada con una cabeza de corte que lleva en su cara frontal las herramientas necesarias de corte como discos y picas, además de las toberas de los productos de adición, y en el interior de la cámara de presión contiene los dispositivos de homogeneización y acondicionamiento del terreno, producto de la excavación para su extracción adecuada. Conjuntamente que dentro de la cámara de presión contiene también captosres para el control de la presión del material excavado, o sea, son celdas de presión. Con ello se interpreta que las máquinas tuneladoras de tipo EPB son consideradas las más adecuadas para poder trabajar en las diversas formaciones geológicas.

3.4.- Ciclo de trabajo

Es de gran ayuda conocer la metodología que se apega al control de procesos, con el fin de poder medir y corregir las posibles alteraciones que pudiesen presentarse en la ejecución de cada una de las etapas de construcción. Por ello, el entendimiento integrado de los procesos clave de la tuneladora brindan la oportunidad de conocer la interacción que se presenta entre el suelo-tuneladora, la cual es información valiosa que debe registrarse, comprenderse y evaluarse constantemente durante el proceso

de construcción de la obra del túnel. Además de conocer el modo de trabajo de las diversas máquinas empleadas en la excavación de túneles, también es necesario considerar las fuerzas que el terreno por excavar emitirá hacia el escudo. Es por ello que el equilibrio de fuerzas para llevar a cabo el avance y, a su vez, mantener la estabilidad en el frente son los dos puntos importantes para conseguir un eficiente control de procesos.

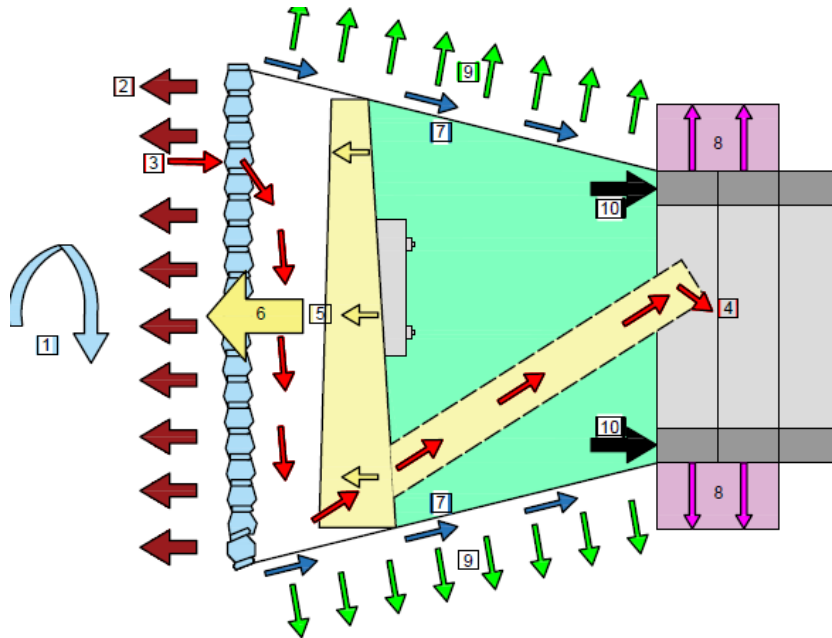


Figura 13.- Esquema de fuerzas e interacciones durante la excavación con tuneladora, Adaptado de Comulada 2009.

Los procesos de excavación en el método mecanizado dan inicio en el frente de trabajo en donde se encuentra la rueda de corte (1), misma que penetra y rompe el suelo del frente gracias al empuje que es transmitido a la cabeza (2) desde los cilindros o gatos de empuje de la máquina tuneladora (10). Este proceso forma parte de la primera etapa que tiene como objetivo realizar el corte del suelo de una manera efectiva, con el mínimo desgaste de las herramientas y empleando el mínimo torque (1). Como resultado de este primer proceso, el material que fue excavado debe cumplir con las características de fluidez, con el fin de poder pasar a través de las aberturas de la cabeza de corte (3) -llamados cangilones- hacia la cámara de excavación para que con el uso del tornillo sin fin (4) el material de rezaga pueda ser removido. El material debe cumplir con ciertas características para originar un buen flujo que

garantice un mínimo desgaste de herramientas y adicional se conserve una velocidad de avance constante y elevada.

Si las características presentes del suelo no garantizan una estabilidad del material y lo concierten en un frente de trabajo inestable, será necesario aplicar presión en la cámara de excavación (5), con el fin de contrarrestar las fuerzas y estabilizar el frente. Esto quiere decir que a medida en que la presión del frente en la cámara de excavación (5) sea cada vez mayor, será directamente proporcional al torque de la rueda de corte (1), lo que implica un efecto negativo en las herramientas, ya que debido al crecimiento de estas fuerzas el desgaste de las herramientas será cada vez mayor, generando un impacto negativo con la disminución de la velocidad de avance. La fuerza que resulta de la presión en la cámara (6) reacciona contra el mamparo y debe ser vencida por la fuerza generada por los cilindros de empuje (10). La fuerza resultante de presión en la cámara (6) no solo es dependiente de la presión que se aplica al frente, sino también de la densidad del material producto de la excavación. Lo cual implica que la densidad del material que se almacena en la cámara de excavación (6) debe ser baja, para tener una fuerza mínima de empuje originada por los cilindros (10), así como permitir el adecuado flujo de material a través de la cámara de excavación (3 y 4).

También es importante considerar que la fuerza de fricción (9) es otra que debe ser contrarrestada por la fuerza generada por los cilindros de empuje (10), producto de la interacción entre el suelo y la tuneladora, la cual si se mantiene un adecuado guiado de la máquina y se verifica la ubicación de posición del faldón y el escudo, esta fuerza de fricción (9) se puede minimizar. Considerando que la fricción (9) generada a lo largo del escudo es resultado de las presiones de frente (5) y, a su vez, de la inyección de mortero (8), se puede pensar en que se daría un control en las deformaciones que se generan en el suelo alrededor de la máquina tuneladora -lo que implica una reducción en la fricción (9)-.

Referente a la inyección de mortero (8), no solo cumple con el objetivo de controlar la deformación del suelo, sino que también suministra al túnel el confinamiento que se requiere para trabajar como anillo. Es decir, el espacio anular, o también nombrado GAP, debe ser rellenado rápidamente con una mezcla de cemento

conocido como mortero, para que éste cumpla con la función de evitar el colapso del suelo sobre el túnel recién construido reduciendo las subsidencias en la superficie, ya que a medida que avanza la máquina tuneladora, el espacio generado entre el contorno exterior de la chapa del escudo y la superficie exterior de las dovelas tienden a cerrarse. Es necesario evitar estos movimientos del terreno rellenando el espacio anular con la mezcla de cemento, en donde ésta queda confinada por medio de unos cepillos con grasa, los cuales evitan el retorno a la cabeza de corte y permiten mantener confinado al material del terreno circunferencialmente, lo que tiene como resultado la disminución de las deformaciones en el interior del túnel y en el área superficial.

“La inyección directa de mortero a través de la cola del escudo conduce a un soporte inmediato del perfil de la excavación y el propio segmento de revestimiento” (Barbendererde S. et al., 2004). Dicho de otro modo, la inyección del mortero en la parte trasera de la tuneladora se realiza simultáneamente al avance de la excavación y lo más constante en el tiempo posible, manteniendo una presión firme pre-definida, que por regla general suele ser desde 0.5 a 1 bar por encima de la presión en el frente de excavación. Asimismo, es de suma importancia mantener el control sobre el volumen de mortero inyectado para garantizar el relleno óptimo del GAP, lo que significa que un relleno correcto de dicho espacio anular evita deformaciones en la superficie de la obra y en el interior del túnel.

Con base a lo antes descrito, se puede tener una idea de la importancia en la relación entre los procesos clave de la excavación con tuneladora y su interacción con las características presentes en el suelo. Es por ello que, para desarrollar un control de procesos eficiente, se debe comprender y tener un amplio conocimiento de la mayoría de los procesos clave y su relación existente en cada una de las etapas de ejecución de obra.

3.5.- Incorporación del sistema de auscultación

La auscultación ha tomado gran importancia a medida que el empleo de la misma ha ayudado a evitar catástrofes o posibles fallos que se han logrado corregir

sin la necesidad de lamentar daños irreparables o costos altos por las prácticas sin cuidado. En función a la ocupación de los espacios subterráneos, la instrumentación ha cobrado un valor significativo y se ha convertido en nuestros días en una herramienta de gran peso que está al servicio de la ingeniería, y que además tiene como objetivo principal el responder a la necesidad de controlar y conocer el comportamiento adecuado de las obras que se están realizando.

Además, en general, todas las construcciones subterráneas requieren de una detallada y exhaustiva investigación que permita conocer las condiciones del terreno antes de que se inicie la etapa de construcción del proyecto, para que con esta información recabada pueda tenerse la mejor elección de un trazo adecuado y de un mejor diseño. Esta situación, sin duda, trae consigo la necesidad de implementar otras actividades que son de gran ayuda para la aportación de información que demanda y requiere el proyecto. Ejemplo de ello, el realizar un estudio geológico del terreno, además de complementarlo con sondeos que permitan la caracterización del material o, incluso, el realizar pequeñas obras de túneles piloto que servirán para el reconocimiento de las condiciones del material. Aunque esta etapa servirá de arranque, no debemos olvidar que esta investigación no debe pasar desapercibida durante la etapa de construcción o ejecución de la obra.

En el método de perforación mecanizada es notable considerar que las características de estas actividades de excavación conllevan a tener una mayor velocidad en las etapas de ejecución. Por ello, las alteraciones en el proceso no se hacen esperar y es crucial mencionar que, a razón de esto, como reacción o respuesta del terreno, se darán las alteraciones en el contorno, lo que implicaría inmediatamente tener un equipo destinado o definido con la capacidad suficiente de reaccionar a estas situaciones que ponen en alto riesgo el seguir ejecutando las actividades. Es decir, tener la disposición suficiente tanto de recursos materiales y humanos para una pronta respuesta ante estas situaciones.

Es necesario mencionar que para alcanzar estos parámetros de seguridad se deben definir los umbrales que ayudan a prever estas situaciones -sin correr riesgos de pérdidas de materiales ni mucho menos humanas que lamentar-. Para ello se deben valorar las zonas previas al paso de la excavación, o sea, considerar una longitud de

afectación al frente de la excavación y por detrás del frente, lo que da como resultado tener un planteamiento de auscultación que cumpla con las siguientes características y necesidades que pongan a salvo a este tipo de infraestructura -como lo son los túneles-. El monitoreo estaría dado por:

- Control de contornos.
- Control de movimientos, tanto de superficie como de parámetros verticales, es decir, movimientos verticales, bidimensionales y tridimensionales.
- Control de la evolución de posibles grietas y/o fisuras existentes u ocasionadas por los trabajos.
- Control de movimientos en cimentaciones existentes, horizontales, verticales y/o mixtos.
- Control de presencia de agua en el frente de excavación o circunferencial.
- Además de asociar en cada fase de excavación un sistema de seguimiento a implementar para detectar las posibles alteraciones ocasionadas por el paso del back-up o por la llegada del frente.

Estas características nos ofrecen la oportunidad de tener siempre en mente la idea concreta de que la velocidad de ejecución implica, en algunos casos, una mayor intensidad en la frecuencia de las lecturas -por las posibles alteraciones que son consecuencia por el paso de la obra ejecutada- con el fin de ser identificados mediante los umbrales de seguridad en los que se les asigna un color determinado por el riesgo detectado. En otras palabras, los colores darán pauta para continuar con las actividades mediante el color verde, a tener precaución en lo que se está realizando mediante el color ámbar y/o definitivamente parar la acción mediante el color rojo, lo que implicaría a tener una mayor relación entre la distancia al frente de excavación y el nivel de atención en las afectaciones originadas por el proceso de construcción.

3.6.- Ventajas en el empleo del control de procesos de TBM-EPB

En la actualidad, el desarrollo de la tecnología en las actividades relacionadas con la excavación de suelos -en particular en la construcción de túneles- puede realizarse mediante el uso de máquinas que comúnmente se conocen como escudos. Siendo más específicos, los escudos EPB han traído consigo un desarrollo tal que los procesos de excavación han resultado ser más seguros y con mejores rendimientos de operación, ya que debido al control de procesos se han desarrollado las actividades de la mejor manera, puesto que con ello se ha logrado una superior interpretación del comportamiento entre el suelo-tuneladora.

Es importante conocer que el desarrollo de las actividades de un EPB es mediante el principio básico de operación. En tal, el escudo trabaja debido a una presión balanceada que permite igualar la presión horizontal que es causada por el terreno con la presión del material excavado que se almacena al interior de la cámara de excavación, misma que se encuentra ubicada atrás de la rueda de corte. Con este proceso se regula la entrada y salida del material producto de la excavación del terreno (rezaga), la cual juega un papel importante en la realización de las actividades, ya que, para proteger el frente de trabajo, el material debe mantenerse a una presión equilibrada que permita la estabilidad del terreno excavado y el avance de la máquina. Es aquí en donde el control de procesos tiene su injerencia.

Mediante el empleo del control de procesos se puede lograr definir un diagrama de avance de una tuneladora. En considerables ocasiones esta gestión está íntimamente relacionada con la curva de aprendizaje, ya que el funcionamiento del escudo y el proceso de excavación permiten al personal comprender las etapas de ejecución de la obra en las primeras semanas de arranque de estas actividades, para que, después logrado este entendimiento, surge una ejecución de obra constante durante el tiempo que resta para su culminación.

El control de procesos usado en una EPB permite conocer los parámetros de excavación que en muchas ocasiones son parte fundamental, que en el mejor de los casos deben ser analizados, implementados y monitoreados con el fin de poder llevar a cabo de la mejor manera las etapas de construcción de la obra. De los parámetros

de excavación identificados se pueden destacar como los principales los siguientes: velocidad de avance, revoluciones por minuto de la rueda de corte, penetración de las herramientas de corte por revolución, fuerza de empuje y torque.

Cuando se lleva un control de procesos de forma adecuada en una EPB, se pueden alcanzar los objetivos de manera contundente. El método de excavación de túneles con escudo de presión de tierras balanceadas es muy eficiente para ser empleado en diferentes tipos de terrenos -que en muchas ocasiones suelen ser muy inestables o en estratos de suelos sueltos-, lo que se puede interpretar como ventajas en el empleo de este método de excavación. Los escudos EPB suelen ser muy versátiles en su forma de empleo. Por ejemplo, en condiciones en donde la geología define a un tipo de terreno como suelo blando con presencia de agua subterránea, estos escudos en comparación con los escudos de lodos suelen tener un mejor desempeño ya que, mediante la presión originada por el propio material excavado almacenado en la cámara, permite mantener ese equilibrio y dar la oportunidad de un avance a la máquina. Sin embargo, con el empleo de un escudo de lodos en un suelo altamente permeable se debe tener un debido cuidado para evitar que se pierdan los lodos empleados en el frente de trabajo. Por otro lado, para el desempeño de la máquina EPB, no requiere de instalaciones adicionales, como es el ejemplo de una planta de tratamiento, contrariamente a una máquina de lodos, ya que esta máquina en su proceso requiere de un acondicionamiento y una separación de lodos para seguir con sus actividades de excavación.

Es importante mencionar los méritos -actualmente notorios- del escudo de presión de tierras balanceadas. Éstos resultan altamente aplicables en el desarrollo de los túneles con longitudes muy grandes, en el cual se requiere de un preciso control de procesos que nos permita desarrollar un plan de prevención que mantenga la seguridad y cuidado del personal que desempeña las actividades. Además de crear un plan maestro de mantenimiento que con la ayuda de la geología permita definir el tiempo en que deberán aplicarse las intervenciones de sostenimiento, con el fin de garantizar la ejecución de las actividades de la mejor manera. También, para lograrlo, se debe considerar la vida útil y de servicio de las herramientas tales como los dientes de corte, los sellos mecánicos, los sellos de cola y las demás partes componentes del

escudo que por su funcionamiento están sujetas a un desgaste. Es por ello la importancia del control del proceso que permita al operador de la máquina tener el conocimiento de operar, observar y corregir las adversidades que a su paso resalten en el proceso de excavación.

CAPÍTULO 4.- Instrumentación geotécnica y estructural

4.1.- Introducción

La instrumentación es la instalación y disposición de diversos sensores, instrumentos y equipos que tienen como fin común el tomar lecturas de las diferentes magnitudes que se originan de carácter geotécnico o estructural, con las que se pretende mantener un control y registro del comportamiento de la obra en el proceso de construcción. O bien, estos instrumentos son empleados en la fase de proyecto con la finalidad de tener los parámetros de las condiciones iniciales que a su vez serán de gran ayuda y apoyo para considerarlo como datos de diseño.

La instrumentación debe cumplir con el objetivo principal de validar o adecuar el método de diseño que se pretende desarrollar, además de evaluar las técnicas de construcción que se intentan aplicar para dicha obra. Es decir, estas técnicas deben ser evaluadas en cuanto a su efectividad, la seguridad para la ejecución, el tiempo de realización y su coste de la obra. Al mismo tiempo que también se debe cumplir con las características de protección del medio circundante de la excavación y vecino de la misma; asimismo, la evaluación de los riesgos y asesoría que tienen el objeto de prevenirlos. Por otro lado, con estas técnicas empleadas se da un seguimiento continuo de la obra que permite tomar decisiones de forma rápida y adecuada para los casos de vulnerabilidad que puedan estar relacionados con la realización de las diversas obras de infraestructura.

