



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**



FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

CAMPO DE CONOCIMIENTO: INGENIERÍA CIVIL

**PROCEDIMIENTO DE EXCAVACIÓN CON
MICROTUNELADORA: ANTECEDENTES Y NUEVAS
TECNOLOGÍAS**

T E S I N A

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

ESPECIALISTA EN **CONSTRUCCIÓN**

PRESENTA:

ING. JOSE LUIS MARTÍNEZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR DE TESINA:

MTRO. JOSÉ ANSELMO PÉREZ REYES

CIUDAD DE MEXICO

DICIEMBRE 2017



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
SUBCOMITÉ ACADÉMICO DE INGENIERÍAS
CIVIL Y GEOMÁTICA DEL PUEI

OFICIO: FIN/DICG/SAIClyG/137/2017

Asunto: Respuesta a solicitud
de registro de tesina.

José Luis Martínez Hernández
Presente

Con relación a su solicitud de fecha 6 de abril de 2017, en la cual solicita la autorización del registro de tesina cuyo título es: **“PROCEDIMIENTO DE EXCAVACIÓN CON MICROTUNELADORA: ANTECEDENTES Y NUEVAS TECNOLOGÍAS”**, le informo que este Subcomité autoriza el tema para la obtención del grado mediante la modalidad de tesina.

Esta autorización está sujeta al cumplimiento de las siguientes condiciones:

- 1) La tesina deberá ser concluida y entregada de manera impresa con el visto bueno del tutor en la Subcoordinación de la **Especialización en Construcción, a más tardar el viernes 29 de septiembre de 2017.**
- 2) Deberá continuar con los trámites indicados en la guía de registro de tesina del semestre 2017-2.
- 3) Presentar el examen de grado durante el semestre **2018-1**, con base en la Norma Operativa 27 del PUEI.
- 4) En caso de no concluir con la tesina en la fecha indicada, deberá registrarse en la Convocatoria de Examen General de Conocimientos más próxima que sea publicada.

Con base en la Norma Operativa 28 del PUEI, la tesina deberá contener tema y problema de aplicación, marco teórico, hipótesis, objetivo y aspectos metodológicos, para lo cual se recomienda elaborar un programa de trabajo que le permita concluir satisfactoriamente.

Por lo anterior, lo invito cordialmente a que cumpla con el desarrollo del tema, y que obtenga el grado de especialista de manera satisfactoria.

Atentamente
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”
Ciudad Universitaria, Cd. Mx., a 6 de abril de 2017.
La Presidenta del SAIClyG

M.I. Alba Beatriz Vázquez González



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA ÚNICO DE ESPECIALIZACIONES DE INGENIERÍA

Recibí notificación para formar parte del jurado para el examen del alumno: JOSÉ LUIS MARTÍNEZ HERNÁNDEZ.

ESPECIALIZACIÓN EN CONSTRUCCIÓN PLAN 11-3154.

	JURADO	FIRMA	FECHA
PRESIDENTE:	ING. ESP. ALEJANDRO PONCE SERRANO		31/10/2017
PRIMER VOCAL:	M.I.D.E. JOSÉ ANSELMO PÉREZ REYES		31-10-17
SEGUNDO VOCAL:	ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES		31-10-17
TERCER VOCAL:	M. EN I. LUIS CANDELAS RAMÍREZ		31-10-17
SECRETARIO:	M. EN I. MARCO TULIO MENDOZA ROSAS		31/10/17

BJS

DEDICATORIA

A mi esposa Araceli y a mis hijos, Brenda Haydeé, Luis Daniel y Mayra Alejandra. Sientan suyo este esfuerzo y el resultado plasmado en este trabajo, deseo que les represente una motivación para crear su proyecto de vida, siempre con miras a crecer y retribuir a la existencia algo de lo que nos regala, los amo.

A la memoria de mi padre, por las enseñanzas que me otorgó, por los valores de trabajo y honestidad heredados, gracias papá.

Mamá, gracias por tu ejemplo de vida, eres parte de este trabajo, te amo.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Unidad de Posgrado de mi Facultad de Ingeniería, por haberme dado la oportunidad de volver a estar en sus aulas para seguirme preparando.

Al Mtro. José Anselmo Pérez Reyes, por su apoyo y guía para la realización de este trabajo, por su profesionalismo y entusiasmo al compartir su conocimiento en las clases con todos los alumnos.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN	11
1 Introducción.....	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Generalidades	14
1.3 Justificación	19
1.3.1 Aprovechamiento del espacio subterráneo	19
1.3.2 Alternativas de procesos constructivos.	21
1.3.2.1 Procedimientos de excavación de tipo invasivo.	21
1.3.2.2 Métodos de renovación de tuberías	24
1.3.2.2.1 Fractura de tubería (pipe bursting).	24
1.3.2.2.2 Re entubado (relining).....	26
1.3.2.3 Métodos de construcción no invasivos para líneas nuevas.	26
1.3.2.3.1 Método de perforación por empuje (thrust moling).	26
1.3.2.3.2 Método de perforación por impacto (Impact moling).	27
1.3.2.3.3 Método de perforación dirigida horizontal.....	28
1.3.2.3.4 Método de perforación por golpeo (pipe ramming).	31
1.3.2.3.5 Método de perforación horizontal con tornillo sinfín.	31
1.3.3 Equipo y maquinaria.	32
1.4 Tecnología Tunnel Boring Machine (TBM).	33
1.4.1 Concepto	33
1.4.1.1 Topos.	33
1.4.1.2 Escudos.....	35

1.4.1.3 Escudos abiertos.....	38
1.4.1.4 Escudos cerrados.....	39
1.4.1.5 Hidroescudos o escudos de bentonita (slurry shield).....	39
1.4.1.6 Escudos de frente de presión de tierras (EPB).....	40
1.4.2 Micro-TBM.....	43
1.5 Selección de la técnica de excavación más apropiada.....	44
2 Etapas del proyecto.....	46
2.1 Anteproyecto.....	46
2.1.1 Formulación del problema.....	47
2.1.2 Marco de referencia (alternativas de excavación).....	47
2.1.3 Justificación.....	49
2.1.4 Objetivo.....	49
2.1.5 Metodología.....	50
2.1.6 Recursos.....	52
2.1.7 Cronograma.....	52
2.2 Ingeniería básica.....	52
2.2.1 Estudio geológico.....	52
2.2.2 Estudio geotécnico.....	53
2.2.3 Estudios complementarios.....	55
2.3 Proyecto ejecutivo.....	57
2.3.1 Ingeniería de detalle.....	58
2.3.2 Diseño de micro-TBM.....	60
2.3.3 Instrumentación.....	60
2.3.4 Impacto ambiental.....	63