4.2.- Objetivo del sistema de auscultación

La instrumentación en suelos blandos juega un gran papel que es considerado de suma importancia, ya que en este punto se deben proporcionar las lecturas y el control necesario para conseguir una garantía que permita realizar las actividades de

la obra de manera más adecuada, evitando que las afectaciones o daños trasciendan a las estructuras existentes en la superficie; así también, cuidando a las que se han colocado para dar origen al túnel. Es por ello que el objetivo principal de instalar los elementos de medición al paso de estas obras es brindar la oportunidad de prevenir la generación de deformaciones más allá de las permisibles -definidas por los límites del proyecto y/o por las normas que aplican al lugar en donde se desarrolla la obra-.

4.3.- Instrumentación geotécnica

Es importante mencionar que los trabajos que hacen referencia a las excavaciones subterráneas son actividades que producen una seria alteración al estado inicial de esfuerzos del suelo. Esto llega a interpretarse como una generación de movimientos producto de las actividades que se están desarrollando o llevando a cabo por los trabajos ejecutados, mismos que repercuten en las zonas cercanas a la excavación o, en el peor de los casos, en la superficie del terreno, lo que trae consigo un reacomodo de sus partículas para poder alcanzar un equilibrio.

En muchas ocasiones estos movimientos están asociados a una serie de acontecimientos que suelen tener un gran impacto en la ejecución de cada una de las etapas de construcción. Además, la magnitud, orientación y localización de estos movimientos finales serán en función a una serie de factores (Otero, M, 2004), tal como se indica a continuación:

1. Geometría del problema (profundidad del túnel, espesor del recubrimiento y diámetro del túnel, entre otros).
2. Condiciones geotécnicas y presencia de agua.
3. Proceso constructivo (convencional o mecanizado).
4. Cargas presentes en la superficie.

Lo que conlleva a tener un control y monitoreo de los desplazamientos en los túneles en donde se incluyan las mediciones correspondientes a (Dunnicliff, J. 1993):

1. Convergencias de las paredes del túnel.
2. Desplazamientos alrededor del suelo de la excavación.

3. Desplazamientos verticales (subsidiencias) y horizontales en la superficie, ya sea del terreno como de estructuras cercanas.

Lo anterior con el fin de lograr el mayor aprovechamiento de la resistencia del terreno, lo cual implica conservar las condiciones óptimas del mismo, además de minimizar las deformaciones. Esto debe ser restringido al máximo con los procedimientos adecuados, así como también el de dar un seguimiento de monitoreo y control de las actividades que se están ejecutando.

En general, el empleo de la instrumentación geotécnica no se define solo en la elección adecuada de los instrumentos de medición, sino que también forma parte de un proceso bien definido, es decir, paso a paso de las necesidades que demanda la ingeniería. Con el fin de poder arrancar con la definición de un objetivo que se pretende alcanzar mediante el empleo de los diversos equipos y así concluir con una serie de datos de medición que dan origen a la organización de los diferentes planes de contingencia para atacar de manera precisa a las eventualidades: "Cada instrumento instalado en el proyecto debe ser seleccionado y posicionado para asistir en responder una pregunta en particular" (John Dunnycliff, 1993).

Cabe mencionar que en la época actual han surgido una diversidad de equipos de instrumentación geotécnica que son empleados en las diferentes obras civiles, los cuales pueden llegarse a clasificar de acuerdo al fin de medición: desplazamientos (movimientos verticales y horizontales), presiones y comportamiento de estructuras construidas. Razón por la cual se debe planificar un programa de monitoreo utilizando la instrumentación geotécnica. Para ello, es necesario conocer de manera aproximada la magnitud de las variables a medir con el fin de tener un parámetro que permita determinar los valores máximos, es decir, el rango del instrumento a emplear, así también los valores mínimos que corresponden a la apreciación y precisión del instrumento para las lecturas que se desean registrar. Dentro del control y monitoreo del terreno, podemos identificar las siguientes actividades que se desarrollan en la etapa de ejecución y culminación de la obra, las cuales son de ayuda para las lecturas del material heterogéneo en cuestión:

1. Topografía

La topografía, sobretodo en suelos blandos, es una herramienta de suma importancia que debe ser considerada en cualquier actividad; en ella se involucra la realización de cualquier obra de infraestructura. Con relación a las obras subterráneas tiene un gran impacto, ya que permite recopilar la información correspondiente y relevante a las condiciones presentes sobre el terreno que está siendo afectado por el proyecto. Con dicha información se pueden realizar elementos de apoyo como planos topográficos hechos a cierta escala y totalmente actualizados; además de que con el apoyo del estudio geológico y geotécnico se puede tener el conocimiento de las características de los terrenos que serán afectados por el paso de la obra, es decir, en el plano topográfico es posible realizar las secciones precisas con la caracterización del material correspondiente.

La topografía también permite, entre otras cosas, la nivelación del trazo del túnel, así como la nivelación de los portales de entrada y salida del mismo. Estos son elementos que también son de vital importancia para el sistema guiado de la máquina tuneladora ya que, gracias al software cargado a la TBM, permite un desempeño adecuado de la máquina, informando al operador en cualquier etapa de ejecución de las posibles desviaciones de la tuneladora con respecto a la ruta que se ha proyectado en el periodo de gabinete. Además, con ello, se pueden realizar las correcciones pertinentes de manera inmediata y precisa.

Con la realización de estos trabajos topográficos, una vez que ya estén establecidos y referenciados de manera correcta, es posible definir las profundidades correspondientes al trazo del túnel, o sea, calcular todas las coordenadas Z de la totalidad de los puntos de ataque de la obra. En general, el empleo de la topografía en la construcción de túneles suele ser una forma de definir el trazo de la obra en planta, además de indicar las longitudes con sus respectivas pendientes y los radios de curvatura para los cambios de dirección, entre otras cosas.

2. Convergencias

Es importante tener la medición de convergencias, puesto que éstas permiten el estudio de los problemas de deformaciones al interior del túnel. Si dichas mediciones

llegasen a tener valores considerables, o por encima de los datos definidos en el proyecto como permitidos, el ingeniero de turno se vería en la necesidad de tomar cartas sobre el asunto para reforzar el revestimiento. En otras palabras, la medición de convergencias es vital para conocer el comportamiento del sostenimiento empleado durante la ejecución de la obra. Dependiendo del diámetro del túnel, las secciones del mismo suelen considerar de 3 a 5 puntos de control para tener una lectura de medición, de tal forma que estos puntos dan origen a triángulos circunscritos que logran definir el comportamiento de los anillos de dovelas. Las lecturas de estos puntos de control pueden llevarse a cabo mediante el apoyo de una estación total o con cinta extensométrica.

La medición de convergencias toma su mayor interés debido a la sobreexcavación de la sección del túnel. Además de considerar la forma troncocónica del escudo que, al final del día, son los dos aspectos o efectos que ocasionan la convergencia de la superficie excavada, que no debe pasar desapercibida sobre todo si se refiere a la excavación en terrenos de suelos blandos, ya que la deformación mayor se producirá entre la sección excavada y el diámetro exterior de la cola del escudo. He aquí el interés de tener una lectura del comportamiento del sostenimiento o, mejor dicho, tomar la medición de convergencias.

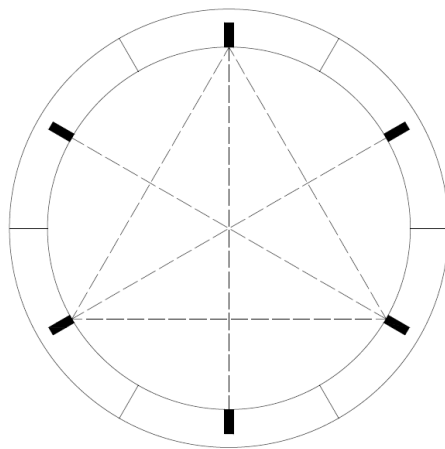


Figura 14.- Convergencia en túneles con dovelas.

3. Movimientos horizontales

Estos movimientos están relacionados con la medición mediante el empleo de instrumentos denominados extensómetros. Ellos permiten medir los desplazamientos horizontales y los cambios de abertura de las grietas. La función principal de estos elementos es medir el movimiento y compararlo con una distancia inicial o cero conocidas entre dos puntos de referencia tomada de manera manual o automática. Existen diversos tipos de extensómetros que permiten la toma de estas lecturas, los cuales se pueden mencionar de la siguiente manera:

Extensómetro de convergencia: también conocido como extensómetro de cinta, son usados para medir la distancia entre dos puntos en lugares cerrados como túneles, galerías y excavaciones. Consta de una cinta de acero perforada cada 5 cm, enrollada a un carrete, asegurado con ganchos para garantizar la tensión.



Figura 15.- Cinta de convergencia. Recuperado de www.sensogeo.com.

Extensómetro mecánico: el sistema consiste en poner un cable o cinta horizontal, conforme se presenta el movimiento se puede medir el desplazamiento con respecto a la distancia original. Este es un método preciso.



Figura 16.- Extensómetro mecánico. Recuperado de ensesa.com.mx.

Extensómetro eléctrico: es similar a los extensómetros mecánicos, pero la ventaja es que tiene un transductor de una precisión de 0.0025 y 0.01 mm, misma que

los hace más exactos en la toma de datos. Las desventajas principales es que son más costosos con respecto a los mecánicos y también pueden ser afectados por la temperatura.



Figura 17.- Extensómetro eléctrico. Recuperado de www.suanper.com.

Inclinómetros: éste, según Herrera y Linares (SF), es “una técnica de instrumentación geotécnica capaz de registrar movimientos horizontales a lo largo de la vertical de un sondeo”, normalmente usado en taludes y sitios inestables. Es posible obtener los datos de la profundidad de la falla, dirección y magnitud de los desplazamientos. El inclinómetro posee un sistema que contiene cuatro elementos principales:

- Un tubo guía: este tubo está hecho de plástico, acero o aluminio y está instalado dentro de una perforación, tienen ranuras longitudinales para orientar la unidad sensora.
- Un sensor portátil: este sensor va montado sobre un sistema de ruedas que se mueve sobre la guía del tubo. El inclinómetro incorpora dos servo-acelerómetros para medir la inclinación del instrumento.
- Un cable de control: el cable baja y sube el sensor y transmite señales eléctricas a la superficie. El cable se maneja con una polea que tiene unas tenazas para sostenerla.
- Un equipo de lectura en la superficie: este sirve de proveedor de energía y recibe las señales eléctricas. Algunos de estos equipos tienen la capacidad de guardar y procesar datos, el otro solo presenta los datos de la lectura. Al equipo no le afecta la humedad y tiene la capacidad de guardar hasta 40 mediciones completas. A veces, puede realizar chequeos y revalidar la información.



Figura 18.- Inclinómetro portátil. Recuperado de www.interempresas.net.

4. Distanciómetro láser

Uno de los instrumentos que facilita la medición electrónica de las distancias es el distanciómetro. Éste funciona emitiendo un haz de luz infrarroja o láser desde el instrumento hasta el punto en el que tomará la lectura, el rayo rebota y con ello permite determinar la distancia teniendo en cuenta el tiempo que tarda en recorrerla. Este instrumento es empleado para facilitar las mediciones a largas distancias o en lugares que son complicados de medir con otros instrumentos como cintas o flexómetros. Estos aparatos pueden llegar a ser montados sobre tránsitos, teodolitos o prismas.



Figura 19.- Distanciómetro láser. Recuperado de www.consurvtech.com.

5. Presiones

Piezómetro neumático: tiene una punta porosa unida a un diafragma que se acciona por medio de gases o fluidos (normalmente aceites) y requiere de una lectura externa suministrando la presión, la cual aumenta en el interior hasta igualar la que se

está recibiendo en la piedra porosa para tomar la lectura una vez equilibradas las dos presiones.

Piezómetro de cuerda vibrante: consiste en un diafragma metálico que separa la presión del agua del sistema de medida. Alava y Escalaya (2011) mencionan que “el piezómetro está diseñado de manera que un cambio en la presión en el diafragma genera un cambio en la tensión de la cuerda”. El cable tensionado previamente está unido al punto central de la estructura, transformando los cambios de tensión en presión.

Piezómetro eléctrico: o transductor eléctrico, usa un sistema particular que consta de un diafragma que se desvía proporcionalmente a la presión de poros que se ejerza en una cara del piezómetro, esta desviación se mide con varios transductores eléctricos. Los sensores convierten la presión del agua en una señal eléctrica que se transmite hasta el sitio de medición. Hunt (2007) afirma que “Los piezómetros eléctricos son extremadamente sensibles y tienen un retardo de tiempo insignificante”, lo que nos confirma que es un método muy preciso y no es afectado por presiones bajas.

Piezómetro abierto: o también conocido como piezómetro de Casagrande, consiste en un tubo corto con ranuras o un cilindro de cerámica porosa a la cual se le conoce como “bulbo piezométrico”. A uno de los extremos se le acopla un tubo de menor diámetro que asciende hasta la superficie, su dinámica de funcionamiento consiste en que la parte libre del tubo hasta la superficie cambia con respecto a la presión de poros, es decir, a mayor presión la columna de agua también subirá. El nivel del agua se mide bajando una sonda hasta el nivel de la columna y conociendo la profundidad del piezómetro se determina la elevación de la columna. Para su instalación se baja el bulbo a su posición establecida, en un empaque de arena, una perforación o barreno, se sella a una determinada altura del bulbo con bentonita para formar una zona piezométrica que garantiza la medición de la presión de poros. En la superficie –generalmente- se hace un tapón de cemento para aislar la zona de estudio.

Pozo de observación: o piezómetro de tubo ranurado, es usado para detectar y monitorear el nivel freático en terrenos permeables. El filtro puede estar compuesto

por un tubo ranurado en PVC con un filtro en geotextil externo, normalmente se hace un empaque de grava entre el tubo y la perforación realizada.

6. Sistema automatizado de medición de convergencias

A medida en que los procesos de excavación han avanzado en emplear técnicas que permitan el desarrollo adecuado en la ejecución de excavación de túneles, se han aplicado sistemas de auscultación más sofisticados permitiendo el monitoreo constante en cada una de las etapas de construcción. Es por eso que la automatización trae consigo la oportunidad de registrar la mayoría de los datos para desarrollar un buen control de procesos.

Un punto muy importante es la seguridad. Para llevar a cabo los trabajos que conlleva la excavación de túneles se debe mantener un constante control en las deformaciones del endovelado, ya que este efecto es ocasionado por la sobre excavación producida por la rueda de corte en el frente de trabajo, además de la forma troncocónica del escudo, el cual genera una abertura considerable entre el diámetro exterior del escudo y el terreno excavado. Lo anterior trae como consecuencia el origen de deformaciones considerables en los elementos estructurales como los anillos de dovelas, los cuales deben ser monitoreados con el objetivo de mantener el mínimo impacto, y en caso en que este efecto sea mayor se deberá actuar de manera casi inmediata con el fin de evitar una catástrofe que lamentar.

Aunque para contrarrestar las controversias de deformaciones se implementa el proceso de inyección de lodos de bentonita a presión, mantener un frente presurizado y a su vez rellenar la parte exterior del escudo llamado GAP -el cual es el espacio generado entre el contorno exterior de la chapa del escudo y el terreno-. Éste es rellenado con una lechada de agua con cemento, mezcla que queda confinada gracias a la ayuda de los cepillos con grasa que evitan que dicha mezcla tenga un retorno hacia la cabeza de corte. Al automatizar la medición de las deformaciones, el sistema de auscultación debe considerar los instrumentos necesarios que permitan tener las lecturas adecuadas, además de contar con los equipos para la transmisión de los datos recolectados en los tiempos estipulados o definidos por los expertos. Esto,

con el fin de contar con las lecturas indispensables que puedan prever condiciones comprometedoras para el personal involucrado.

El sistema automatizado de medición de convergencias lleva consigo el empleo de instrumentos tales como deformímetros de acero y para concreto. Además de considerar celdas de presión que ayudan al monitoreo, así como el uso de un software especializado para el procesamiento de estos datos. Estas herramientas van a permitir determinar las frecuencias de monitoreo para tener una mayor seguridad en los trabajos. Los parámetros registrados permitirán definir un umbral de seguridad que deberá ser respetado para no correr riesgos, las mediciones de estos puntos al interior del túnel deben ser activados a medida que el avance de la excavación se vaya dando.

4.4.- Instrumentación estructural

En función de definir lo que se pretende monitorear y de lo que queremos tomar lectura para tener un control, se deben considerar los elementos más adecuados de la instrumentación que permitan tener la mejor precisión, sensibilidad, fiabilidad y durabilidad en los elementos que forman parte del conjunto de estructuras. Es decir, en la elección o selección de los instrumentos se debe considerar una serie de factores que permitan tener la mayor seguridad y confianza para la toma de las medidas que son de interés para el monitoreo de los elementos estructurales empleados.

La auscultación es de sumo interés puesto que las lecturas previas al diseño brindan la oportunidad de caracterizar físicamente al túnel al identificar el tipo de estructura a emplear, así como el poder identificar el tipo de terreno que será soportado por los elementos estructurales que se están empleando para poder reaccionar de la manera más adecuada en la traza del túnel. Para ello, los instrumentos que se pueden emplear son los siguientes:

Extensómetro de cuerda vibrante: se usan para medir las deformaciones en estructuras, principalmente de juntas -va empotrado a lado y lado de la junta-. Es usado en estructuras de concreto en masa. El medidor es instalado en vertidos separados. En el primer vertido se incrusta un ancla extraíble, después, el cuerpo del extensómetro es atornillado en el anclaje y se lleva acabo el segundo vertido de

concreto. Cuando se produce un movimiento en la articulación, el cuerpo de plástico se rompe, lo cual permite que el transductor dentro tome el dato.

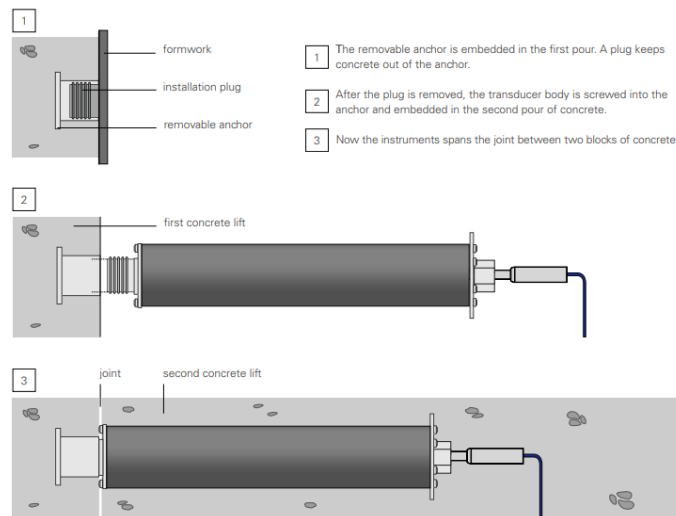


Figura 20.- Extensómetro de cuerda vibrante (SIGGEO, 2017).

Clinómetros: es un equipo mecánico o eléctrico que se diseña para medir inclinación o rotación de un punto y es usado principalmente en estructuras. Funcionan bajo la gravedad, en otras palabras, hace las medidas con respecto a un plano vertical, y normalmente se usa para monitorear estructuras, muros de contención, zonas de deslizamientos o hundimiento, o elementos con movimiento rotacional influenciados por actividad sísmica.



Figura 21.- Clinómetros en túneles. Recuperado de www.patologiasconstruccion.net.

Celdas de presión de contacto: se utiliza comúnmente para medir esfuerzos entre el suelo y una estructura. A diferencia de las celdas de presión embebidas o empotradas, tiene una gran ventaja, ya que al medir el esfuerzo total contra una

estructura no se generan tantos errores como en una masa de suelo, aunque la rigidez y la influencia de la temperatura pueden llegar a ser críticos en la toma de datos.

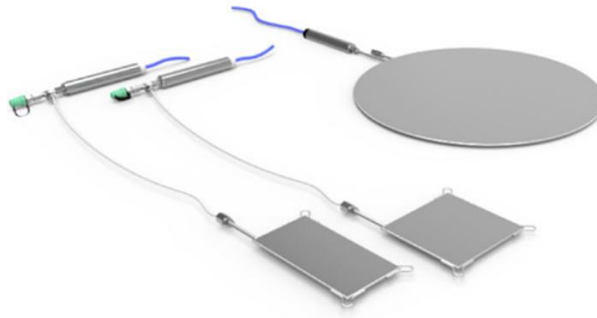


Figura 22.- Celda de presión de contacto. Recuperado de www.sisgeo.com.

CAPÍTULO 5.- Control de procesos de excavación en suelos blandos

5.1.- Características de los suelos blandos

Los suelos son materiales con ciertas características que al presentar propiedades similares pueden llegar a clasificarse en grupos y subgrupos basados de acuerdo a su comportamiento y exigencia de la ingeniería. Ésta es la que solicita de forma precisa las características y la descripción detallada del material presente en la zona en la que se pretende desarrollar la obra. De acuerdo al trabajo realizado por el doctor Braja M. Das (1985, p. 39), sostiene que “existen dos sistemas de clasificación de suelos: uno es dado por el sistema de clasificación AASHTO, el cual es muy empleado principalmente por el departamento de caminos estatales y de condados, mientras que el otro es empleado por los ingenieros geotécnicos y es nombrado como Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)”. Este último es el que tiene mayor injerencia en el ámbito de las obras subterráneas y fue propuesto originalmente por Casagrande en 1942 para utilizarse en la construcción de aeropuertos - emprendida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial- (Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, 1985, p.39).

Tabla 4.- Unidades estratigráficas. (Adaptado de “Diseño de la cimentación de Torre Reforma, México, D.F.”, Suárez Almazán Luis Emilio, tesis de licenciatura, 2012)

Espesor de capa en m	Nombre de capa	Descripción
0 - 4.5	Costra superficial	Formada por suelos limo-arenosos endurecidos por secado.
4.5 - 23.5	Serie arcillosa superior	Formada por arcilla blanda a firme y limos de alta plasticidad con intercalaciones de lentes de arena y capas de limo-arenoso.
23.5 – 29.0	Capa dura	Arena media limosa y limos.
29.0 – 33.0	Serie arcillosa inferior	Arcilla preconsolidada de consistencia dura a muy dura.
33.0 - 80.0	Depósitos profundos	Arena limosa con intercalaciones de arcilla, limos y arenas.

Galindo Islas Abraham y Ruiz Sandoval de la Rosa Armando de Jesús (1993), a través de su experiencia, sostienen que los suelos blandos por sí solos son elementos que presentan una complejidad para su excavación, ya que en algunos casos suelen surgir problemas de suma importancia para desplantar estructuras en este tipo de materiales. La excavación en suelos blandos toma su mayor interés por el peligro latente de una posible falla o un colapso que pudiese presentarse en el desarrollo de las etapas de construcción. Además de que, derivado de las actividades, también hay un riesgo latente por la aparición muy frecuente de deformaciones que pudiesen dañar estructuras vecinas por el paso de estas grandes obras de infraestructura.



Figura 23.- Llegada de TBM a lumbreira. Recuperado de www.normet.com.

Es por ello que para realizar las excavaciones en estos materiales se requiere de mucho control y monitoreo de las zonas atravesadas, además de contar con un sistema robusto de control para el proceso de excavación que permita estar listo para reaccionar de la mejor manera cuando las situaciones de anomalía se presenten -y que puedan ser resueltas en tiempo y forma-. Para ello, se debe realizar un análisis de diversos parámetros los cuales nos brinden la información adecuada que permitan tener las herramientas de solución. Además de que estas actividades deben complementarse con un diseño sólido basado en la investigación de las condiciones del lugar, es decir, conseguir los parámetros geotécnicos que permitan desarrollar el cálculo adecuado de diseño y que éste a su vez sea complementado con los estudios necesarios para tener la elección más adecuada del método de excavación. Un plan de monitoreo permite desarrollar con mayor claridad las actividades que conlleva la construcción de túneles, así como también estas condiciones dan pauta a definir los umbrales de seguridad. Esto se logra con la identificación de los parámetros clave definidos durante la etapa de construcción de experiencias anteriores.

Esta información comentada anteriormente puede ser un tema que identifica a esos elementos como necesarios, pero no suficientes, ya que aún con la experiencia adquirida los incidentes se siguen manifestando. Por ejemplo, en el caso de las obras subterráneas que se llegan a realizar en el entorno urbano, las condiciones suelen ser más vulnerables y se pueden presentar colapsos que en algunos casos llegan a dañar

en gran medida a terceros y/o a causar daños graves a las personas y propiedades privadas. Esa es la incógnita que aún nos sigue causando conflictos y es que, a pesar de seguir las reglas y directrices adecuadas y los métodos correspondientes, se presentan los accidentes. Quizás estas causas obedecen a muchas condiciones, por ejemplo, a la variabilidad y a la incertidumbre de las condiciones geológicas, geotécnicas e hidrológicas como la caracterización equívoca del terreno, la ausencia de control en los procesos de excavación, así como la falta de interpretación oportuna de los datos de vigilancia y de seguridad o, bien, por factores humanos. Es por ello que los enfoques probabilísticos en algunos casos suelen ser de gran apoyo, basados en rigurosos análisis de riesgos, ya que permiten identificar y evaluar todos los posibles peligros, sus probabilidades de acontecimiento y sus posibles consecuencias pertinentes.

Es así que para una mayor seguridad al realizar estas actividades se han implementado técnicas que permitan tener una estabilidad en la excavación de estos materiales, lo que se ha resuelto mediante el uso de elementos mecánicos, que permiten ademar circunferencialmente las paredes de la excavación. Así también, de manera simultánea, ofrece la oportunidad de tener un avance y evitar un posible derrumbe. Estos elementos que logran estas actividades son el escudo de la máquina tuneladora y la colocación de dovelas que dan origen al túnel.

La complicación más importante de los suelos es que dada la variedad con la que éstos se presentan en la naturaleza, cualquier intento de clasificarlos debe estar bien sustentado con antecedentes de estudios. Casagrande dirigió sus análisis a la clasificación de los suelos de tal forma que pudiera simplificar el sistema y, con ello, se diera la posibilidad de trabajar con la variedad de suelos. A través de ello, se tomó como punto de arranque el sistema de clasificación de aeropuertos, propuesto en 1942 y adoptado de manera casi inmediata por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América. Tal sistema divide a los suelos en dos grandes fracciones:

- La gruesa: formada por partículas mayores que la malla No. 200 (0.074 mm) y menores que la malla de 3" (7.62 cm).
- La fina: formada por las partículas que pasan la malla No. 200.

Por lo anterior, el ingeniero que desarrolla las actividades de excavación debe tomar en cuenta las características de plasticidad, las cuales están estrechamente ligadas a las propiedades mecánicas e hidráulicas. Dichas propiedades deben conocerse primeramente de manera cualitativa y después cuantitativa, de tal manera que se definan las características de esfuerzo, en otras palabras, la deformación y resistencia del material, así como la compresibilidad, la permeabilidad, la velocidad de variación volumétrica, entre otras, influyen directamente en el comportamiento de estos materiales que están siendo alterados por el paso de la obra de infraestructura denominado como túnel.

Cabe mencionar que una de las propiedades de mayor interés en este tipo de suelo- y digna de ser considerada- es la compresibilidad. Dicha propiedad está íntimamente ligada con las características que presentan este tipo de material denominada plasticidad, en específico con el valor del límite líquido, es decir, la compresibilidad aumenta a medida en que incrementa el límite líquido, y se mantienen constantes los otros valores característicos. Una característica de los suelos formados por partículas finas, siempre y cuando éstos no sean de origen volcánico, presentan, por lo general, valores de límite líquido menores a 100, dando pauta a tener una subdivisión de estos materiales en dos grupos principales: los de baja a media compresibilidad con un límite líquido menor del 50 % y los de alta compresibilidad con un límite líquido mayor de 50 %.

5.2 Parámetros clave considerados en la excavación de suelos blandos

En las actividades de excavación de una obra subterránea es importante conocer que, como parte del resultado del proceso, se traen consigo consecuencias tales como la alteración de la zona en la que se realizan los trabajos, asimismo se presentan efectos que en muchas ocasiones terminan ejerciendo un impacto a la obra. Tal es el caso de la modificación del estado de esfuerzos natural y la redistribución originada en el suelo circundante. Además de que a este manifiesto se le incluye la alteración de las condiciones hidráulicas, razón por la cual en muchas ocasiones se presentan deformaciones en la masa de suelo excavada que corren el riesgo de ser desplazados hacia el interior de la excavación.

Por estas razones es importante contar con los parámetros clave que permitan realizar las actividades de la mejor manera. Las técnicas de construcción en suelos blandos han tenido un desarrollo y crecimiento importante en los últimos años, lo que ha brindado la oportunidad de emplear las prácticas adecuadas para concretar las obras subterráneas. Es por ello que, en el desarrollo de este trabajo, se propone la selección de los parámetros clave en la excavación de túneles en suelos blandos. Cabe señalar que en el proceso de construcción se deben analizar todos los parámetros tal como se indica en los primeros capítulos, ya que brindan la información correspondiente para que las etapas de ejecución de obra se realicen de la mejor manera. Los parámetros considerados que tienen mayor relevancia en este trabajo son los siguientes:

Monitoreo de asentamientos. Es importante llevar un control en este tipo de fenómenos que resultan ser efectos negativos con mayor impacto en el desarrollo de este tipo de obras de infraestructura. Estos efectos pueden ser identificados en dos criterios. El primero, movimiento casi instantáneo -y los que son diferidos en el tiempo-, es aquel que se manifiesta en el acomodo del material en el momento en que éste ha sido alterado o intervenido. Por ejemplo, el reacomodo del material en el frente del túnel y en la parte trasera del mismo y que en efectos negativos éste puede ocasionar una deformación en el revestimiento. En el segundo criterio se encuentra el movimiento diferido, por ejemplo, la redistribución de las tensiones alrededor de la excavación, la variación de la presión intersticial o, bien, los cambios al uso del terreno alrededor de la excavación, motivo por el cual se debe tener cuidado para monitorear al área de trabajo mediante el empleo de la instrumentación adecuada tanto en superficie o estructuras que se vean en riesgo de ser afectadas. Dichos instrumentos empleados pueden ser inclinómetros, extensómetros, strain gauges y convergencias.

Otra forma muy utilizada de medir los movimientos es mediante las nivelaciones de eje y en superficie. Éstos, igualmente, son parte de los instrumentos de monitoreo que permiten tener una forma simple de medir estos movimientos causados por subsidencias locales al interior del túnel o, bien, superficiales, y es que de no ser previstas pueden ocasionar efectos negativos tales como hundimientos del escudo, o sea, dando una mayor pendiente, la cual, quizás, trajera como consecuencia el atasco

de la máquina, lo que pudiera reflejarse en tiempos muertos de avance y el empleo de una brigada que permita sacar del atasco a la TBM. Por otro lado, las lecturas en superficie deben ser realizadas mediante una nivelación precisa, en otras palabras, las miras de apoyo deben estar referidas a bases suficientemente alejadas de la zona de influencia y ancladas a un terreno firme para que con ello se garantice el no tener el más mínimo movimiento.

Las convergencias forman parte del control propuesto en el desarrollo de este trabajo, ya que mediante éstas se tiene la oportunidad de conocer el comportamiento del sostenimiento del túnel durante la etapa de ejecución de obra. Lo cual quiere decir que esto dependerá del diámetro del túnel para colocar los puntos de referencia que permitan tener una lectura de medición, considerando los umbrales de seguridad como se indica en el código de prácticas PAS-8810 (2016), ya que aún no se cuenta con un código mexicano que permita la regulación de estos criterios -por eso se acude a herramientas extranjeras-.

Por otro lado, para poder desarrollar un control de procesos adecuado, también se deben considerar las características de la máquina, por ejemplo, su penetración, velocidad de giro y relleno del espacio anular -o también considerado como GAP-. Este espacio creado por la diferencia de diámetros con la coraza y los anillos debe ser inmediatamente rellenado con mezcla de inyección para evitar asentamientos superficiales. No debemos olvidar que como parte fundamental en el control de procesos también se tiene el acondicionamiento del terreno. Aunque se puede mencionar que las máquinas EPB están diseñadas prácticamente para trabajar en suelos cohesivos que contengan componentes de finos y que puedan ser extraídos a través del tornillo sin fin y cumplir con el requisito de no perder la presión de confinamiento. Al no cumplir con estas características, en ocasiones, se requiere de la adición de agentes acondicionadores que puedan llegar a modificar y alcanzar a cubrir con estos requisitos.

Existen diversos aditivos que permiten el desarrollo de las actividades de manera adecuada en la cámara de excavación de una EPB, ya que estas máquinas requieren un material homogéneo pastoso que tenga un alto grado de esponjamiento y con cierta impermeabilidad; cuando no se logra esta mezcla, se hace uso de algunos

aditivos acondicionadores. En algunas ocasiones basta con la adición de agua, aunque en otras, dependiendo de la granulometría del terreno, se requiere de polímeros o espumas. El empleo de estos agentes permite alcanzar la presión de confinamiento requerida. “Por otro lado con las máquinas EPB también puede emplearse la bentonita para terrenos con contenido de finos inferior al 30%, si se utilizan aditivos como espuma o polímeros, existen productos biodegradables que se destruyen en un 95 % en un plazo de 28 días” (Aguado de Cea Antonio, 2010, Tesis de especialidad). Es por ello que, de este modo, las máquinas tuneladoras de tipo EPB son una alternativa muy apropiada, y el uso de agentes acondicionadores son la pieza clave para conseguir los mejores rendimientos de operación, ya que con ellos se pueden alcanzar las condiciones con las que se desarrollan las máquinas de presión de tierras. La elección de los agentes acondicionadores estará en función principalmente por el tipo de suelo, sus características geológicas tales como el nivel freático y la permeabilidad del material, así como también de las características de la máquina.

Tabla 5.- Acondicionadores en función del tipo de suelo. (Adaptado de “Libro de ruta para un ingeniero de turno de una tuneladora EPB”, Aguado de Cea Antonio, 2010, Tesis de especialidad)

SUELO		Espuma	Polímeros
Tipo	Propiedades		
Arena con gravas, arena fina o gruesa	No plásticos, alta permeabilidad	Espuma relativamente estable. FIR lo más alto posible	Polímero que aumenta la plasticidad (Biopolímero, celulosa, CMC)
Arena limosa o arcillosa	Plasticidad dependiente del contenido de finos	Espuma con FIR medio o bajo	Dependiendo del contenido en agua, utilizar un polímero para controlar la consistencia del escombros

Arcilla arenosa o arcilla	Alta plasticidad. La cohesión y adherencia dependen del tipo de arcilla	Espuma de alta dispersión con FIR medio o alto	Polímero antiarcilla para ayudar a reducir la adherencia y cohesión
FIR= Foam Injection Ratio.			