2.3.5 Revestimiento.....	63
3 Excavación con micro-TBM	64
3.1 Concepto.	64
3.2 Alternativas de procesos constructivos.	66
3.2.1 Microtuneladora para roca dura.....	68
3.2.2 Escudo de presión de tierras (micro-EPB).....	69
3.3 Actividades previas al inicio de la obra.....	70
3.4 Metodología.	70
3.4.1 Ciclo de trabajo de la Micro-TBM.	71
3.4.2 Tuberías para hinca.	73
3.4.3 Sistema de inyección de bentonita.	74
3.4.4 Estaciones intermedias de empuje.....	74
3.5 Control de procesos de excavación.....	75
4 Caso de estudio.....	79
5 Conclusiones.....	90
BIBLIOGRAFÍA.	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Línea del tiempo de la tecnología de excavación sin zanjas. <i>Fuente AMITOS (2014)</i> .	17
Figura 2 Los dos grandes grupos de la tecnología trenchless. <i>Fuente: Mínguez, F., (2014)</i>	18
Figura 3 Excavación de zanja en zona urbana. <i>Fuente: gaceta municipal de techalutla, Jalisco (2014)</i>	22
Figura 4 distintas afectaciones al entorno urbano por zanjas. <i>Fuente: ICTIS (2012)</i>	24
Figura 5 Funcionamiento del sistema pipe bursting. <i>Fuente: Olsen Plant & Services (2010)</i>	25
Figura 6 Línea de tiro, cuchilla, expansor y tubería de sustitución. <i>Fuente: Olsen Plant & Services (2010)</i>	25
Figura 7 Re entubado de una línea dañada. <i>Fuente: Broken sewer pipe Chicago & Company (2002)</i>	26
Figura 8 Perforación por impacto (thrust moling). <i>Fuente: broken sewer pipe chicago & Company (2002)</i>	27
Figura 9 Método de percusión (impact moling) <i>Fuente: broken sewer pipe chicago & Company (2002)</i>	28
Figura 10 Funcionamiento de una perforación dirigida. <i>Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2001)</i>	29
Figura 11 Maquinaria para perforación dirigida. <i>Fuente: hperfora & company (1998)</i>	29
Figura 12 Cabezal de tiro de perforación dirigida. <i>Fuente: hperfora & Company (1998)</i>	30
Figura 13 Cabezal de tiro y método de sujeción de la nueva tubería. <i>Fuente: hperfora & company (1998)</i>	30
Figura 14 Método de perforación por impacto. <i>Fuente: trenchless technology (2002)</i>	31
Figura 15 Método de perforación con tornillo sin fin. <i>Fuente: perforacioneseingenieria.com (2000)</i>	32
Figura 16 Máquina topo. <i>Fuente: Herrenknecht AG</i>	34
Figura 17 esquema de una tuneladora topo. <i>Fuente: Universidad. Francisco de Paula Santander (2005)</i>	34
Figura 18 Vista lateral y frontal de un escudo. <i>Fuente: Fernández (1997)</i>	35
Figura 19. Cabeza de corte de la tuneladora La Almudena. <i>Fuente: Compañía de ecomovilidad, Madrid (2009)</i>	36
Figura 20 Vista del interior de un escudo abierto mecanizado. <i>Fuente: Herrenknecht AG</i>	37
Figura 21 Escudos de frente abierto con rozadora y pala excavadora mecanizada. <i>Fuente: (Geo-Enviroment Laboratory Faculty Of Engineering Nagasaki University)</i>	38
Figura 22 Esquema de un escudo de lodos bentónicos. <i>Fuente: Fernández (1997)</i>	40
Figura 23 Composición general de una tuneladora EPB. <i>Fuente: Herrenknecht AG.</i>	41
Figura 24 Esquema de funcionamiento de un escudo EPB. <i>Herrenknecht AG.</i>	41
Figura 25 Esquema de presiones ejercidas por el escudo sobre el frente. <i>Fuente: Herrenknecht AG.</i>	42
Figura 26. Sistema de microtuneladora. <i>Fuente: Mínguez, F. (2015)</i>	44
Figura 27 microtuneleo contra excavación a cielo abierto. <i>Fuente: AMITOS (2004)</i>	49

Figura 28 ejemplo de composición estratigráfica del terreno. <i>Fuente Instituto de Geología UNAM (1998)</i>	53
Figura 29 Estudio geotécnico en campo. Fuente: Laboratorio Labycta, (2003).....	54
Figura 30 Ejemplo de un diseño conceptual. <i>Fuente: Moreno, A. (2006)</i>	59
Figura 31 sistema de microtúnel, <i>Fuente: Akkerman, 2015</i>	64
Figura 32 Maquinaria para los diferentes tipos de excavación por hinca de tubería <i>Fuente: Mínguez, F. (2015)</i>	67
Figura 33 Procedimientos de microtuneleo. <i>Fuente: Japan microtunneling association (2012)</i> . 67	
Figura 34 Elementos principales que componen una micro-TBM (topo). <i>Fuente: Herrenknecht AG</i>	68
Figura 35 Esquema de funcionamiento de una micro-tuneladora EPB. <i>Fuente Mínguez, F. (2015)</i>	69
Figura 36 Pozo de ataque y sistema de empuje. Fuente: <i>Pedraplus, I. (2014)</i>	72
Figura 37 Estación intermedia de empuje. Fuente: <i>(Pedraplus, I., 2014)</i>	75
Figura 38 Esquema de un modelo de interfaz de usuario. <i>Fuente: Comulada, M. (2005)</i>	76
Figura 39 Esquema de un modelo de control predictivo, <i>Fuente: Comulada, M. (2005)</i>	77
Figura 40 Esquema del control de procesos para una tuneladora. <i>Fuente: Pérez, J.A. (2013)</i>	78

RESUMEN

La demanda de servicios urbanos que se origina por el crecimiento de las ciudades, tales como agua potable, desalojo de aguas residuales, suministro de gas natural y tuberías que conducen cables para comunicaciones, conlleva la optimización de los espacios, en donde el desarrollo de infraestructura de tipo subterránea es cada vez más recurrente por su bajo impacto hacia el entorno y su facilidad de ejecución. La evolución de las técnicas empleadas y la relevancia de éstas debida a la complejidad de los emplazamientos urbanos, requiere la documentación de los principales procedimientos constructivos y de la planeación que cada uno de ellos involucra ya que, en función del objetivo del proyecto y de la dificultad que implica cada técnica, se pueden advertir diversas complicaciones durante su desarrollo. Cada procedimiento tiene un rango de aplicación y éste se puede convertir en todo un reto técnico si es que se desconocen las variables que están involucradas en la selección de cada método. Debido a lo anterior, el presente trabajo documenta el desarrollo de las principales técnicas empleadas para el aprovechamiento del espacio urbano-subterráneo, así como los alcances para cada caso; esto involucra las técnicas de excavación con zanja y sin ella. Finalmente, se presenta el caso más avanzado que se refiere a la utilización de una Micro-TBM, en donde se abordan la concepción, alcance y las alternativas disponibles dentro de dicha tecnología. Se espera que este trabajo tenga el alcance suficiente para sensibilizar al gremio de los ingenieros en obras subterráneas sobre el avance y las ventajas de las técnicas aquí descritas, en beneficio del desarrollo urbano.