Los parámetros clave empleados en la excavación de suelos blandos se pueden resumir de la siguiente manera:

- Penetración: es un parámetro considerado de mando que debe ser tomado en cuenta en el proceso de excavación de una máquina tuneladora, ya que está asociado con la velocidad de avance, la cual permite ser medida por la elongación de los gatos de empuje por un tiempo en mm/min; lo que representa que el empuje es la respuesta directa de la velocidad que se pretende alcanzar. Dicho de otro modo, la penetración es el resultado de la velocidad de avance y la velocidad de rotación de la rueda de corte. Con ello, podemos mencionar que la penetración es la traslación de las herramientas de corte que impactan directamente en el frente de trabajo en dirección longitudinal recorrida durante un giro realizado por completo por la cabeza de corte en mm/rpm.
- Acondicionamiento: las máquinas tuneladoras de tipo EPB están diseñadas para trabajar en suelos cohesivos, con un cierto contenido de finos y que puedan ser extraídos a través del tornillo helicoidal sin perder presión ni confinamiento que soporta el frente de excavación. Sin embargo, en algunas ocasiones, estas condiciones no se llegan a cumplir a pesar de que esta técnica del EPB es muy conocida. Se da el caso de que existen procesos en los que se requiere de una investigación adicional, la cual demanda del uso de diferentes aditivos acondicionadores que permitan tener el efecto deseado y, al mismo tiempo, una correcta operatividad de la máquina, alcanzando con ello una granulometría del terreno adecuada gracias a la utilización de los

diversos acondicionadores. Tal es el caso de espumas o polímeros empleados, así como se indica en la tabla 5.

- Torque: el torque es un parámetro respuesta que se da en función a la dificultad que encuentra la rueda de corte al excavar diferentes materiales. Mientras que en suelos el torque es normalmente alto, en roca sana es bajo. En el primero de los casos, el torque es alto porque existe mayor fricción entre la rueda de corte y el terreno, pero, en el segundo, el torque es menor porque no existe mucha fricción en el material. Por lo anterior, el torque puede ser un parámetro indicativo del frente de excavación y también de un posible daño o desgaste de las herramientas de corte. Los valores adecuados empleados en suelos blandos es el que corresponde a los siguientes valores: 2.3 rpm, 1.6 MNm de torque y 4881 KN de fuerza transmitida a la cabeza de corte, es decir, transmitida por los gatos de empuje. Dichos valores estarán en función de las características geológicas y de la propia máquina tuneladora.
- Volumen y presión de grasa de cola: el objetivo principal de las actividades de inyección de grasa es evitar que el mortero vuelva a entrar en el túnel por la cola o faldón de la tuneladora o, bien, por las juntas entre dovelas. Motivo por el cual se debe garantizar la estanqueidad de la junta del anillo de dovelas y el faldón de la máquina tuneladora. Para ello, la tecnología empleada ha permitido lograr este efecto en las TBM utilizadas para la excavación de túneles, ya que los elementos responsables de garantizar que el mortero no fluya hacia el interior del túnel son una serie de bandas y cepillos perimetrales flexibles que consiguen cerrar el espacio entre el faldón y el anillo de dovelas, en donde la finalidad de esto es alcanzar un equilibrio de presiones uniforme y estable.
 - Con este principio, los escudos de presión de tierras balanceadas suelen hacer uso de juntas de grasa consistente, misma que tiene como finalidad servir de obstrucción o contención para evitar que la mezcla de mortero tenga influencia en el interior de la obra, o sea,

con esta inyección de grasa se logra realizar una serie de anillos perimetrales que alcanzan a impermeabilizar. Con dicha grasa se mantiene una sobre presión gracias al apoyo de contención de los cepillos metálicos que están instalados en la circunferencia del faldón, y que estos a su vez rozan la superficie exterior del anillo de dovelas conforme la máquina va avanzando. El proceso debe garantizar que la presión de grasa mediante impulsos debe ser mayor que la presión de mortero en el espacio anular, en otras palabras, la estanqueidad se debe lograr con la inyección continua de grasa consistente entre las filas de cepillos de acero instalados en la zona del faldón de la tuneladora.

- Volumen y presión de inyección de mortero: considerando el diámetro de excavación de la máquina y el diámetro exterior del anillo de dovelas, podemos tener un dato aproximado de volumen teórico del GAP -o también conocido como espacio anular-. La inyección de mortero es realizada de forma continua en la zona del faldón de la máquina, a medida que ésta avanza, lo cual implica poner mayor cuidado en el relleno del espacio anular para evitar complicaciones en el proceso constructivo.
- El volumen de mortero no debe exceder por mucho el volumen teórico, ya que, de lo contrario, este tema debe ser atendido de manera inmediata para poder detectar el problema que se está presentando en la zona de inyección, el cual puede ser indicativo de fugas de material -lo más probable es que se pudiese estar relleno algunas grietas presentes en el cadenamamiento en el que se realizan las actividades-. Lo mismo estaría pasando al momento de tener pérdida de presión, ya que esto representa seguramente fuga del material. A su vez, se debe verificar que la presión de inyección de mortero debe estar por debajo de la presión de inyección de grasa para garantizar que la mezcla de mortero no ingrese al interior de la excavación del túnel.

5.3.- Descripción de la máquina (EPB)

Las máquinas tuneladoras de tipo EPB -conocidas por siglas en inglés como Earth Pressure Balance- son consideradas como máquinas todo terreno o crossover, que por su versatilidad permiten el avance en cualquier tipo de material que puede encontrarse en el subsuelo. Además, dichas máquinas permiten la construcción de estas obras de manera rápida y segura, lo que conlleva que durante la construcción de un túnel urbano es indispensable llevar junto con el avance el monitoreo de los principales parámetros que influyen en la generación de los posibles asentamientos en superficie ocasionados por el paso de la TBM. Lo anterior se refleja en tener una mayor atención de manera puntual en la presión de tierras en el frente de excavación y la presión de inyección de mortero durante la salida del anillo del escudo. Estas dos etapas son consideradas las más críticas, mismas que se pueden desarrollar durante el proceso de ejecución de la obra.

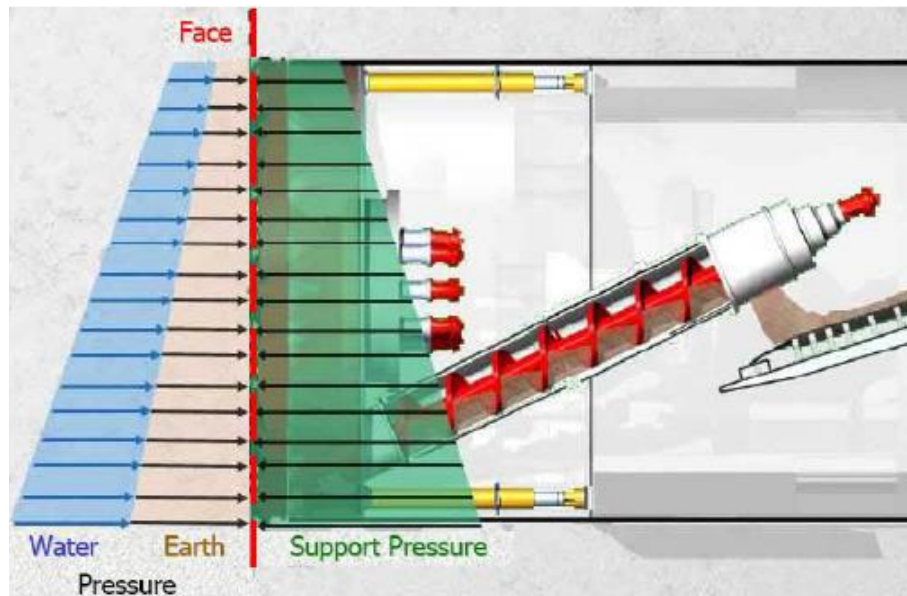


Figura 24.- Esquema de presiones ejercidas por el escudo sobre el frente, proyecto de tren eléctrico urbano línea 3 tramo subterráneo, trabajos relacionados con la SCT, tren de Guadalajara, Lytsa 2014.

Los escudos de presión de tierras son máquinas que prácticamente abarcan en su totalidad a la mayoría de los materiales. Sin embargo, son más empleadas en aquellos terrenos en los que por sus características suelen tener mayor riesgo de

inestabilidad, lo que las define que son aptas para tipos de suelos muy variados que presentan elementos arcillosos pasando por arenas y gravas. Las TBM de tipo EPB poseen un funcionamiento basado en emplear la rezaga o el material producto de la excavación –como relleno de la cámara de excavación y así poder proporcionar el sostenimiento necesario en el frente de trabajo-, lo que se puede interpretar como que el material excavado pasa a través de los cangilones y se comprime a medida que la cámara se va llenando, con el fin de alcanzar o igualar la presión que el propio terreno emite hacia la cabeza de corte.

Para ello, es importante y fundamental hacer un buen uso del material excavado, para que con éste se lleve a cabo un correcto funcionamiento de la máquina tuneladora, es decir, cumplir con el objetivo de conseguir la mezcla óptima (plástica y viscosa) que brinde la satisfacción de ciertos requerimientos como la impermeabilidad y la transmisión controlada de la presión en toda la sección del túnel. Así, también, el material de rezaga pueda ser manejado a través del tornillo helicoidal o, comúnmente, conocido como tornillo sin fin, el cual cumple con la función de despresurizar al material a medida que éste está siendo removido de la cámara de excavación de la máquina, lo que conlleva al empleo de ciertos aditivos como espumas, lodos, polímeros o, simplemente, inyección de agua en la rueda de corte para facilitar el manejo y corte del material en el frente de trabajo.

Para poder llevar a cabo la excavación de túneles mediante el empleo de las máquinas tuneladoras de tipo EPB, hay una serie de aspectos importantes que deben considerarse para la ejecución de las actividades de manera segura y evitando los riesgos posibles para llevar un control adecuado en la ejecución de las diversas etapas de la obra. Dichos aspectos están directamente relacionados con la parte de vigilar el funcionamiento de la máquina, ya que debe ser el más adecuado además de que las condiciones existentes en el terreno tienen que ser las más acordes a las previstas. Por otro lado, también se debe evaluar el comportamiento de la tuneladora con el fin de comprobar los parámetros principales que pueden tener mayor influencia en el terreno que está siendo excavado y en la superficie del mismo, dicho de otro modo, se deben controlar los pesos extraídos, las presiones de sostenimiento del frente, los volúmenes y presiones de relleno del GAP. Asimismo, considerar los aspectos

desfavorables para que no se corra el riesgo de tener pérdidas humanas ni materiales, y en caso de tenerlas, abordar inmediatamente cualquier elemento de riesgo y aconsejar de manera precisa sobre las medidas correctoras que sean de carácter necesario para prevenir cualquier situación comprometedora. Adicional a ello, se debe contar con un análisis de los datos recopilados en la excavación de cada tramo, para que con la interpretación de los mismos se tenga una cartera de soluciones y de mejoras para la excavación en los tramos subsecuentes.

Dentro de las características de las máquinas tuneladoras –básicamente- se consideran tres aspectos que suelen tener la mayor importancia en el desarrollo de las actividades que están directamente relacionadas con el proceso de excavación con tuneladora, ya que estas condiciones pueden llegar a tener gran influencia o reacción negativa en la generación de asentamientos durante el proceso de construcción del túnel. Esto se debe tener en mente para controlar y evitar los efectos negativos, lo que trae como consecuencia que los parámetros de control más importantes de una máquina tuneladora de tipo EPB sean: la presión en la cámara de trabajo, el volumen de material extraído y el volumen de mortero inyectado.

5.4.- Control y procesos de ejecución de las etapas de construcción

Debemos responder a una pregunta que es el parteaguas a estos procesos: ¿por qué controlar? Quizás la respuesta puede ser en apego al sentido común respecto a la seguridad del personal y con el objeto de asegurar la estabilidad del suelo en el que se están desarrollando las actividades, así como el minimizar los asentamientos presentes en la superficie y los efectos que se pueden ocasionar a los edificios e infraestructura superficial. He aquí la importancia de conocer y definir los valores principales o los parámetros de operación de las máquinas tuneladoras.

Es importante mencionar que la construcción de túneles tiene una gran influencia sobre las estructuras e instalaciones existentes, que a su vez estas mismas producen una limitación del uso del suelo para obras que en un futuro pueden ser consideradas para cubrir otras necesidades que demande la población para su desarrollo. Es por ello que se debe considerar la influencia que depende del funcionamiento estructural del túnel, ya que se puede llegar a determinar un

procedimiento constructivo que permite mantener como objetivo principal el brindar la seguridad de la construcción de la obra; considerando como puntos de partida y prioritarios para estos proyectos los objetivos generales de extremar la seguridad de la obra durante todas las etapas de ejecución. También se deben minimizar los asentamientos en superficie para evitar afectaciones en las actividades cotidianas de la población. Estos aspectos son los que de acuerdo a los procedimientos de construcción nos pueden brindar la certeza de realizar las actividades de la mejor manera para que las obras pueden alcanzar los objetivos planteados en la etapa de proyecto, y con ello alcanzar los procedimientos adecuados que nos permitan tener la satisfacción de cumplir con los objetivos. Es importante señalar que para alcanzar la ejecución más adecuada de construcción se deben conocer las etapas constructivas de un túnel empleando una TBM que obedece a lo siguiente:

- 1.-Construcción de accesos al túnel (lumbreras o tajos).
- 2.-Trabajos preliminares.
- 3.-Excavación de primeros metros.
- 4.-Excavación de metros subsecuentes.
- 5.-Excavación de últimos metros.
- 6.-Paso de lumbrera.

Además de tener los estudios previos correspondientes a la caracterización de la zona en la que se pretende realizar los trabajos de excavación, para que con esto se minimice a media de lo posible los casos que pongan en riesgo la ejecución de las diferentes etapas de la obra.

Cabe destacar que, en la parte evolutiva de supervivencia de la historia humana, su objetivo principal ha sido el adaptarse a las condiciones naturales bajo criterios de confort y seguridad para la realización de sus actividades, dando paso a cambios sumamente importantes que se han visto reflejados en los diferentes asentamientos de las manchas de población -que han cambiado al planeta a su antojo-. Esto lo iniciaron desde épocas muy antiguas al buscar sitios que sirvieron de refugio como cavernas, y que posterior a la evolución surgieron otros intereses en donde se

tornaron a sacar provecho de los bienes materiales que les brindó la naturaleza, empezando a excavar túneles con objetivos mineros y, posterior a ello, dieron paso a vías de comunicación. Por mencionar algunos, estos fueron algunos de los primeros objetivos que dieron paso a los grandes éxitos ingenieriles de nuestra historia. Sin embargo, mucho de estas primeras consideraciones se han tornado de una forma muy distinta y han cambiado la perspectiva de las condiciones de construcción en este tipo de obras de excavación, puesto que el desarrollo de las técnicas y la tecnología nos han dado la oportunidad de hacer grandes obras de las que ahora podemos tener un testimonio. Tal es el ejemplo de túneles que atraviesan mares, como es el caso del Canal de la Mancha de 50 km de largo, o de aquellos túneles que unen continentes, como el de Marmaray en Estambul.

Para conseguir todas estas obras magnificas de ingeniería es importante conocer cómo es que se abordan estos grandes proyectos -que han dejado un legado a la sociedad-. Como primer paso, se lleva a cabo el planteamiento geológico, el cual permite conocer con mayor nivel de detalle el terreno en el que se va a construir el túnel, es decir, definir qué tipo de materiales son los que conforman y cómo es que están estructurados; además de conocer los parámetros geotécnicos que permiten predecir cómo se van a comportar los materiales afectados por la excavación. Y para construir ambos modelos es necesario realizar varios trabajos de campo y de laboratorio que involucran otras actividades que están relacionados con ellos, como es el ejemplo de la cartografía geológica, la geofísica de superficie y ensayos de laboratorio obtenidas sobre muestras seleccionadas que fueran producto de sondeos mecánicos realizados en sitio. Por otro lado, el estudio del trazado del túnel, los sistemas de sostenimiento y revestimiento y la selección del proceso constructivo son algunos de los aspectos que deben ser estudiados para conocer las condiciones que conlleva la realización de estas grandes obras de ingeniería.

Por tal motivo, es indispensable contar con el conocimiento cercano de las condiciones del terreno en el que se pretende excavar y una aproximación del que será excavado. Con esta idea, es así como surge la acción vital de tener un control de procesos, ya que lleva a conocer con mayor precisión la interacción del terreno-TBM. Estas acciones traen como consecuencia el tener un monitoreo continuo y una

interpretación de datos que dan como resultado un eficiente control de procesos. Con esta idea surge la necesidad de buscar las herramientas que permitan tener una aportación al desarrollo de estas actividades, lo que trae como consecuencia a tener sistemas de monitoreo que sean más prácticos y tengan la oportunidad de evaluar toda la información generada antes, durante y después del proceso de excavación; el apoyo surge gracias a los softwares implementados en estas actividades y a los métodos especializados que han brindado la facilidad de integrar a la par las tareas.