ABSTRACT

The demand for urban services that is caused by the growth of cities, such as drinking water, sewerage, natural gas supply and telecommunication ducts, leads to the optimization of spaces, where the development of underground infrastructure is increasingly recurrent, due to its low impact on the environment and its easy execution. The evolution of the techniques and their relevance due to the complexity of the urban sites, requires the documentation of the main construction procedures and the planning that each of them involves since, depending on the objective of the project and the difficulty involved in each technique, various complications occur during its implementation. Each procedure has a range of application and this can become a technical challenge if the variables that are involved in the selection of each method are unknown. This work documents the development of the main techniques used for the utilization of urban-

underground space, as well as the scope for each case; this involves digging techniques with and without trench. Finally, the most advanced case that refers to the use of a Micro-TBM is described, where the conception, scope and alternatives available within that technology are presented. It is hoped that this work has sufficient reach to raise awareness among the professionals about the current state and advantages of these techniques, for the benefit of urban development.

“Infundir principios y valores, responsabilidad de la Universidad”.

Dr. Nabor Carrillo Flores.

1 Introducción.

Dentro de los trabajos más comunes tanto en las zonas urbanas, como en campo abierto, están los trabajos de introducción de servicios de diversa índole. Estos servicios tienen la función de satisfacer las demandas de la población y también cumplen la función de promover el desarrollo económico y social de los conglomerados humanos.

En el caso de la introducción de servicios por la vía subterránea, la forma más recurrente es la de abrir una zanja e introducir dicho servicio. Esta técnica conduce a alterar el entorno ya existente, tal como estructuras de vialidades ya terminadas, cierres temporales de zonas de circulación, y en general, crear impactos negativos en el entorno urbano preestablecido.

La búsqueda de nuevas alternativas, ha impulsado la tecnología de introducir los servicios sin la necesidad de abrir zanjas y cerrar espacios durante el tiempo de los trabajos, además con la ventaja de depender menos de las condiciones climatológicas para poder trabajar.

1.1 Antecedentes

Dentro de las actividades más comunes en el campo de la construcción, se encuentran las obras de conducción por medio de tuberías. Éstas tienen distintas finalidades, tales como conducción de agua potable, desalojo de aguas residuales, suministro de energéticos como gas natural, gasoductos, además de las tuberías que conducen cables o fibra óptica para comunicaciones y telefonía, y otros servicios más que conforman la lista de necesidades de urbanización de una ciudad.

En la actualidad, se reconoce un fenómeno que tiene impactos socioeconómicos visibles: la migración de las zonas rurales a las zonas urbanas. La búsqueda de mejores oportunidades de vida está provocando una presión en la demanda de servicios básicos e infraestructura en las ciudades.

Las altas concentraciones poblacionales están provocando una saturación de los espacios disponibles motivo por el cual, en cuanto a dotación de nuevos servicios se refiere, se está buscando aprovechar al máximo el espacio subterráneo.

Si se considera que la vida útil de una red subterránea lleva a tener períodos de mantenimiento y sustitución que, junto con las nuevas redes, mantienen ocupado mucho tiempo el espacio vial, se vuelve prioritario el aprovechamiento del espacio bajo la superficie.

Es muy común observar que la introducción de servicios subterráneos se hace por medio de excavaciones a cielo abierto (zanjas), lo cual tiene impactos en el entorno de trabajo tales como cierres temporales de vialidades, uso de técnicas de estabilización del terreno en el caso de suelos blandos, contaminación por el uso de equipos de excavación, contaminación visual, etc.

Es necesario utilizar tecnologías que nos permitan ejecutar este tipo de obras en un tiempo más razonable y con menores afectaciones al entorno; esto se logra utilizando tecnologías que ya no requieren abrir zanjas en toda la longitud de la obra.

Existen obras de tuberías subterráneas que, por el diámetro que manejan, requieren invadir una mayor cantidad de espacio, dado que la profundidad y el ancho de la zanja hacen que sea necesario ocupar hasta la calle entera; en este aspecto, la tecnología de microtuneleo presenta ventajas considerables sobre una excavación convencional.

El tipo de obras en las cuales se puede pensar en implementar técnicas de microtuneleo son, por ejemplo: colectores de drenaje sanitario o pluvial, líneas de transporte de gas, gasoductos y, en general, obras en las cuales se cruzan infraestructuras importantes tales como vías de ferrocarril, autopistas o cuerpos de agua como ríos y lagos.

1.2 Generalidades

En la mayoría de las ciudades, la demanda del espacio subterráneo y la instalación de nuevos servicios continua en aumento. La búsqueda de nuevas formas para satisfacer dichas necesidades ha detonado un impulso en el uso y desarrollo de nuevas tecnologías que nos permiten optimizar el espacio subterráneo al tiempo que se logran procedimientos menos invasivos, que no impactan negativamente el medio ambiente y que no provocan, en la medida de lo posible, problemas viales o sociales y que tienen ahorros en tiempo de ejecución.

Al respecto, cabe señalar que en un procedimiento convencional de **excavación de zanja** se pueden identificar las siguientes etapas y actividades:

- Actividades previas.

Una vez determinado el proyecto en su trazo y nivelación, se debe realizar una verificación física del mismo que permita hacer una correcta planeación de los sitios de tiro, áreas disponibles para tener materiales de relleno y la propia tubería, hacer un plan de cierres de calles -en caso de hacer la obra por tramos- y un plan de seguridad para las actividades relacionadas.

- Etapa de obra.

Considerando que los trabajos referidos están localizados en zona urbanas, se comienza por el corte del pavimento existente, para posteriormente proceder a la excavación. En este punto, y con base a la información de la ingeniería básica y de detalle, se conoce el tipo de suelo que se va a excavar; si es un suelo rocoso, se deberá decidir entre equipos dotados con cinceles neumáticos, barreno y voladura -o la combinación de ambos- el retiro del material producto de esta excavación es lento y riesgoso, dado que la roca fragmentada puede desprenderse sin previo aviso y causar un accidente. Si el material es una arena, se debe contemplar un ademe para conservar la sección proyectada y evitar volúmenes adicionales de excavación y relleno por causa de los deslizamientos hacia la zanja, lo cual también provoca inestabilidad en la periferia de los trabajos. Si se tiene un suelo compuesto de limos, arcillas o alguna combinación, los ademes también son necesarios y adicionalmente se deberá contemplar un control de niveles freáticos dado que en este tipo de suelos es lo más común. *Departamento de construcción, Facultad de Ingeniería. (1985).*

De acuerdo con *Peurifoy, H. (1978)*, durante la excavación en suelos blandos o arenosos, se puede tener pérdida de sustento en la periferia de la zanja, por efecto del peso de las edificaciones que estén cerca, lo cual provocaría un empuje a nivel del subsuelo que origine buzamientos en el fondo de la excavación o en los laterales de la misma, de ahí la importancia de contener con ademes la excavación.

Es en esta etapa, el personal que está laborando corre más riesgo por la probabilidad de derrumbes o la caída de algún objeto en el fondo de las excavaciones. El plan de seguridad deberá contar con señalizaciones, protección perimetral de la excavación, supervisión de seguridad en la obra, personal que ayude a dirigir el tráfico y equipo y protocolos de actuación en caso de emergencia.

Una vez llegado al nivel de desplante de proyecto, se procede a compactar la superficie y a tender una cama de arena, la cual tiene la función de soportar las deformaciones que pudieran presentarse

y que éstas no se transmitan a la tubería. Posteriormente, se coloca la tubería teniendo cuidado de que, si lleva alguna pendiente de proyecto, ésta se respete y se verifique constantemente. Se deberá asegurar la hermeticidad de cada junta de tubo para evitar fallas en el mismo y, posterior a esto, acostillar la tubería con material de banco para posteriormente rellenar nuevamente a nivel de calle, ya sea con material producto de la excavación o con material de banco, según lo marque el proyecto y las especificaciones.

Debido al corte y a la circulación constante de vehículos de carga y construcción sobre el pavimento, se procede a la reposición del mismo ya sea en forma parcial o en todo el ancho de la calle, según se requiera.

En resumen, las excavaciones en zanjas han permitido un avance en el crecimiento de la infraestructura y son muy útiles en casos en los que no se generan daños o perjuicios asociados a su implementación, como es el caso de zonas abiertas o no urbanizadas.

Para el caso contrario, existen procedimientos menos invasivos que permiten ahorros considerables y la disminución de molestias y riesgos en general; estos son los procedimientos de **excavación sin zanja**.

De acuerdo con *Mínguez F. (2015)*, las primeras perforaciones horizontales datan de principios del siglo XX en Estados Unidos y vienen dadas por la necesidad de realizar instalaciones de tuberías bajo infraestructuras ya acondicionadas (vías ferroviarias, carreteras) o de salvar barreras geomorfológicas. Fue a partir de 1950 cuando se difundió su uso, siendo hoy en día una práctica generalizada en toda Europa.

El clima tuvo mucho que ver en el desarrollo de esta tecnología, ya que las temporadas invernales, complicaban los trabajos y el manejo de las tuberías. Hacia 1963, el gobierno de Japón decidió incluir mediante planes a cinco años, el incremento de la población dotada con servicios urbanos para llegar a 1990 con un 46% de cobertura como mínimo; es en Osaka en donde, por las condiciones de saturación y poco espacio, nace la técnica de micro-túnel, dado que prácticamente no existía espacio para trabajar con zanjas en la sustitución o suministro de tuberías de agua potable y drenaje, se desarrolló la técnica de hincar las tuberías mediante dos pozos, uno para ingresarla y otro para recibirla, sin necesidad de abrir zanja y sin necesidad también de meter personal, todo el trabajo realizado a control remoto, y finalmente los pozos abiertos se ocupaban como alcantarillas

del sistema. De este modo nació la técnica de micro-túnel. Esta técnica emigró a Europa hacia los años ochenta, particularmente en Alemania, con una colaboración japonesa en un proyecto de micro-túnel para la ciudad de Hamburgo, y dado que el suelo en Alemania es primordialmente arcilloso, se generó un gran desarrollo de la tecnología en este país, en donde actualmente se encuentra una de las principales empresas desarrolladoras de equipo para micro-túneles. *Mínguez, et. al. (2015).*

Actualmente, la técnica de micro-túnel está ampliamente difundida en Europa, Australia, medio Oriente y, por supuesto, en Japón. En el caso de los Estados Unidos, la técnica de micro túnel también llegó hacia los años ochenta y adicionalmente y por las necesidades de su industria petrolera y de extracción de gas, se ha dado impulso a la técnica de perforación dirigida, con la cual pueden pasar tuberías por cauces de ríos, vías férreas, carreteras, o territorios socialmente sensibles. *Viana, F.E. (2004)*

Se puede marcar como fecha de inicio de las técnicas TT (Trenchless Technology, por sus siglas en inglés) el año de 1985, con la conferencia a la que convocó la Asociación de Ingenieros de Salud Pública de Londres, en la cual se comenzó a usar, además, el término “No dig” (sin excavación), y de la cual surgió, en 1986, la Asociación Internacional de Tecnologías sin Zanjas o ISTT por sus siglas en inglés (International Society for Trenchless Technology), que identifica claramente a este conjunto de técnicas. *Viana F.E. (2004),*

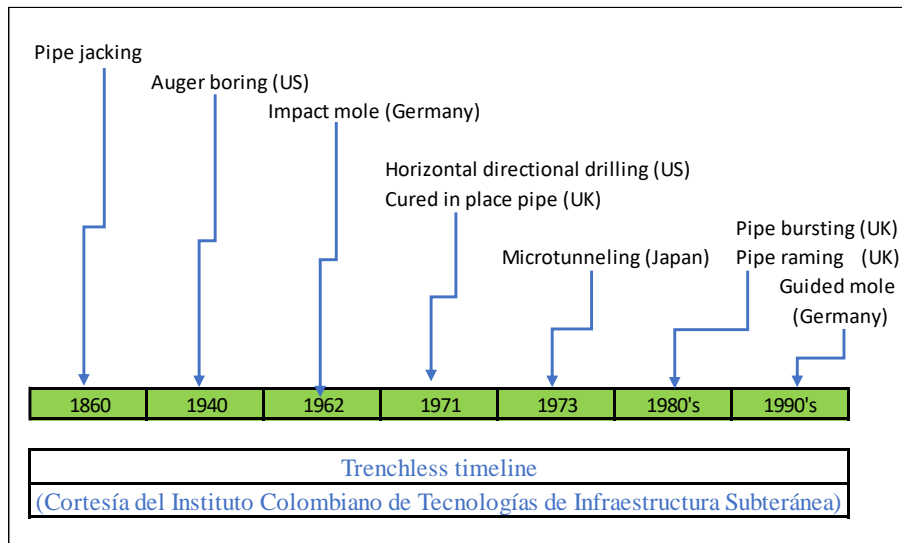


Figura 1. Línea del tiempo de la tecnología de excavación sin zanjas. Fuente AMITOS (2014)

De acuerdo con *Viana F. E. (2004)*, la tecnología sin zanjas es definida como la técnica a utilizar en la construcción, reemplazo, renovación, inspección, localización y detección de fugas de líneas de tubería con excavación mínima de la superficie del terreno.