Con los datos recabados en las diferentes etapas de construcción y en las del proyecto, las predicciones cada vez se acercan más a la realidad, lo cual brinda una mayor seguridad en llevar a cabo cada una de las etapas de ejecución de obra con mayor convicción, dando así la garantía de que las actividades se realicen de la mejor manera, ya que la información obtenida con anterioridad -gracias a la exploración geológica realizada- trae como consecuencia la realización de las fases previas al proyecto en tiempo y forma sin controversias. He aquí el gran apoyo de las máquinas tuneladoras, las cuales brindan al personal involucrado en las obras subterráneas la certeza de que las actividades se están realizando sin correr riesgo alguno. Así también, estas máquinas empleadas por su gran capacidad de registrar los datos proporcionan la oportunidad de analizar la información de una forma más completa trayendo como consecuencia la operación del escudo de una manera más eficiente.

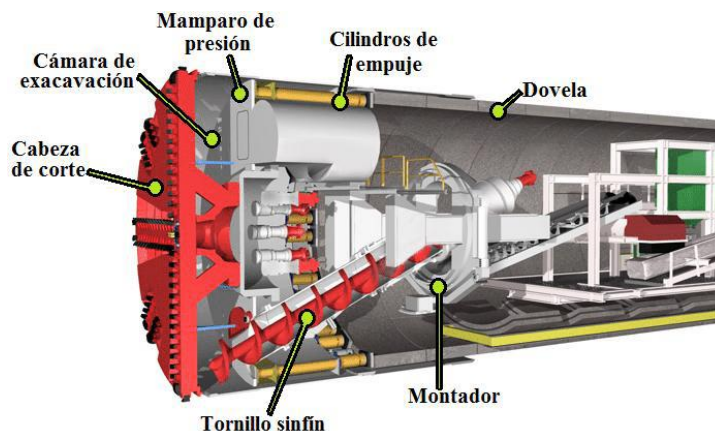


Figura 25.- Componentes de un escudo presurizado con tierra EPB. Recuperado de www.Herrenknecht.com.

5.5.- Medidas de mitigación de deformaciones

Los túneles representan obras de gran envergadura. Es por ello que el mantener el menor riesgo posible significa un gran objetivo a seguir, ya que esto representaría un enorme logro -que para poder alcanzarlo- se requiere de un proceso continuo y de seguir y acatar los documentos que han surgido para desarrollar la obra de la cual se está hablando. Y es que cuando se realiza el proceso de excavación en túneles, sobre todo en suelos blandos, se habla de algunos riesgos latentes que si no son tratados como se debe generarán un mayor impacto de lo esperado.

Un problema que se manifiesta en la excavación de suelos blandos es el efecto de las deformaciones a nivel estructural o de terreno. Para ello, es necesario contar con las bases indispensables para conocer las características del suelo. He aquí la importancia que toma el documento conocido como GBR (Geotechnical Baseline Report), el cual permite identificar las condiciones del terreno en el que se están desarrollando las actividades. Por otro lado, con estas bases y con la experiencia del personal involucrado se puede realizar una identificación de peligros y riesgos para tener un antecedente y así elaborar una cartera de soluciones ante esas contingencias. Así también, con la identificación de los mismos, se puede tener un conteo de los riesgos latentes a los que está sometida la obra; con ello se debe realizar un procedimiento de mitigación o eliminación, el cual debe cumplir con la solución oportuna para que los trabajos no demoren y pueda la obra continuar con las actividades de construcción. Por otra parte, se debe emplear un método que permita controlar los riesgos identificados antes y durante el proceso de ejecución de obra para que se pueda asignar responsabilidades que caigan dentro de los elementos componentes del contrato, es decir, que definan al dueño o al contratista como inmediato responsable a la solución de esas disputas.

Las deformaciones siempre están presentes en el proceso de excavación de túneles en suelos blandos, aunque cuando se emplea una TBM de tipo EPB, el efecto de este riesgo es minimizado, pero no está demás el mantenerse siempre con la previsión debida; y es que cuando se registra un riesgo de deformación éste debe ser ubicado, controlado, manejado y mitigado para que los efectos sean los mínimos. Las

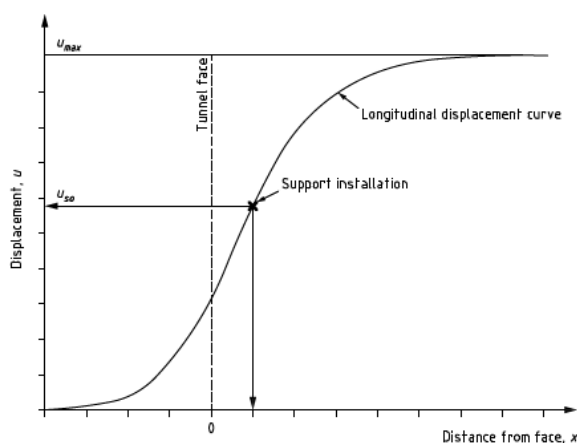
deformaciones del terreno en general son dependientes de los parámetros del suelo y del método que se emplea en la excavación del túnel.

Cuando las deformaciones se manifiestan de tal forma que sobrepasan aquellos límites que han sido definidos o indicados desde la etapa de diseño, es necesario definir un protocolo que permita contener alternativas las cuales, en muchas ocasiones, incluyen algunos cambios necesarios que combaten este problema. Tal es el caso, por ejemplo, de modificar el método de construcción; quizá en el empleo de las máquinas tuneladoras se puede pensar en agentes que ayuden a estabilizar el terreno circundante, en modificar la presión del frente de la máquina o en emplear espumas que permitan el avance de la máquina tuneladora; si las deformaciones afectan a la estructura de concreto, en este caso, a los anillos o dovelas, se pudiera pensar en un aumento en el espesor del revestimiento, para que con ello se tenga una mayor seguridad de sostenimiento. Y si el problema es muy severo se puede llegar a considerar en detener de manera temporal la obra, esto para que el problema no traiga consecuencias de afectaciones a terceros. La solución o mitigación de deformaciones se desarrolla de acuerdo a los siguientes pasos:

1. Verificar que la relajación del suelo no exceda los umbrales de seguridad definidos en la etapa de proyecto, para que la carga en el revestimiento no supere sus límites de soporte.
2. Ejecutar una campaña de reinyecciones del espacio anular entre terreno y dovela.
3. Seguir verificando el comportamiento deformacional.
4. Si se sigue deformando, prepararse para la colocación de marcos metálicos que contengan la deformación.
5. Verificar si el problema no es el diseño.
6. Pensar en colocar un revestimiento secundario.

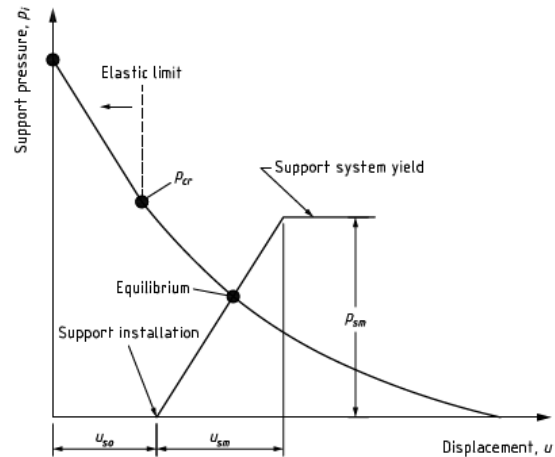
Otra manera de analizar el comportamiento de los túneles es mediante el método de convergencia-confinamiento, como se indica en el código de prácticas PAS-8810 (2016). El método indica una práctica que es posible efectuar mediante un

análisis, el cual permite esquematizar la interacción terreno-revestimiento, además de realizar los cálculos correspondientes al comportamiento específico de las obras subterráneas. Un ejemplo de ello es el que se muestra en la gráfica 1, en la que se recomienda la colocación del revestimiento en el punto en que el terreno haya alcanzado un desplazamiento permisible sin llegar a un grado de afectación para la estructura de sostenimiento ni mucho menos a la superficie. Es decir, en esta etapa juegan un papel importante los parámetros esenciales que obedecen directamente a las características del terreno, los cuales son: modulo elástico, criterio de rotura y la deformación post-rotura.



Gráfica 1.- Perfil de desplazamiento longitudinal. Anexo informativo C, método convergencia confinamiento en el segmento de diseño de revestimiento. Diseño de túneles, diseño de segmentos de concreto para revestimiento en túneles, código de prácticas, PAS-8810, 2016.

Con ello, se logra estudiar al comportamiento que da lugar en la zona de afectación, dicho de otro modo, se analiza una curva característica que permite tener una aproximación de la reacción del revestimiento o sostenimiento empleado. Con esta acción, el sistema de soporte deberá actuar en contra del proceso de redistribución de esfuerzos que dan origen a la generación de deformaciones impuestas en la zona del frente de excavación y en el terreno circundante al escudo. Para esto, la colocación del sistema de soporte será empleado en el momento en que éste trabaje con una rigidez constante, tal como se indica en la gráfica 2.



Grafica 2.- Curva de respuesta del suelo. Anexo informativo C, método convergencia confinamiento en el segmento de diseño de revestimiento. Diseño de túneles, diseño de segmentos de concreto para revestimiento en túneles, código de prácticas, PAS-8810, 2016.

Los desplazamientos originados deben ser considerados en cada una de las etapas que conlleva la construcción de la obra, así como se muestra en el siguiente diagrama.

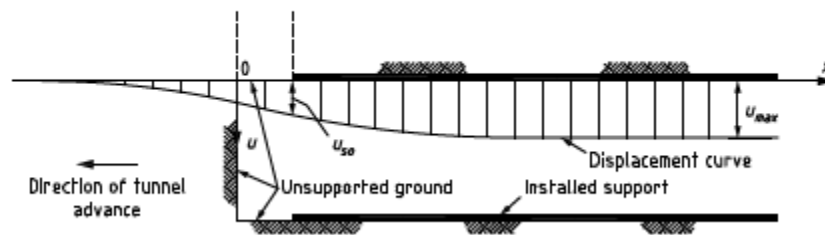


Diagrama 1.- Curva característica de apoyo. Anexo informativo C, método convergencia confinamiento en el segmento de diseño de revestimiento. Diseño de túneles, diseño de segmentos de concreto para revestimiento en túneles, código de prácticas, PAS-8810, 2016.

Es por ello que, en cualquiera de los casos, la interpretación y una adecuada lectura de los valores de las deformaciones presentes en alguna etapa de construcción dan la oportunidad de tener la facilidad de detectar las anomalías que son ajenas al terreno o propias del mismo. De tal manera que la medición de los elementos componentes de la estructura del túnel y del terreno son elementos de suma

importancia que deben ser considerados para tener un monitoreo adecuado y constante que permita garantizar la seguridad del personal involucrado y el buen servicio a futuro de la obra que se está realizando.

CAPÍTULO 6.- Manejo contractual

6.1.- Objetivo

Conocer la gestión de obra de túneles como sinónimo de administración -que debe incluir las mejores formas para tomar las decisiones precisas- que permitan llevar un proceso adecuado a lo que se refiere al desarrollo de las etapas de la obra. O sea, que el cuidado y la administración de los bienes materiales y el suministro monetario de la obra no exceda lo previsto, además de considerar que se debe dar una distribución y un uso adecuado de todos aquellos insumos que dan pauta al desarrollo de las actividades de ejecución de obra, sin olvidar los posibles efectos ocasionados por las decisiones espontáneas que pudiesen suscitar al momento que se esté realizando el proceso de construcción. Dicho de otra forma, la tarea fundamental del manejo contractual de obra es dirigir los recursos de manera adecuada, con el fin de poder alcanzar los objetivos previstos en su etapa de proyecto, sin olvidar los aspectos de importancia como la seguridad y el ambiente laboral en el lugar en el que se desarrolla la infraestructura. En pocas palabras, el manejo contractual de obra debe cubrir con los siguientes aspectos esenciales:

- 1.- Reducir costos (a veces sobre la mano de obra).
- 2.- Aumentar la productividad.
- 3.- Administración de la eficiencia.

El objetivo principal de estos tres aspectos fundamentales es permitir la detección y corrección de fallas, de tal forma que con ellos se cumplan las metas y objetivos propuestos en el arranque del proyecto, así como también se evite el uso indebido de los recursos asignados a la construcción de la obra programada.

6.2.- Ejecución y cumplimiento de los requisitos de contrato (desarrollo de contrato)

Es importante mencionar que las obras subterráneas representan un gran reto de ingeniería. Esto es, a medida que cobran mayor demanda en ambientes urbanos, implica coexistir con construcciones tales como edificios habitacionales, comerciales, de oficina, obras viales y servicios considerados dentro de las necesidades humanas. He aquí la importancia que para estos edificios se debe garantizar a como dé lugar que el desarrollo de la obra se realice de tal forma que ésta no tenga repercusiones en su estructura ni en la estética que caracteriza a cada una de estas obras desplazadas con anterioridad. Por tal razón, se deben fijar y cumplir con ciertas restricciones que salvaguarden la integridad de estos edificios, además de cubrir con todos los requisitos que éste demande. Tal es el caso de aquellos edificios que son considerados con un alto valor histórico, artístico, cultural o religioso, los cuales deben ser monitoreados con un seguimiento especializado, con el fin de llevar un correcto control que garantice la integridad de los mismos y, a su vez, recabar los datos necesarios con mediciones reales de los movimientos generados por la TBM empleada. Para ello, en la construcción de túneles, es requisito indispensable contar con un marco legal bastante generoso, con el fin de dar soluciones a las posibles controversias que llegasen a plantearse al momento de ejecutar las actividades para el proceso de construcción.

Sin embargo, el tema radica -en gran parte- en que los proyectos subterráneos desarrollados en suelos blandos -como es el caso de túneles- son obras que requieren de un enfoque técnico preciso que permita definir las grandes responsabilidades técnicas que demandan estas obras de infraestructura subterránea, así también éstas deben mantenerse bajo el régimen de un marco legal, el cual -en algún momento que se requiera y de ser necesario- se pueda hacer responsable de los actos a quienes así lo sean. Para poder lograr lo antes mencionado, es indispensable contar con experiencia y tener la mayor concentración en la preparación del proyecto desde un inicio, para que con ello se pueda tener una visión más amplia de los posibles eventos que pudiesen ocasionar situaciones comprometedoras o desfavorables. Es por ello que estas acciones deben estar reflejadas en un instrumento legal que permita tener un control en las actividades a desarrollar; el contrato de obra es el elemento

fundamental que dará la oportunidad de ejecutar las actividades, así como también, mediante el mismo, se deberá acatar de manera cabal con todos los requisitos que en éste se estipulen para así cumplir de la mejor manera con el desarrollo del proyecto.

Considerando que en el desarrollo de estas obras de infraestructura subterránea -realizadas en suelos blandos- se llegan a presentar ciertas controversias relacionadas en la ejecución de obra, sus efectos pueden ser tan trascendentes que quizás lleguen a ocasionar problemas severos -como deformaciones a la estructura del túnel-. Es por eso que se debe pensar en un plan de mitigación que logre consigo aplicar la técnica en conjunto con la experiencia, y que sea posible resolver los problemas presentes en la etapa de construcción, ya que al presenciarse subsidencias en el trazo del túnel, éstas pueden ocasionar hundimientos locales o superficiales perjudiciales para cualquiera de las estructuras cercanas al trazo del eje del túnel, lo que implicaría el emplear cláusulas en el contrato que permitan reaccionar ante estas contingencias.

Es por ello que en la ejecución del contrato se da el seguimiento continuo de las actividades que se desarrollan con el fin de cumplir con el objetivo ya que, al estar en relación con los múltiples elementos, éstos pueden llegar a entorpecer el proceso de construcción. Testimonio de ello se puede presentar al no haber desarrollado una exploración adecuada y el no tener una caracterización de las condiciones del suelo, lo cual puede generar controversias graves como situaciones de atasco para con la máquina tuneladora, en donde dichas situaciones deben estar relacionadas con un responsable que pueda tomar la decisión correcta para resolver el problema. Asimismo, se puede pasar por problemas técnicos de la máquina, aspectos hídricos como inundaciones o, en su defecto, problemas sociales que en algunas ocasiones detienen el avance de la obra que se ve reflejado en los tiempos muertos que al final del día impactan en los tiempos de culminación disparando el costo de la obra. Para esto, se deben estipular las cláusulas correspondientes en el contrato que permitan la solución de estos percances.

Cabe mencionar que en el desarrollo de las obras subterráneas aún hay muchos temas por resolver. Gran parte se deriva de la falta de entendimiento y experiencia del personal que es empleado en estos proyectos, además de la omisión

en el cumplimiento de los términos contractuales por falta de conocimiento al saber si estas cláusulas apoyan en el buen desarrollo de las actividades o solamente están entorpeciendo la realización de las mismas. Por otro lado, la influencia del sector público en estas obras también juega un papel importante, puesto que, por ser compromisos sociales, se empeñan en tener un desarrollo precipitado y, en su afán por culminar las actividades, dejan de acatar lo estipulado en el contrato. Si bien es cierto que todavía hay mucho por hacer, se debe empezar por echar un vistazo a la implementación de manera cabal de la disciplina contractual, la cual debe entenderse como todas aquellas herramientas que permitan cumplir con las acciones señaladas en el contrato. Lo anterior, con el fin de tener la solución a los problemas que se susciten en el proceso de construcción, para que con ello se pueda concluir de manera exitosa el proyecto sin la necesidad de tomar de otras herramientas ajenas a la obra que, lejos de dar continuidad, terminan en demoras impidiendo el sano desarrollo de las actividades involucradas.