A su vez y, de acuerdo con *Mínguez, F. (2015)*, todos los procesos de microtunelación engloban una MTBM (Micro Tunneling Boring Machine), la cual es esencialmente una combinación de una cabeza cortante rotatoria y un escudo. También incluye un sistema de empuje, un sistema automático de transporte del detritus, un sistema de control de dirección y guía y una tubería. Este sistema también está considerado como un proceso de empuje cíclico, no tripulada. El rango de aplicación de este método va desde 25 mm de diámetro hasta 3,500 mm, siendo el rango más común de 600 mm a 1,200 mm. *Mínguez, F. (2015)* establece dos grandes grupos de aplicación para la excavación sin zanja.

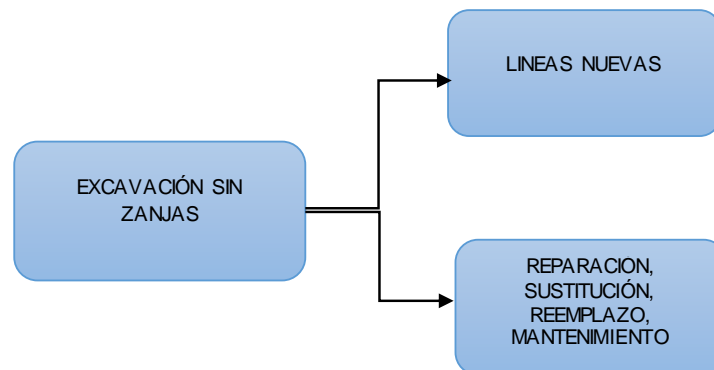


Figura 2 Los dos grandes grupos de la tecnología trenchless. Fuente: *Mínguez, F., (2014)*.

Las tecnologías de excavación sin zanjas, como ya se ha mencionado, se caracterizan por ser técnicas no invasivas, esto es, que no se requiere abrir una zanja a lo largo del tramo de tubería que se va a colocar, evitando diferentes molestias, pero, sobre todo, con un ahorro sustancial en estructura de soporte para alojar dichas tuberías ya que prácticamente quedan integradas al cuerpo del terreno que las contiene.

En la actualidad, se pueden encontrar más de 40 técnicas de excavación sin zanjas; para efecto de una clasificación general, podríamos agruparlas en los siguientes grandes grupos, de acuerdo al objetivo de cada trabajo, *Viana, F.E., (2004)*:

- Técnicas para realizar una nueva instalación de tubería o cable en un alineamiento donde no existe tubería de antemano.

- Técnicas para realizar un reemplazo en línea, donde la tubería original es reemplazada, con el mismo alineamiento.
- Técnicas de renovación para mejorar la actuación de la tubería.
- Técnicas de reparación y mantenimiento para la rectificación de daño local en longitudes cortas y juntas o accesorios.

A partir de las dos clasificaciones citadas, se puede inferir que la técnica de excavación sin zanjas está enfocada en diámetros relativamente menores, desde una tubería de conducción de gas natural, por ejemplo, o alguna tubería que lleve cableado de telecomunicaciones, cuyos diámetros van desde los 200 mm, hasta tuberías de conducción de agua potable, conducción de hidrocarburos, o de aguas residuales, las cuales pueden alcanzar diámetros de hasta 3500 mm.

1.3 Justificación

1.3.1 Aprovechamiento del espacio subterráneo

De acuerdo con *Jaime, A. (2004)*, el empleo del subsuelo tiene ventajas de, por lo menos, cuatro tipos: económicas, funcionales, sociales y ambientales.

Algunas ventajas económicas son: a) permite tener una estructura urbana más compacta, con el consecuente ahorro en inversión, operación y mantenimiento; b) es posible reservar el terreno superficial para actividades primarias como recreación, trabajo y vivienda, de usos secundarios como es el tránsito de vehículos, estacionamientos, etc., lo cual mantiene o incrementa el valor de la propiedad superficial.

Las ventajas funcionales de utilizar el subsuelo son, entre otras: a) permitir un tráfico más fluido al no haber intersecciones de calles, b) incrementar la seguridad en la transportación (menos accidentes a peatones y usuarios), c) abrir nuevas vialidades o espacios para estacionamiento sin tener que expropiar predios. Una desventaja es la conexión de la red de tráfico subterráneo con la superficie que, en ocasiones, es todo un reto técnico.

Desde el punto de vista social, el uso del espacio del subsuelo permite mejorar la calidad de vida en las zonas urbanas. Se disminuyen los tiempos de desplazamiento por transporte tanto público como privado. También, se pueden aumentar las zonas de esparcimiento comunitario en la superficie.

Las ventajas de tipo ambiental son diversas. Las obras subterráneas ayudan a mantener el paisaje natural y no afectan las condiciones naturales de la zona. Adicionalmente, reducen la contaminación visual y por ruido del tráfico. No alteran negativamente el entorno al ocultar instalaciones como subestaciones eléctricas, cables y postes, etc.

De acuerdo con *Riascos, L.A. (2007)*, el espacio subterráneo es en la actualidad una alternativa para muchas megalópolis que poseen problemas relacionados con su crecimiento y densidad poblacional; por ejemplo, la falta de espacio superficial para la construcción de nuevas obras civiles, problemas ambientales y de movilidad de sus habitantes, entre otros.

Dada la concentración poblacional que en las zonas urbanas se está gestando, la presión sobre los espacios es fuerte en el sentido de que se requiere cada vez más una mayor dotación de servicios, desde los básicos (agua potable, electricidad, drenaje pluvial y sanitario) hasta los que brindan un cierto nivel de confort (comunicaciones en general, televisión por cable, etc.). Esta demanda tiende a satisfacerse con el incremento de los servicios que, en el caso de telefonía y electricidad, en su forma inicial, se suministraba por vía aérea (postes y cableado), sin embargo, en la actualidad la tendencia es hacia el suministro en vías subterráneas.

De acuerdo con lo anterior y para lograr el aprovechamiento del espacio subterráneo urbano, se deberán considerar algunas condiciones del entorno, a saber:

- Infraestructura existente y su probable ubicación: telefonía, electricidad, agua potable, alcantarillado, gas, oleoductos, etc.
- Un estudio geotécnico para conocer el tipo de subsuelo en la zona de trabajo.
- Un estudio detallado apoyado en topografía, para determinar el trazo que se seguirá, así como una planeación de las etapas de excavación.
- Obtención de permisos de construcción para contar con la libranza del área de trabajo.
- Existencia de corrientes subterráneas o si se está trabajando en alguna zona protegida por razones históricas o de preservación de la naturaleza.
- Afectaciones y medidas de mitigación con respecto al tránsito de la zona, tanto peatonal como vehicular.