6.3.- Solución de controversias mediante elementos legales

Es importante señalar que, con el objeto de considerar un elemento que sea el que brinde la oportunidad de tener una solución de controversias en el medio o el ámbito de la construcción, se han empleado diferentes formas de tener un control de estas actividades. En los años ochenta se dio el auge o surgimientos de nuevos elementos que pasaron a ser parte medular para el arbitraje comercial en el ámbito de la construcción pública y privada. Y es que si hablamos de un arbitraje en términos coloquiales, pasa a ser un medio alternativo de controversias que está sustentado particularmente en un acuerdo de dos partes o más que han decidido celebrar un contrato, en el que un equipo de expertos ha sido asignado y conformado con el fin de resolver los posibles problemas que se sometan a consideración. Este grupo de expertos tendrá el compromiso de emitir una decisión con la fuerza legal que le permita tener una sentencia para con alguna de las partes involucradas.

Esto –obviamente- sin dejar de considerar las características principales por las cuales surge este grupo de especialistas, que es ofrecer la solución de controversias en el proceso de construcción, aunque para alguna de las partes involucradas se llega a considerar que estas resoluciones pueden ser -en algunos casos- injustas, por el

grado de responsabilidad que consiguen tener en el momento en que la sentencia suele ser muy drástica. Y en otros casos, son consideradas como una inversión de tiempo que llegan a ocasionar retrasos en las etapas de construcción, por el hecho de que muchas veces la resolución de algunas controversias llega a tomar un tiempo considerado que afecta de manera directa a tener tiempos muertos en la ejecución de las actividades.

En este sentido, surge el grupo de expertos conocidos como los Dispute Boards o también llamados Paneles de Solución de Disputas o Mesas de Resolución de Controversias. Con la ayuda de este grupo, se han llegado a solucionar los problemas que se originan en un proyecto de construcción y, por ende, se procura que con esto se pueda concluir de manera exitosa el mismo. Esto no quiere decir que las partes involucradas tendrán la posibilidad de omitir las exigencias del proyecto sino, más bien, se trata de solucionar los problemas con las implicaciones o la asignación de responsabilidades que cualquier litigante sabe que debe hacer para cumplir con el objetivo de concluir con las actividades de las cuales son responsables. Como se mencionó, los Dispute Boards son un elemento de suma importancia quienes, con su aparición, dieron la posibilidad de solucionar los problemas presentes en las etapas de la ejecución de obra. Este panel está compuesto por tres o hasta cinco miembros ajenos y sin relación alguna con la obra, pero cumplen con la característica principal de tener un dominio y control de conocer y contar con experiencia de las actividades que se desarrollan. Estos miembros son nombrados por las partes involucradas en el contrato, con el fin de que este grupo o panel de expertos puedan resolver las controversias que se susciten en el tiempo en que se ejecute la obra.

Este panel de expertos debe cumplir con la particularidad de ser nombrados desde el inicio del proyecto para que conozcan de las actividades que serán realizadas; además, deben conocer el sitio en el que se desarrollará la obra, así como de los avances diarios. Estas condiciones no los compromete a permanecer en las instalaciones de la obra, pero a las partes sí los obliga a hacerles notar los elementos que cobran mayor importancia en la ejecución de los trabajos, de tal forma que ellos deben saber a detalle lo que está sucediendo. En el momento en que las disputas o controversias surgen, las partes involucradas activan este mecanismo con el fin de que

el panel encuentre la verdad de los hechos, y con ello emitir una solución efectiva en un corto plazo que brinde la resolución del tema en beneficio del proyecto. Esto viene a convertirse en una gran ventaja, ya que la solución es dictada dentro del plazo de ejecución del proyecto y no posterior con los beneficios que ello conlleva.

Por otro lado, como parte de los elementos de solución de controversias, surge el documento GBR que forma parte del contrato y que contiene una descripción minuciosa de las condiciones geotécnicas, esto con la finalidad de tener una forma de anticiparse a las controversias durante la construcción. Además de que, con la ayuda de este documento, se permite en gran parte asignar los riesgos relacionados con las actividades laborales, así también brinda la oportunidad de considerar las bases para poder realizar la preparación del presupuesto para participar en la licitación y su uso se amplía hasta la etapa de construcción. Esto último se debe a que, a través del mismo, también se logran establecer ciertas condiciones que son elementos vitales para la resolución de disputas. Por ejemplo, se establece que el contratista debe pagar por las condiciones que sean iguales o menos adversas que las establecidas en el baseline, además de que el propietario se hace acreedor de hacer su parte correspondiente por las condiciones más adversas que las establecidas por dicho documento, es decir, el objetivo de este texto será el traducir los resultados de las investigaciones geotécnicas con la ayuda de la experiencia para, que con ello, las descripciones de las condiciones del subsuelo sea lo más anticipado posible y así brindar seguridad para los licitantes. Con esto se logra establecer una declaración contractual precisa de las condiciones geotécnicas que se espera encontrar durante el proyecto de construcción, lo que se interpretaría como una evaluación de incertidumbres.

Dicho texto es una herramienta preparada por la entidad encargada de realizar las especificaciones técnicas -dando con ello la máxima responsabilidad de brindar los datos más confiables posibles- para que el proyecto sea conformado de acuerdo a las exigencias del terreno natural y teniendo como resultado un programa que permita incluir las contingencias que se susciten en la etapa de construcción. Además, la descripción adecuada del terreno permite al contratista tener la oportunidad de preparar un concurso de manera más segura y en apego a las condiciones que ayudan

a seleccionar la maquinaria, los métodos y los medios de construcción apropiados para ejecutar los trabajos durante la construcción. El empleo del GBR y el panel de expertos permiten desarrollar los trabajos de una forma más adecuada, ya que lo estipulado en el documento deberá ser lo más cercano a las condiciones naturales y cualquier situación diferente encontrada durante la ejecución de los trabajos dará la oportunidad de que los Dispute Boards entren en función y puedan tomar una decisión que solucione las disputas relacionadas a las condiciones localizadas.

CAPÍTULO 7.- Caso de estudio: excavación mecanizada en suelos blandos y sus repercusiones al sistema de sellos del faldón

Durante el desarrollo de este trabajo se decidió abordar un caso de estudio referido a la construcción de un túnel que dará servicio para el transporte de aguas residuales. Se trata de una obra de aproximadamente 6,508 m de longitud total y 7 m de diámetro que se localiza en el tramo definido por los cadenamientos 58+365 al 64+873. Como dato importante, cabe mencionar que la mayor profundidad se encontró hacia el cadenamiento 62+305 con una cobertura de 45 m, medida a la clave del túnel. Por otro lado, se consideró una presión de frente calculada de 2 a 2.5 bar, un volumen teórico calculado en el espacio anular de 8.5 m³ y una presión de inyección de mortero definida en el proyecto ejecutivo igual a 1.5 bar.

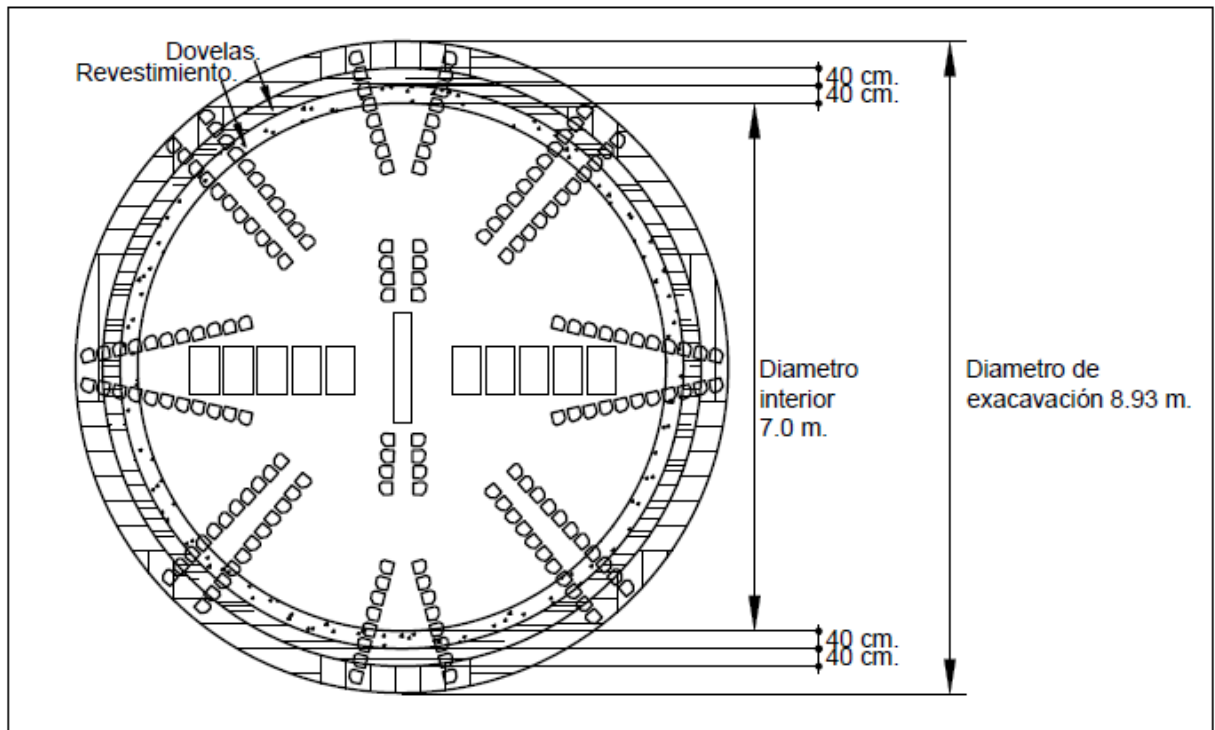


Figura 26.- Sección tipo de túnel fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a los resultados para la caracterización geológica del material presente en el área donde se realizaron los trabajos de excavación, se llegó a identificar que la sucesión estratigráfica donde será excavado el túnel coincide con las siguientes características. Desde la base hasta la cima -de acuerdo al estudio realizado- se encontraron depósitos profundos en donde predomina la arena limosa con intercalaciones de arcilla, limos y arenas. En un estrato superior se logró identificar una serie arcillosa compuesta –principalmente- por arcilla pre-consolidada de consistencia dura a muy dura; dentro del área de capa dura se identificó una arena media limosa y limos; en estratos superiores la composición del material es consistente con una serie arcillosa, la cual está principalmente formada por arcilla blanda a firme y limos de alta plasticidad, con intercalaciones de lentes y capas de limo-arenoso. Por último, el estudio arrojó una costra superficial formada por suelos limo-arenosos endurecidos por secado.

Adicional a las características del material y a la definición y clasificación de los suelos presentes en esta zona de trabajo, se identificaron en el sitio un par de fallas geológicas que tienen injerencia en el trazo del túnel, las cuales obligaron a los trabajos

a realizarse de manera más cuidadosa en estas zonas de afectación, puesto que en el tramo comprendido entre los cadenamientos 60+000 al 60+560 se identificó una falla normal casi paralela al trazo del cuerpo del túnel, donde fluye agua de los escurrimientos superficiales perennes.

7.1.- Reporte tipo de control de procesos para la excavación de suelos blandos

Debido a las características definidas por el reporte geológico, fue indispensable recomendar que se diera seguimiento preciso de acuerdo a las condiciones geotécnicas definidas en el reporte. Esto para que en los frentes de excavación se pudiese valorar la calidad del material que se presentó en cada uno de los avances de la máquina tuneladora, es decir, que, de acuerdo a la alteración, humedad y estructuras de los estratos, éstos no presentarán mayores complicaciones para realizar los trabajos relacionados con la excavación del cuerpo del túnel.

La excavación del cuerpo del túnel se realizó dentro de las capas de terreno comprendidas entre la serie arcillosa inferior y los depósitos profundos, para lo que fue necesario e indispensable implementar un control en el proceso para la construcción de esta obra subterránea, con el cual se requirió contar con un reporte que permitiera registrar los datos principales que forman parte vital del desarrollo de las actividades. Tal es el caso del tiempo de penetración o de excavación de la máquina, las presiones de frente, el volumen inyectado de mortero, la presión de inyección del mortero, el torque de la rueda de corte, los impulsos de la grasa y la presión con la que ésta se está inyectando en la zona del faldón. Para ello, fue conveniente llevar un control de estos parámetros en un reporte emitido semanalmente con las siguientes características que se muestran en la tabla 6.

Con dichos datos se pudo llevar un trabajo preciso de monitoreo que ofreció la posibilidad de mantener un control en el comportamiento del material excavado y, con ello, poder detectar las posibles anomalías en el mismo. Con estas anomalías se hace referencia a deformaciones de la sección al interior del túnel que ponen en riesgo su construcción y estabilidad, así como las deformaciones presentes en la parte

superficial, que de presentarse este problema debió ser monitoreado con los puntos de control colocados en la superficie, de tal forma que se garantizará la integridad de los elementos colocados en superficie, es decir, que no hayan sufrido daños o movimientos inesperados que afectaran directamente o inutilizaran las mediciones.

Tabla 6.- Reporte tipo de control de procesos

LOGO DE LA EMPRESA.	Control de Procesos: "Nombre de la obra"			
	"Numero de tramo y nombre de la maquina". REPORTE SEMANAL			
Fecha:	Entrega o elaboración del reporte		Reporte Semanal	
Anillos:	Inicial XXXX	Final XXXX	Posición sensores	Líneas de grout
Producción total:	Total de anillos colocados			
PK:	Inicial X+XXX	Final X+XXX		
Distancia recorrida:	XXXX			
Autor:	Felix Octavio Segura Meneses			
AVANCE - GEOLOGÍA 			Líneas de Inyección de Sello Líquido 	
			Articulación Shield Articulation Cylinders 	
Items evaluados	Evaluación	Tendencia cualitativa	Observaciones	Gráficas
Tiempos		-	La velocidad media de excavación asciende a 35 mm/min, con un máximo de 52 mm/min. Tiempo medio de excavación 40 min por avance. Tiempo medio de colocación de anillos: 35 minutos; Tiempo medio para ciclo completo: 88 minutos.	COLOCAR LA GRAFICA DE TIEMPO DEL CICLO.
Presiones de frente		=	Los sensores EP1 y EP6 colocados a nivel de clave, registran importantes variaciones.	COLOCAR LA GRAFICA DE LECTURAS DE SENSORES EN LA CAMARA DE EXCAVACIÓN.
Volumen de mortero		=	Se esta registrando un volumen de concreto inyectado de 11.4 m3 y el volumen maximo registrado asciende a los 13.2 m3.	COLOCAR LA GRAFICA DE VOLLUMENDE MORTERO INYECTADO.
Presión de mortero		=	Las presiones de inyección varían entre 1.4 y 3 bar; lo cual está por debajo de la presión de inyección de sello líquido.	COLOCAR LA GRAFICA DE INYECCIÓN DE MORTERO.
Torque rueda de corte		=	Se registra una media de 2.3 rpm; torque promedio de 1.6 MNm y con una media para la fuerza transmitida a la cabeza de corte (empuje de los gatos) de 4881 kN.	COLOCAR LA GRAFICA DE VELOCIDAD DE ROTACIÓN Y PENETRACIÓN.
Impulsos de grasa		=	Se registra una inyección constante, para todos los casos y por cada zona de inyección, de 310 impulsos promedio por aillo.	COLOCAR LA GRAFICA DE GRASA EN EL FALDON Y LOS IMPULSOS DE INYECCIÓN.
Presión de grasa		=	Presiones de inyección, de 3 a 11.6 bar.	COLOCAR LA GRAFICA DE PRESIÓN CON LA QUE SE ESTA INYECTANDO LA GRASA EN EL FALDÓN.
Particularidades				
COLOCAR LOS COMENATRIOS RELEVANTES QUE SE HAN REGISTRADO EN EL PASO POR ESTE TRAMO DE TRABAJO.				

Nomenclatura Evaluación:		Nomenclatura Tendencia:		Manejar un código de colores que permita señalar las acciones críticas para poner cuidado y mejorar de alguna manera las que se están ejecutando correctamente.
■	Operación deficiente	=	Sin cambios	
■	Operación regular o mejorable	+	Mejora	
■	Operación correcta	-	Empeoramiento	
■	Fallo lectura sensores o fallo mecánico			

Con este registro se llevó un control de las actividades medulares del proceso de ejecución de obra. En los parámetros mencionados en esta tabla se consideraron los datos que ayudaron a la parte técnica y a la gerencia de obra a tener el respaldo de la información del proyecto que fue generado durante las actividades de construcción.