1.3.2 Alternativas de procesos constructivos.

La excavación sin zanjas, por definición, es un método menos invasivo y le confiere al trabajo ciertas ventajas tales como el hecho de que no se necesita cerrar un área muy grande para realizar la obra, visualmente es menos agresivo y se logran ahorros considerables en cuanto a tiempos de ejecución y costos de construcción. Es importante mencionar que, en comparación a los métodos convencionales con zanja, la tecnología del microtuneleo implica una fuerte inversión inicial, sin embargo, esto no demerita las ventajas que a mediano y largo plazo se hacen patentes.

También es necesario tomar en cuenta que, cuando en el espacio subterráneo se construye una estructura, se produce una zona de influencia en el subsuelo alrededor de la obra, en el cual se genera un cambio del estado esfuerzo –deformación de la masa de suelo- conceptos básicos que han sido desconocidos por muchos proyectistas y constructores, generando problemas en el momento de construcción de la obras que no se prevén y que, obviamente, afectan tanto a la estructura existente, como también a la nueva. *Riascos, L.A. et al. (2007).*

Las etapas para un proyecto de obra de canalización subterránea, independientemente de la necesidad de zanja, o no, contempla varias etapas que habrá que desarrollar, desde los estudios básicos de campo y gabinete, el desarrollo de un anteproyecto, la ingeniería básica, la cual nos llevará a un proyecto ejecutivo, con el cual se definirán las normas técnicas para la construcción.

1.3.2.1 Procedimientos de excavación de tipo invasivo.

De acuerdo con la *Comisión de Aguas del Estado de México, (2000)*, en el método convencional de excavación con zanja, se deberá contar con la siguiente información de manera enunciativa y no limitativa:

- Geometría de la sección de proyecto.
- Desniveles y verificación de estos y del trazo antes de comenzar los trabajos.
- Sistema de contención de la excavación o si es con taludes, verificar la estabilidad de los mismos.
- Características de los materiales que compondrán la estructura de encamados, acostillados, rellenos, su existencia y disponibilidad con respecto al sitio de la obra.
- Implementación de algún sistema de bombeo de aguas ya sea freáticas o en temporada de lluvias, por inundación del área de trabajo.

- Considerar posibles daños y reparaciones a sistemas ya existentes (líneas de agua potable o drenaje, instalaciones de telefonía, por ejemplo).
- Cierre de la zona de excavación en un ancho mayor con el fin de garantizar la extracción del material producto de la misma y con el fin también de garantizar la seguridad de las personas.
- Manejo de las cargas temporales durante la etapa de obra: equipo pesado y retiro de material producto de la excavación o ingreso de tubería y rellenos.
- Programa de control de calidad de las compactaciones.
- Reposición de la estructura inicial existente o su reemplazo por una superficie de rodamiento nueva, según sea el grado de afectación.

Toda esta información nos permitirá realizar un buen presupuesto y programación de los trabajos y, de éstos, dependerá el éxito o desviación de los objetivos planteados, ya que una mala inspección inicial o un presupuesto deficiente llevarán al ejecutor a costos no contemplados y tiempos que no se pudieran llegar a absorber en la entrega del proyecto, además de que se generan mayores problemas viales y descontentos sociales debido a los movimientos de maquinaria, reducción de espacios de circulación y riesgos inherentes a la naturaleza del trabajo.



Figura 3 Excavación de zanja en zona urbana. Fuente: *gaceta municipal de techalutla, Jalisco (2014)*

Algunas desventajas de las excavaciones con zanjas, son las siguientes:

- En zonas urbanas, se tienen restricciones en los horarios de trabajo, dado que generalmente es por la noche cuando se puede avanzar sin generar mayores molestias a la población.
- El proceso de ejecución es lento y generalmente hay que reponer con material de banco, el suelo extraído (a menos que éste sea de una calidad aceptable, en cuyo caso habrá que reponer sólo el material que se contamine, esto dependerá de estudios de laboratorio), para así garantizar que no se presentarán asentamientos en la zona de la zanja.
- Hay que reponer la estructura de circulación si es que el trabajo se realizó en alguna vialidad ya existente, con el consecuente parche y el daño al pavimento.
- Costos implícitos a este sistema: cargas, acarreos y disposición del material de excavación, si este no es apto para volver a colocarse, y suministro y colocación de material de banco para garantizar la calidad del relleno.
- Si la profundidad de la excavación es grande y el suelo es inestable, implica el uso de algún sistema de estabilización, como ademes, lo cual habrá que sumar en tiempo y costo al presupuesto de obra.

Lo anterior se convierte en una lista de eventos a favor del uso de una tecnología de excavación sin zanjas, pero habrá que aclarar que ésta también cuenta con ciertas condiciones para su correcta implementación:

- Se debe conocer con el mayor detalle posible el tipo de suelo al que se habrá de intervenir, dado que, por ser una tecnología generalmente guiada a control remoto, cualquier daño a los equipos pueden generar la pérdida de los mismos o incluso la cancelación de la línea avanzada y empezar en una nueva ruta. Lo anterior implica una mayor inversión en estudios geotécnicos detallados.
- Se deben construir dos pozos, uno de ataque y otro de recepción, las dimensiones de estos elementos son considerables, porque alojarán todo un sistema de logística para el efecto y estarán en función del diámetro y profundidad de la tubería a instalar, entre otras condiciones.
- Implica el establecimiento de una unidad de manejo de lodos que ayuden al proceso de excavación.

- El costo de estos equipos no es menor, por lo que se deberá tener bien fundamentada mediante un estudio económico, la decisión de adquirir un equipo de esta naturaleza, de tal suerte que el beneficio supere al costo de inversión.

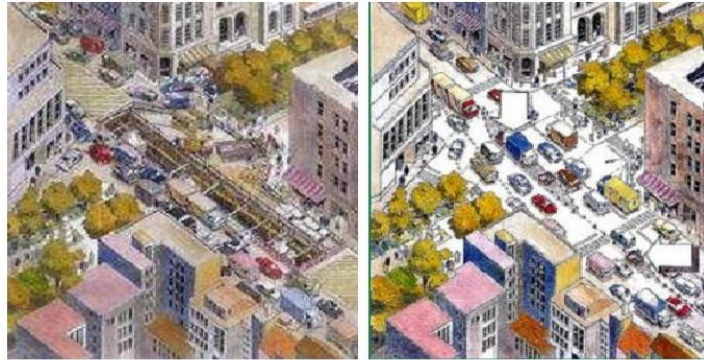


Figura 4 distintas afectaciones al entorno urbano por zanjas. *Fuente: ICTIS (2012)*

1.3.2.2 Métodos de renovación de tuberías

Este tipo de técnicas se utilizan cuando se busca reemplazar alguna línea preexistente que ya cumplió su vida útil o que presentó alguna falla, lo que hace imperativa su sustitución. Sólo se abordarán los dos métodos más comunes (pipe bursting y relining) de este tipo para ejemplificar su aplicación, dado el alcance del presente trabajo.

1.3.2.2.1 Fractura de tubería (pipe bursting).

Básicamente consiste en la sustitución de una tubería por otra que quedará en su mismo sitio, todo esto sin disminuir el diámetro de la misma. Los rangos de diámetros que se pueden sustituir con este método van desde los 80 mm hasta los 1000 mm, (Mínguez, F. 2015), y los tipos de materiales que se pueden sustituir pueden ser concreto (simple o armado), acero o hierro fundido. Generalmente los servicios que prestan las líneas que se sustituyen por este método son líneas de abastecimiento de agua potable o gas; no se recomienda en la sustitución de tuberías de drenaje, dado que pudieran presentarse algunas variaciones de pendiente al colocar la nueva tubería, que, si bien no incidirían notablemente en el funcionamiento hidráulico, si pudieran causar algunos puntos de acumulación de sedimentos por no tener la certeza de que se cuenta con una variación de pendiente uniforme. En cuanto al material empleado en la sustitución, generalmente es polietileno de alta densidad (PAD).

El procedimiento constructivo es el siguiente: una vez identificado el tramo a sustituir, se determina si es posible usar algún pozo de visita ya existente o si es necesario hacer un pozo auxiliar, esto en función del tramo. Se ingresa por empuje la línea que se encargará de hacer el tiro (barras articuladas de acero), desde el pozo de ataque, hacia el pozo receptor a través de la tubería existente y una vez conseguido esto, se coloca en la punta una cuchilla de corte, un cono expansor (que reventará la tubería) y se acopla de igual manera la tubería nueva (Figura 5).

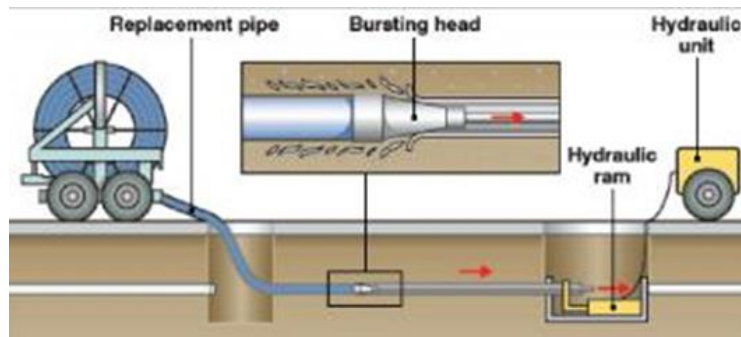


Figura 5 Funcionamiento del sistema pipe bursting. Fuente: Olsen Plant & Services (2010)

El tiro se realiza desde el extremo opuesto mediante un equipo con capacidad de tracción de 40 hasta 400 toneladas de fuerza, al salir la tubería del otro lado, el proceso terminó.

Algunas complicaciones que se presentan son las de lograr atravesar con la línea de tiro ya que, en ocasiones, la tubería usada está invadida de raíces o algún elemento que genera una obstrucción.



Figura 6 Línea de tiro, cuchilla, expansor y tubería de sustitución. Fuente: Olsen Plant & Services (2010)

1.3.2.2.2 Re entubado (relining)

En esta técnica, se sustituye la tubería introduciendo una nueva a través de la existente, usando el mismo principio de la técnica del “pipe bursting”, con la diferencia de que no se revienta la tubería anterior, sino que esta misma sirve como encamisado para la tubería de reemplazo. En este caso, el material más usado es la tubería de hierro dúctil, por sus características de resistencia al impacto y flexibilidad, lo cual vuelve a este material adecuado para su colocación mediante empuje. La condición que rige el uso de esta técnica, es que la reducción del diámetro interior no afecte el funcionamiento hidráulico previsto en el diseño original, de hecho, la reducción en la rugosidad por efecto de la nueva superficie interior, compensa el funcionamiento de la conducción. El procedimiento constructivo implica preparar la parte interna de la tubería a reemplazar, mediante una limpieza de incrustaciones y un baño a base de una lechada lubricante que a la vez sellará las grietas. Una vez colocada la lechada lubricante, la tubería se desliza y el espacio inter-anular que queda entre las dos tuberías se rellena con otra lechada que puede ser de algún mortero con propiedades alcalinas para disminuir el daño a la tubería.



Figura 7 Re entubado de una línea dañada. Fuente: *Broken sewer pipe Chicago & Company (2002)*

1.3.2.3 Métodos de construcción no invasivos para líneas nuevas.

A diferencia de los métodos descritos en el apartado anterior, que son propiamente para sustitución o reparación, estos métodos se aplican para líneas nuevas. A saber:

1.3.2.3.1 Método de perforación por empuje (thrust moling).

En este método, también llamado de compactación de suelo, se introduce una barra de perforación, ya sea por empuje o por percusión, de tal modo que dicha barra va avanzando y a su vez

compactando el suelo que la circunda. Esta técnica se realiza entre dos pozos, primero con una perforación guía, introduciendo una barra de un diámetro pequeño, y una vez alcanzado el segundo pozo, se ocupa la misma barra para tirar otro cabezal de mayor diámetro y poder alojar la tubería.



Figura 8 Perforación por impacto (thrust moling). Fuente: *broken sewer pipe chicago & Company (2002)*

1.3.2.3.2 Método de perforación por impacto (Impact moling).

En este método, con respecto al anterior, cambia el empuje por una acción de percusión inducida por un equipo neumático, el cuerpo del elemento que efectúa la perforación es un tubo encamisado con una punta, la cual recibe la percusión neumática y avanza junto con el encamisado, se usa en tramos de 25 metros máximo, (Mínguez, F. 2015), y el procedimiento es el siguiente:

Se excavan dos pozos, uno de ataque o inicio y otro de recepción. En el pozo de recepción se coloca una regla de nivelación para que, desde el pozo de ataque, se determine la profundidad de perforación y lograr un control de la horizontalidad del trabajo. Se comienza con la perforación y, unido al cabezal de percusión, va un cable que, al salir en el pozo de llegada, servirá para jalar la tubería que se va a colocar.

Para los métodos de perforación por impacto y perforación por empuje, se requiere conocer detalladamente las condiciones del suelo que se atacará, ya que la velocidad de penetración tanto como la posibilidad de un desvío de la línea dependerán de si el suelo es blando, contaminado, o de una graduación adecuada, el tipo de cabezal de ataque también tiene influencia en los resultados. Para suelos blandos, se presenta el inconveniente de que la desviación puede ser notoria debido a la pérdida en el control de los avances ya que, al existir menor resistencia del terreno, el cabezal

tiende a desviarse. Las velocidades de avance se encuentran en un rango de los 75 mm hasta los 1.2 m por minuto, llegando a alcanzarse velocidades de hasta 10 m por hora en condiciones de suelo óptimas. La profundidad de perforación es también otro factor a cuidar, se ha encontrado que lo ideal es mantener por cada 25 mm de diámetro de tubería, 250 mm de profundidad, esto ayuda a mantener el suelo sin asentamientos, dado que por el impacto que transmite al subsuelo, se pudiera afectar ya sea por vibración o asentamiento alguna estructura superficial. El ruido que estos métodos generan es también un factor a considerar, por lo que en zonas residenciales deberá evaluarse detalladamente su uso.