Para ello, en la evaluación del comportamiento del túnel es necesario conocer, entre otros aspectos, las propiedades geotécnicas del terreno, así como los parámetros de control que permitan desarrollar las actividades de una forma adecuada. Dichos parámetros indispensables que se recomiendan en este proceso son los siguientes:

Tabla 7.- Parámetros considerados en suelos blandos

Nombre del parámetro	Rango de aplicación	Justificación
Tiempo de ciclo completo	De 75 a 90	Este considera: excavación (empuje)+colocación de anillos+inyección del espacio anular. En conjunto, debe ser no mayor a 90 minutos con la intención de garantizar el fin de obra de acuerdo con el programa de obra estipulado.
Presiones de frente	De 1-3.5 bar aproximadamente	La presión del frente de trabajo debe ser superior en 0.5 a 1 bar por arriba de la suma de la presión hidrostática + la presión de tierra. Por lo tanto, la presión de trabajo puede variar en función de los valores particulares para cada proyecto.
Volumen de mortero	De 8.5 m ³	El volumen de mortero puede variar en función de las características del terreno excavado como son: rellenos, grietas o cavidades. De este modo, el primer criterio debe ser verificar que se está inyectando el volumen teórico requerido. El segundo

		<p>criterio, considerar a la presión de inyección de mortero definida en el proyecto ejecutivo.</p>
Presión de mortero	De 1 a 3 bar	<p>La presión se define en el proyecto ejecutivo de excavación y ésta se deberá tomar como segundo criterio para la correcta inyección del mortero en el espacio anular.</p>
Torque rueda de corte	De 2.5 a 4.5 MNm	<p>Este rango de torque es típico en la excavación de suelos blandos, y la variación de éste dependerá de lo siguiente: de las condiciones físicas de las herramientas de corte, de la pegajosidad del terreno y de posibles intercalaciones con otros materiales -como puede ser roca-. El torque, por lo tanto, es un indicativo de cambio geológico y/o de deterioro de las herramientas de corte.</p>
Impulsos de grasa	De 280 a 320	<p>La cantidad de impulsos de grasa requeridos para garantizar un sello líquido adecuado está definida por el fabricante y no puede ser menor a la cantidad de impulsos indicada, ya que de otro modo se podría ocasionar un ingreso de agua de la formación o del mortero que sirve para el relleno del espacio anular.</p>
Presión de grasa	De 3 a 11 bar.	<p>La presión de grasa es un parámetro muy importante porque su control permite garantizar que el mortero que se usa para rellenar el espacio anular no ingrese a las zonas de los cepillos y tampoco al interior del túnel. Esta presión debe ser superior -al menos- en 0.5 bar respecto de la presión de mortero. Si no se lleva a cabo un buen control de este parámetro se puede ocasionar un daño prematuro a los cepillos, así como el ingreso de mortero y de material al frente de excavación. Si esto sucede, se debe realizar una reparación de los cepillos -que si no se desarrolla en la lumbrera- puede durar del orden de tres semanas impactando negativamente en el programa de construcción del túnel.</p>

La tabla es un indicativo que permitió definir a los tiempos como elementos de suma importancia para el proceso de planeación y administración del proyecto, ya que con ello se requiere de la estimación de duración de las actividades relacionadas con la obra, lo que conlleva a la ejecución de cada una de las actividades propuestas

durante la etapa de gabinete y, por ende, en la ejecución del cronograma. Lo antes mencionado se llevó a cabo con el fin de llegar a la determinación de las actividades técnicas del proyecto, así como entre otras tareas que corren a cargo de la administración del mismo; lo que pudo definir como objetivo principal la comprobación de duración del proyecto, es decir, con la certeza de que cada una de las actividades se realizaron de la mejor manera, tratando de cubrir con la proyección del tiempo programado que fue considerado en el arranque. En este sentido, en el proceso de construcción de túneles, el tiempo está en apego con la velocidad de excavación y con la colocación de anillos de dovelas, lo que permite tener una idea del tiempo de trabajo y avance que se tendría en cada jornada laboral, mismos que nos ofrecen la oportunidad de estimar la duración requerida para llegar a la culminación de obra, así también corroborar si con ese avance por jornal es el adecuado para concluir con lo establecido en el programa de obra.

Las presiones de frente de excavación es un tema que trajo consigo la necesidad de establecer en la cámara de mezclado del escudo de presión de tierras la manera de garantizar dos aspectos de suma importancia: el primero de ellos se refiere a la estabilización del frente de excavación, el segundo es considerar que los movimientos inducidos por la excavación sean admisibles por el entorno en donde se realizan los trabajos. En otras palabras, los métodos que se han aplicado en la práctica de este tipo de obras subterráneas han brindado la oportunidad de establecer la presión de trabajo en la cámara de excavación, la cual han conseguido debido a la experiencia adquirida en zonas en donde el terreno ha sido un medio complejo de manejar, y que a su vez ha permitido -de alguna manera- ir ajustando dicha presión dependiendo de las condiciones del terreno y de su entorno, así como de los parámetros de trabajo del escudo. Dicha presión ejercida por el terreno hacia la rueda de corte debe ser abatida con una reacción de presión mayor que emite el mecanismo del escudo, en donde ésta debe estar 0.5 a 1 bar por encima de la presión ejercida por el terreno. Para la medición de estas fuerzas ejercidas por el terreno, la máquina EPB en su cámara de excavación está acondicionada con seis sensores que permiten registrar estos datos, y que a su vez dan la oportunidad de tener el manejo adecuado para contrarrestar las fuerzas que se ejercen en el frente.

Otro parámetro básico que debe ser identificado de manera precisa es el volumen de mortero y la presión de inyección de mortero. Teniendo en cuenta el diámetro de excavación de la máquina y el diámetro exterior del anillo de dovelas, obtenemos el volumen teórico del GAP -también conocido como espacio anular-, ya que en el proceso la inyección de mortero es realizada de forma continua por parte del faldón de la máquina a medida que ésta avanza, por tal motivo se requiere de garantizar el relleno del espacio anular.

Dadas las circunstancias, si el volumen de mortero excede por mucho el volumen teórico, éste debe ser atendido de manera inmediata para poder detectar el problema que se está presentando en la zona de inyección, ya que en alguno de los casos la inyección de mortero puede estar fluyendo por otras zonas, y esto suele ocasionar mayor inversión de insumos que no han sido contemplados durante la etapa de proyecto. Por ende, a nivel administrativo, pudiese ocasionar que se inicie a encarecer las actividades dentro de esta etapa de construcción, lo que se manifiesta en un impacto directo para el constructor, puesto que, al tener estas fugas de material, lo más probable es que se pudiese estar relleno algunas grietas presentes en el cadenamamiento en el que se realizan las actividades. Lo mismo estaría pasando al momento de tener pérdida de presión, ya que esto representa un riesgo de fuga del material, para ello se debe constatar que la presión de inyección de mortero debe estar por debajo de la presión de inyección de grasa, primeramente para garantizar que la mezcla no ingrese al interior de la excavación del túnel y, por otro lado, también asegurarnos que cuando se tengan estas controversias se deben realizar las actividades adicionales que permitan corroborar que dichos espacios anulares están siendo rellenos de manera consistente. En otras palabras, cuando se tienen estos problemas se deben hacer extracciones de núcleo para verificar que efectivamente el GAP esté siendo relleno de manera adecuada.

Otro de los parámetros de mando de la tuneladora es el parámetro respuesta denominado como torque. Éste se da en función a la dificultad que encuentra la rueda de corte al excavar diferentes materiales. Mientras que en suelos el torque es normalmente alto, en roca sana es bajo; en el primero de los casos, el torque es alto porque existe mayor fricción entre la rueda de corte y el terreno. Con ello se involucran

los aspectos de velocidad de avance, que es medida directamente por la elongación de los gatos de empuje en un determinado tiempo, es decir, en mm/min. Estas actividades están directamente relacionadas con el empuje, que al final del día es parte de la respuesta a la velocidad que se pretende alcanzar. Asimismo, dentro de estos criterios se tiene como parte conjunto de estas actividades la penetración, que en efecto resulta de la velocidad de avance y la velocidad de rotación de la rueda de corte (torque), lo cual pudiese estar definida como la traslación de las herramientas de corte en la dirección longitudinal que es recorrida durante un giro completo realizado por la cabeza de corte en mm/rpm.

Un tema de suma importancia que debe ser atendido a medida que se realizan las actividades de relleno del espacio anular mediante el método de inyección continua, es evitar a cualquier forma que el mortero vuelva a entrar en el túnel por la cola o faldón de la tuneladora o, bien, por las juntas entre dovelas. Motivo por el cual se debe garantizar la estanqueidad de la junta del anillo de dovelas y el faldón de la máquina tuneladora. Para ello, se ha desarrollado la tecnología adecuada que ha permitido lograr este efecto en las TBM empleadas para la excavación de túneles, ya que los elementos responsables de garantizar que el mortero no fluya hacia el interior del túnel son una serie de bandas y cepillos perimetrales flexibles que consiguen cerrar el espacio entre el faldón y el anillo de dovelas, en donde la finalidad de esto es alcanzar un equilibrio de presiones uniforme y estable. Dado a esto, los escudos de presión de tierras balanceadas suelen hacer uso de juntas de grasa consistente, misma que tiene como finalidad servir de obstrucción o contención para evitar que la mezcla de mortero tenga influencia en el interior de la obra. En otras palabras, con esta inyección de grasa se logra realizar una serie de anillos perimetrales que alcanzan a impermeabilizar al menos con las líneas de grasa consistente. Con dicha grasa se mantiene una sobre presión gracias al apoyo de contención de los cepillos metálicos que están instalados en la circunferencia del faldón, y que éstos a su vez rozan la superficie exterior del anillo de dovelas conforme la máquina está avanzando. Es preciso comentar que al ser más grande el cilindro exterior de la máquina tuneladora con respecto al anillo de dovelas, el proceso debe garantizar que la inyección de grasa mediante impulsos debe ser mayor que la inyección de mortero en el espacio anular,

considerando que las TBM de tipo EPB disponen en el faldón a las juntas de grasa, es decir, son tres filas de cepillos de acero, entre las cuales se inyecta grasa consistente con el objetivo principal de conseguir la estanqueidad.

Dentro del reporte es necesario destacar que para poder alcanzar un eficiente control de procesos, es indispensable incluir los umbrales de seguridad que garanticen un revisión, prevención o, de ser posible, corrección de las actividades que se están desarrollando mediante la nomenclatura de evaluación, la cual permite identificar los puntos clave que, de no ser atendidos, pueden ocasionar eventos catastróficos que se pudiesen lamentar, dando con ello en el peor de los casos la cancelación del proyecto que se está ejecutando.

7.2.- Implicaciones de los parámetros clave

Con la información recopilada en los diferentes procesos de excavación, se identifican los siguientes parámetros clave que suelen ser los principales para desarrollar el proceso de construcción de túneles mediante el empleo de una TBM. Dichos parámetros son altamente importantes para prevenir y evitar la generación de asentamientos, motivo por el cual el ingeniero encargado de la obra debe estar consciente de lo que puede llegar a afectar directamente si éstos no son manejados adecuadamente, mismos que derivado también de las condiciones geológicas y de las prácticas de construcción de los sistemas actuales, tienen mucho peso para evitar disputas relacionadas con los asuntos geotécnicos y de operación.

Es por ello que en el desarrollo de este trabajo se incluye el análisis de los siguientes parámetros clave, los cuales son: tiempos de avance, presiones de frente, volumen de mortero, presión de mortero, torque de la rueda de corte, impulsos de grasa y presión de grasa. Con estos elementos, los sistemas actuales han tenido la oportunidad de proveer los argumentos necesarios para llegar a un arreglo de controversias que han surgido durante la ejecución de obra. Por ende, las soluciones han iniciado después de que las disputas han aparecido, pero con ello no se ha llegado a una resolución contundente, sino solo a un arreglo y no a la satisfacción total de la disputa. Sin embargo, aunque esto puede tratarse en temas sumamente técnicos, también deberán ser considerados en una nueva etapa que pueda estar respaldada

por asuntos asociados con la interpretación y exploración geotécnica, planes y especificaciones, así como también con el contrato de construcción. Es decir, el objetivo principal que está relacionado con esta situación es evitar controversias que estén asociadas con las condiciones geotécnicas y de operación, lo que significaría que se debe ofrecer un estudio de caracterización geotécnica que garantice las condiciones presentes en el sitio, con el fin de establecer el comportamiento de los materiales naturales y su alteración con el proceso de construcción. Y así, con ello, se pueda llegar a un presupuesto que prevea las posibles actividades extraordinarias que pudiesen ser motivo de aplicarlas a medida que las condiciones del terreno así lo ameriten.

Por otro lado, es preciso comentar que se debe contar con una base técnica, suficiente e identificable que permita preparar en condiciones previstas interpretaciones geotécnicas, evaluaciones de comportamiento y presupuestos de actividades extraordinarias -si así lo solicitasen para resolver las necesidades que surgen en el momento de la construcción de la obra-. Dicho de otra manera, mediante la ayuda de un panel de expertos que permita en circunstancias -donde los problemas manifestados requieren de una solución inmediata-, ellos pudiesen acelerar el proceso estableciendo las condiciones necesarias para llegar a establecer las reglas geotécnicas y el comportamiento del ingeniero, así como también de los propietarios. En otras palabras, que las soluciones tengan el objetivo de reparar los problemas que han suscitado, dando con ello la aparición de conferir las responsabilidades mediante los diversos métodos tales como de adjudicación para arbitraje, mediación, juntas de ajuste de disputas y tribunales. Dichas soluciones llegan a ser demasiado costosas, se les invierte mucho tiempo y crean un ambiente hostil entre las partes involucradas, lo que significa que el sistema no puede cambiar con arreglos temporales o parciales, sino que se debe seguir una traza que permita evolucionar al medio en el que se desenvuelven las obras subterráneas. Dentro de este marco se relacionaron otros parámetros clave importantes que brindan un buen funcionamiento a la máquina, y además permiten el monitoreo de la misma, con el fin de realizar las actividades de una forma más eficiente; se considera el estudio de este caso práctico relacionado con la junta de grasa y los cepillos metálicos para la estanqueidad del escudo.

En la mayoría de los procesos de excavación, en los que se tiene como objetivo principal la construcción de un túnel en suelos blandos, es importante mencionar que la actividad esencial es rellenar el espacio anular o GAP -de manera inmediata- con el fin de evitar asentamientos que puedan causar daños en la estructura o sostenimiento del túnel, así como evitar alteraciones en el espacio superficial del lugar en donde se desarrolla la obra. Para ello, el sistema de cepillos juega un papel muy importante, así como la inyección de grasa en la parte intermedia de estos elementos. Por ende, presentar alteraciones en la inyección de grasa, o sea, que los impulsos de inyección estén por encima de lo programado, representa un problema que puede repercutir de manera drástica en los insumos empleados en esta actividad, y se estaría reflejando en un incremento en los costos, además de que se corre el riesgo de tener una filtración de material de mortero hacia el interior de la obra. Por otro lado, se daría una pérdida en la grasa consistente; el material de la mezcla de mortero también estaría sufriendo estragos de pérdida respecto a estos errores de operación, puesto que éste fluiría hacia otros lados, ocupando espacios que no debería ocupar, ocasionando pérdidas de este material.

Para ello se debe mantener un buen funcionamiento en los sensores que permiten medir la presión de la grasa para que con éstos se pueda detectar el problema de inconsistencia que se pudiese presentar por la mala ejecución de las etapas de construcción. En otros términos, la presión de grasa en el faldón debe llevarse mediante un registro controlado, ya que con ello se demuestra que la presión de grasa está por encima de la presión de la mezcla de mortero; si en un caso extremo se detecta que existe una falta de inyección en alguno de los anillos, esta acción es la prueba fehaciente de lo que conlleva a tener presiones bajas en la cámara de grasa de la parte del faldón, lo que significa que si ésta se encuentran por debajo de las presiones de mortero, representan un riesgo para la obra, motivo por el cual se deben seguir con base en la experiencia los criterios adecuados de solución de estas controversias. Como consecuencia de esta situación, se puede traer consigo una reducción en la velocidad de excavación, lo que significaría que existe una posible entrada de mortero y/o agua por el faldón. Este problema también puede agravarse por la articulación de la máquina, puesto que en la parte inferior del escudo -por efecto

de arrastre- se llega a manifestar una abertura considerable que puede ocasionar que la máquina se atasque, ya que esta abertura conforme avanza se puede ir acrecentando y llegar a complicaciones tales como un posible atasco, así como se muestra en la siguiente imagen.

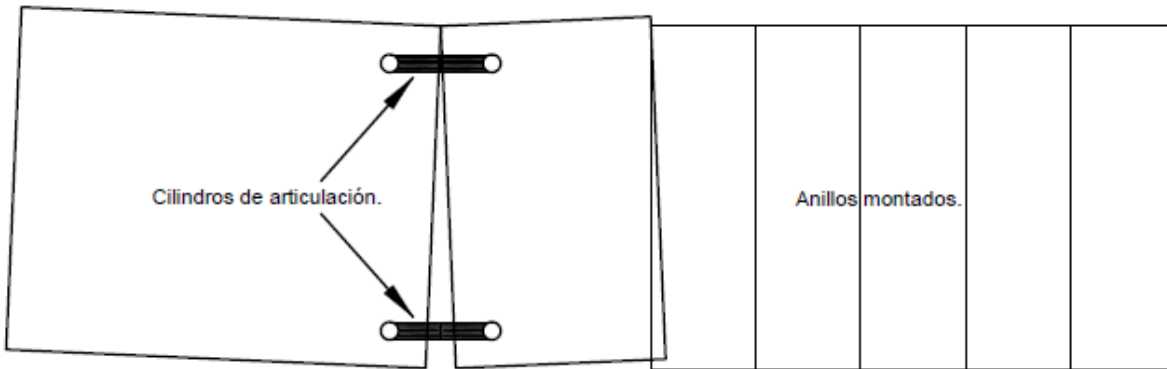


Figura 27.- Elongación de los cilindros de articulación.

Este efecto por operación de las actividades puede traer consigo consecuencias graves, tal es el caso de averiar los cepillos, provocar obstrucciones por taponamiento -que pueden reflejarse en tareas adicionales, tales como intervenciones de mantenimiento o reparación en el sistema de cepillos metálicos-, ya que al resultar averiados y presentar un mal funcionamiento en el desempeño del escudo, se afecta directamente al programa de obra, o sea, se incrementan los tiempos de ejecución de las etapas de construcción.

Un tema de gran importancia que no debe pasar desapercibido es el correspondiente al acondicionamiento del terreno, ya que, mediante los estudios realizados por la geotecnia, permiten analizar las condiciones del terreno y cómo es que éste se comportará durante el proceso de excavación como en el momento de su vida útil durante un largo plazo. Aunque en estricto rigor, las máquinas EPB están diseñadas para trabajar en un medio de suelos cohesivos -con un cierto contenido de finos-, con el fin de poder ser extraídos a través del tornillo sin fin o helicoidal sin perder la presión de confinamiento que da estabilidad y sostenimiento al frente de excavación, y al verse que estos materiales no cumplen con los requisitos indispensables, se

requiere de la adición de agentes acondicionadores que puedan llegar a cumplir con lo solicitado.

Para ello, el uso de espumas tensoactivas pueden ser la solución para los problemas de remoción del material excavado, ya que éstas podrían ser utilizadas para crear un amasado capaz de conseguir y mantener la presión que permita equilibrar las fuerzas necesarias en la cámara -y también con ellas se pueden prevenir las presiones excesivas-. El efecto que producen estas espumas con la creación de pequeñas burbujas en el amasado alcanzan el mismo objetivo que en las máquinas de lodos; la espuma también es un elemento que permite lograr un comportamiento geológico de los suelos, a saber, crean una reacción adecuada entre el esfuerzo y la deformación en el material excavado. Esto quiere decir que las principales características de las espumas son:

- Fluidificación por efecto de las tensiones superficiales. Las partículas del suelo no están unidas entre sí por efecto del agua.
- Repulsión electrostática que pueden separar las partículas por la acción de fuerzas electrostáticas.

En este sentido, cada tipo de suelo, considerando desde las arcillas rígidas a gravas arenosas, requieren de su propio tipo de espuma con el objetivo principal de conseguir la máxima efectividad, lo que conlleva como requisito indispensable el realizar ensayos de laboratorio que permitan definir las características del suelo y su correcta modificación para conseguir lo esperado. Cabe mencionar que, con el objetivo de acondicionar el terreno excavado, también se pueden emplear polímeros, los cuales son utilizados cuando la presencia de agua en el terreno es elevada o de forma antagónica. Si el terreno presenta poca cohesión, la actividad que desempeñan las espumas representan un efecto insuficiente para un mejor rendimiento de la máquina teneladora. Por lo que ante estos casos se requiere del empleo de inyección de polímeros por los mismos puntos por donde se inyectan las espumas; para los efectos buscados de mejoramientos de la mezcla excavada, se clasifican dos tipos de polímeros que pueden ser empleados para obtener la mezcla correcta que pueda ser extraída del frente de trabajo:

- Los que desecan los suelos líquidos. Es decir, aquellos suelos que tienen una gran presencia de agua y que se requiere de transformar a ese cuerpo líquido en un material plástico que permita ser transportado como un sólido moldeable, y que posibilite adicionalmente regular la presión que confina al material excavado en el frente de trabajo a través del tornillo sin fin.
- Los que estructuran el suelo. Son útiles para aquellos terrenos que son carentes de cohesión interna; el efecto que producen estos polímeros son similares a la acción de pegar las partículas componentes del material que está siendo excavado, de tal forma que éste adquiera la composición de una masa suelta que cuenta con cohesión, y que además a este efecto, esta masa puede ser moldeable con una suficiente plasticidad que ayuda a transportar al material producto de la excavación.

7.3.- Conclusiones y recomendaciones

En la excavación de obras de gran envergadura -como lo son los túneles-, tienen la generación de una serie de movimientos que se manifiestan directamente en el terreno, lo que ofrece la posibilidad de ocasionar un desequilibrio tensional en el suelo, significando que se deben considerar los elementos estructurales indispensables cercanos a éste, motivo por el cual el diseño y ejecución de las actividades que conlleva a la construcción de un túnel requiere de un conocimiento exhaustivo del comportamiento del terreno circundante afectado por la excavación.

Las condiciones geológicas juegan un papel muy importante en el desempeño de las máquinas tuneladoras, ya que las características de los materiales es el objetivo principal para que se adapte la TBM y pueda realizar un trabajo adecuado que permita lograr los objetivos planteados en la etapa de proyecto. Es por ello que, para conseguir que muchas suposiciones tengan el sustento suficiente para alcanzar que la obra avance de manera adecuada, deben pasar por diversos filtros que permitan detectar las condiciones desfavorables, tal es el caso de la calidad de exploración de las condiciones geológicas.

Cabe mencionar que cuando el proceso de excavación se realiza mediante el empleo de una TBM de tipo EPB, se requiere que las condiciones del suelo permitan ser amasados con la finalidad de que éstos puedan ser extraídos con mayor facilidad, lo que significa que en una EPB se requiere que la cámara esté rellena con suelo excavado, conformando una pasta homogénea, que en algunas veces esta pasta se logra elaborar con el simple hecho de adicionar agua al material excavado. Cuando no es posible lograr esta composición, es necesario el empleo de espuma, la cual en su mezcla con el material consigue crear una burbuja dentro de su estructura dando origen a una pasta, la cual tiene un comportamiento como un fluido elástico que cumple con la capacidad de alcanzar la presión de frente y el confinamiento requeridos.

Para ello, en este trabajo, se sugiere que, para alcanzar las características del acondicionamiento de los suelos blandos, se recomienda el empleo de una espuma denominada MasterRoc SLF 41, la cual permite el acondicionamiento del terreno en la excavación de túneles con TBM de tipo EPB. Este elemento es un agente espumante reforzado con polímeros, lo que significa que sus propiedades tienen varias ventajas tales como: se obtiene una mejora en el comportamiento del material, la extracción de la rezaga se realiza de una forma más fácil, además, se reduce la permeabilidad e incrementa el sellado en la cabeza de corte, dota al terreno de propiedades de deformación plástica -lo que permite una mayor estabilidad del frente de trabajo- y logra alcanzar una presión constante y controlada de avance.

Su modo de empleo recae en una solución acuosa del producto, el cual se expande con aire generando una espuma estable, lo que significa que la tasa de expansión y la tasa de inyección (FER y FIR) en la cabeza de corte, cámara de amasado y tornillo sin fin, dependerán de las condiciones del terreno. Es evidente que la mejor aplicación de este producto debe ser en excavación de túneles en suelos blandos, es decir, es la mejor opción desarrollada para el manejo de estos materiales.

RECOMENDACIONES

De las experiencias por los múltiples proyectos que se han desarrollado en el ámbito del espacio subterráneo, es importante señalar que se deben tomar varios aspectos que son acciones que se suman a la causa del proyecto, mismas que no deben pasar desapercibidas por los involucrados en el desarrollo de este tipo de obras de infraestructura. Para ello, el considerar las acciones nos lleva a tener las siguientes recomendaciones que nos ayudan a tener una visión diferente para el desempeño de las actividades correspondientes a los túneles.

- Contar con una buena caracterización del subsuelo para poder emplear la máquina tuneladora más adecuada, cumpliendo con los requisitos básicos de excavación, retiro de rezaga y colocación del revestimiento primario, es decir, de dovelas.
- Conocer la maquinaria y el proceso constructivo de la excavación del túnel con el fin de evitar situaciones que comprometan tanto al personal como a las actividades que se pretenden realizar.
- Contar con un equipo de especialistas que proporcione la información adecuada y precisa cuando se requiera para evitar demoras en los trabajos e incrementos en los costos de obra.
- Desarrollar un plan de trabajo que permita instruir al personal involucrado, para que con ello se pueda tener una mayor seguridad en el ambiente laboral.
- Contar con personal capacitado y con experiencia que ayude en las labores de supervisión y de control de obra durante la ejecución del proceso de construcción.
- De manera vital, se deben implementar estudios previos que permitan conocer las propiedades geológicas, geotécnicas e hidrológicas, con el objetivo de poder diseñar el método de excavación y de sostenimiento más adecuado.
- Definir los umbrales de seguridad para salvaguardar la integridad física del personal que hace posible el desarrollo de las actividades de construcción.

- Tener un control en los trabajos de montaje y desmontaje de la tuneladora, para que con ello se puedan delimitar los riesgos asociados a esta actividad, ya que el ensamble mediante soldadura y atornillado requiere de los estándares de calidad para evitar daños irreparables.
- Conocer el comportamiento del material dentro de la cámara de excavación, y así evitar atascos de extracción del mismo por causa de material con una granulometría mayor a la permitida. Es por ello que, de requerir el uso de agua y aditivos en el frente de excavación, se deben considerar los que se adecúen mayormente en el proceso de excavación.

CONCLUSIONES

Los túneles son obras de ingeniería que deben ser desarrolladas con mucha sensatez, ya que su desarrollo conlleva diversas actividades en donde el peligro está latente. Cabe destacar que cualquier descuido u omisión en los procedimientos podría significar un impacto que se refleja en pérdidas irreparables, puesto que no solo en lo material, sino también la vida de cada una de las personas que a través de su trabajo hacen posible el satisfacer cada una de las necesidades por las que han surgido este tipo de obras. Otro tema de suma importancia es también el conocer los procedimientos que suelen llevarse a cabo en cada una de las etapas de ejecución. El conocimiento teórico para el ingeniero en turno es una gran ventana a la experiencia, sin embargo, no está de más contar con el apoyo de un equipo técnico que brinde la oportunidad de detectar los vicios ocultos para quien desempeña las actividades, además de que con ellos existe la posibilidad de tener una solución de controversias en tiempo y forma durante la etapa de ejecución de la obra.

Una obra de gran importancia -como lo es el túnel emisor oriente- es un gran reto que se debe considerar por todas las actividades que conlleva el realizar un trabajo de este tipo, ya que es una tarea que tiene una fuerte trascendencia e impacto, y es reconocida a nivel mundial como una de las obras más grandes. El proceso que realizan las máquinas tuneladoras es de gran apoyo para lograr la culminación de los proyectos de esta índole, sin embargo, también es un tema delicado el manejo de los escudos, puesto que significa correr grandes riesgos en la etapa de ejecución de obra, y es que, de acuerdo a la geología encontrada, para la operación de estos equipos, es muy importante contar con una buena caracterización del material; para que las actividades de excavación se puedan desarrollar bajo los umbrales de seguridad que garanticen la integración física del personal, así como también de las herramientas empleadas. Por otro lado, con el empleo en la innovación de técnicas de construcción, se ha podido conseguir una automatización en la construcción, que esto a su vez se ha reflejado de manera muy satisfactoria en un ahorro de tiempo y de inversión económica.

De manera general, las máquinas tuneladoras han brindado la oportunidad de realizar las actividades de manera segura y con tiempos menores al método

convencional, pero que ha traído consigo el contar con un equipo básico que debe ser el respaldo por parte del responsable de la ejecución de los trabajos. Dicho de otro modo, el contratista debe tener al personal capacitado para cumplir con los aspectos de mantenimiento de la máquina, con el fin de responder al cumplimiento de las normas de mantenimiento, con un previo conocimiento de todo aquello que conlleva al dar el mantenimiento preventivo de la máquina o, en el peor de los casos, lo que compete al mantenimiento correctivo, es decir, lo que se relaciona a los incidentes que surgen en los elementos principales de la tuneladora.

Sin perder en cuenta que la seguridad en los trabajos con tuneladora es de suma importancia y han brindado la oportunidad de revolucionar a éstos, ya que en alguna época se veían como trabajos muy pesados y poco prácticos, sin embargo, la ejecución a la fecha ha cambiado la visión del constructor.

BIBLIOGRAFÍA

1. A. Escolero, Oscar, Morales-Casique, Eric, L. Arce, José. (2014). Geología del valle de México. Boletín de la sociedad geológica mexicana Volumen 67, Núm. 2, p. i-ii.
2. Apuntes y presentaciones ing. Roberto González Izquierdo, (2019) AMITOS Moldequipo internacional, S.A. de C.V.
3. Asociación mexicana de ingeniería de túneles y obras subterráneas, AC. (2012). Túneles en México. Ciudad de México.
4. Barbendererde S. et al., 2004. Geologikal risk in the use of TBMs in heterogeneous rock masses - The case of "Metro Do Porto" and TH measures adopted. Portugal, s.n.
5. Bertomeu Bo, Joan. (2010). Libro de ruta para un ingeniero de turno de una tuneladora EPB, (Proyecto o tesina de especialidad). Universidad Politécnica de Cataluña. España.
6. Braja M. Das, (1985). Fundamentos de ingeniería geotécnica. Sacramento, California. Thomson Editores.
7. Cardona Antonio, Hernández Noel. (1995). Modelo geoquímico conceptual de la evolución del agua subterránea en el valle de México. Ingeniería hidráulica en México. p. 71-90.
8. Comisión Nacional del Agua. (2012). Libro blanco CONAGUA-05 construcción del túnel emisor oriente. Publicado en el diario oficial de la federación.
9. Comisión nacional del agua. (2015). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero zona metropolitana de la Ciudad de México. Publicado en el diario oficial de la federación. p. 1-31.
10. Comulada Simpson M. Control de procesos y gestión de datos para la excavación de túneles con tuneladora.
11. Forns Corrales, Isabel. (2009). Desarrollo de un procedimiento de auscultación para obras subterráneas urbanas. (Proyecto o tesina de especialidad). Escuela técnica superior de ingeniería de caminos, canales y puertos, Barcelona, España.

12. Garzón Correa, Juan David. (2018). Instrumentación geotécnica. Aplicación y soporte para la toma de decisiones en ingeniería. (Tesis de licenciatura). Universidad Santo Tomás división de ingenierías facultad de ingeniería civil. Bogotá D.C.
13. Gutiérrez Morales, Luis Enrique. (2013). Analisis geotécnico para la construcción de un túnel en la zona lacustre de la cuenca del valle de México. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autonoma de México, ciudad de México.
14. Gutiérrez Ucles, Diana, Martinez Zarazua, Carlos David. (2019). Monitoreo de los principales parámetros de una máquina tuneladora para el control de asentamientos durante la excavación en una zona urbana. Ingeniería geotécnica en el siglo XXI: lecciones aprendidas y cambios futuros. p.1321-1329.
15. Hernández García, Roberto. (2014). Dispute Boards en contratos administrativos de infraestructura: un reto necesario. Aldía revista institucional. Edición 3.
16. Hernández García, Roberto. (2016). Manejo contractual de riesgos en proyectos subterráneos en México: Una aproximación meta-contractual. 4° simposio internacional sobre túneles y lumbreras en suelos y roca.
17. Leal Suárez, Wilmer Augusto. (2005). Seguimiento a la contratación de obra pública e infraestructura en el departamento de Santander. (Tesis de licenciatura). Universidad industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
18. Lombardo Aburto Adrián y Pérez Reyes José Anselmo. (2016). Manejo contractual del riesgo. 4° Simposio Internacional sobre Túneles y Lumbreras en suelos y en roca.
19. Miranda Vallejos, Valeria Nicole. (2016). Gestión integrada del manejo de riesgos en la construcción de túneles urbanos. (Tesis de licenciatura). Universidad de Chile. Santiago de Chile.
20. Molinero Gómez, Sandra. (2016). Construcción e inspección de túneles. (Tesis de licenciatura). Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona, España.

21. Órgano de difusión del gobierno de la ciudad de México. (2004). Reglamento de construcciones para el distrito federal. Gaceta oficial de la ciudad de México. capítulo VIII.
22. Órgano de difusión del gobierno de la ciudad de México. (2017). Norma técnica complementaria para la revisión de la seguridad estructural de las edificaciones. Gaceta oficial de la ciudad de México. p. 13-17.
23. Pat Padilla, Francisco José. (2019). Control de procesos para la excavación de túneles en frente mixto con TBM de tipo EPB (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
24. Pérez Reyes José Anselmo. (2013). Instrumentación y control de procesos de excavación a partir de un sistema telemétrico-híbrido, como parte de la evolución en la excavación de túneles con tuneladora. Cuarto Congreso Mexicano de Ingeniería de Túneles y Obras Subterráneas.
25. Rey González, Mauricio Andrés. (2016). Análisis de la instrumentación y del monitoreo geotécnico en túneles estación e interestación del metro de Santiago. (Tesis de licenciatura). Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería civil, Santiago de Chile.
26. Ríos Manrique, Antonio. (2009). Procedimiento de excavación con escudo para la construcción del túnel emisor oriente en el valle de México. (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
27. Sánchez Henao, Julio Cesar. (1997). Manual de programación y control de programas de obra. (Tesis de maestría). Universidad nacional de Colombia, Medellín, Colombia.
28. Schmitter Juan Jacobo. (Enero 1986). Escudos y topes. Seminario realizado por la Asociación mexicana de ingeniería de túneles y obras subterráneas. Ciudad de México.
29. Serradell Mejía, David. (2017). Análisis de rendimientos en las diferentes etapas de excavación de un túnel en suelo firme, utilizando un escudo

EPB (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.

30. Suárez Almazán Luis Emilio. Diseño de la cimentación de Torre Reforma, México, D.F. (Tesis de licenciatura). Escuela técnica superior de ingenieros de minas. México. D.F.
31. Trabada Guijarro, Jesús, Talavera Manso, Raúl. (2009). La ejecución de túneles con tuneladora en la ampliación del metro de Madrid. Revista de obras públicas. p.17-32.