Se usa en canalizaciones eléctricas, cableado de telecomunicaciones, líneas de conducción de agua potable, gas natural y sistemas de desalojo de aguas residuales.



Figura 9 Método de percusión (impact moling) Fuente: *broken sewer pipe chicago & Company (2002)*

1.3.2.3.3 Método de perforación dirigida horizontal.

Esta técnica tiene sus orígenes en la industria petrolera y de ahí se ha derivado haciendo adecuaciones para su utilización en proyectos de suministro de agua potable y servicios varios como energía eléctrica y comunicaciones. Se puede considerar como una perforación por impacto, pero con la característica de contar con un sistema que le da dirección; esta característica le otorga ventajas en el sentido de poder comenzar en puntos relativamente accesibles, poder cruzar instalaciones existentes, estructuras tales como carreteras, vías férreas, cuerpos de agua (lagunas, ríos) y volver a emerger hacia un punto accesible.



Figura 10 Funcionamiento de una perforación dirigida. Fuente: Universidad Politécnica de Valencia (2001)

Las aplicaciones para esta técnica son generalmente para la colocación de cableados (fibra óptica, electricidad) o ductos a presión (agua potable, gasoductos). Los ángulos de inclinación posibles para este sistema van de los 8 a los 18 grados en el punto de acceso y de 8 a 12 grados en la salida.



Figura 11 Maquinaria para perforación dirigida. Fuente: hperfora & company (1998)

Previo a la actividad, se deberán localizar las instalaciones o estructuras subterráneas existentes en el tramo de trabajo, para realizar el diseño de la profundidad y recorrido de la perforación. Lo anterior se logra mediante la utilización de un geo-radar al tiempo que se busca la información oficial, si es que existe. Se debe contar con un equipo que proporcione fuerza neumática, ya que el procedimiento es mediante empuje y rotación de elementos cortadores.

De acuerdo con Mínguez, F. (2015), el procedimiento constructivo es el siguiente: en primer lugar, con el apoyo del equipo que realiza el empuje neumático, se realiza una perforación de guía, la

cual se va dirigiendo mediante un sensor en el cabezal de perforación que manda una señal eléctrica, la cual es recibida por un mecanismo receptor que va siguiendo en la superficie la ruta planificada con anticipación, por este método se detecta la profundidad a la que se está realizando la perforación. El diámetro de la perforación inicial varía desde 2.5 cm hasta 12.5 cm de diámetro. Una vez realizada la perforación guía, se procede a escarificar o ensanchar la sección para introducir la tubería final.



Figura 12 Cabezal de tiro de perforación dirigida. Fuente: *hperfora & Company (1998)*

Posteriormente, se engancha a la línea inicial un equipo que se encargará tanto de ensanchar la perforación, como de introducir la tubería proyectada, con la ayuda de la inclusión de un líquido de perforación (generalmente bentonita) el cual lubricará el espacio anular y disminuirá la fricción entre el terreno y la tubería y también evitará problemas de caídos en el tramo perforado. El escarificador o ensanchador, se puede pasar por el tramo las veces que se considere necesario. El tipo de suelo ideal para esta técnica es un suelo blando, tal como la arcilla o arena.



Figura 13 Cabezal de tiro y método de sujeción de la nueva tubería. Fuente: *hperfora & company (1998)*

1.3.2.3.4 Método de perforación por golpeo (pipe ramming).

Este método se desarrolló para hincar directamente la tubería (normalmente tubería de acero) en el terreno, mediante el empuje realizado por un equipo neumático o hidráulico, de hecho, se puede considerar una variación del método de perforación por impacto (impact molling), dadas las similitudes en el procedimiento, la diferencia es que en este caso el tubo hincado realiza poco desplazamiento o compactación del terreno y se pueden manejar mayores diámetros en la colocación. Para este procedimiento, se realiza un pozo de ataque, desde el cual se procederá a realizar el hincado de la tubería. En este pozo se construye una losa de concreto armado, la cual servirá de base para la cama alineadora de la tubería. Del mismo modo en que se realiza el hincado vertical de los pilotes, se procede con la tubería de manera horizontal, hincándola con equipo de percusión. Al terminar lo correspondiente a un tramo, se retrae el equipo para dar espacio a la colocación de un nuevo tramo, el cual deberá ser alineado y soldado en sitio. El punto anterior vuelve un tanto desventajoso este método, ya que se requiere de la presencia de un soldador calificado y de un tiempo considerable, lo cual hace lento el avance.

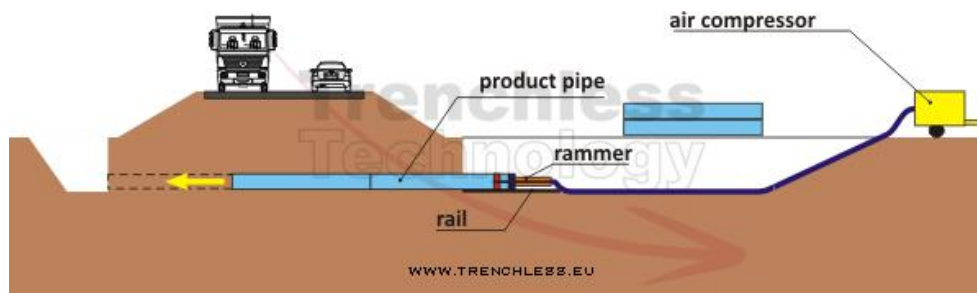


Figura 14 Método de perforación por impacto. Fuente: trenchless technology (2002)

Los diámetros que se pueden manejar en este método, son desde 15 cm hasta 150 cm y en longitudes del orden de hasta 250 m, (Mínguez, F. et. al. 2015).

En cuanto al retiro del material que queda en el interior de la tubería hincada, éste se puede retirar por medio de presión de aire o por medio de un tornillo sinfín en caso de que el material no sea muy homogéneo.

1.3.2.3.5 Método de perforación horizontal con tornillo sinfín.

Es un método de perforación también muy extendido, se usa para la colocación de líneas de tubería de concreto reforzado o acero al carbón, en diámetros desde los 100 mm hasta los 1,500 mm. Es

propiamente una broca de mayores dimensiones que avanza dentro de un encamisado metálico, equipada con herramientas de corte en la punta, que al tiempo que efectúa la perforación, por medio de los álabes que conforman el cuerpo, va rezagando el material hacia el pozo de ataque para que éste pueda ser retirado. La tubería de acero del encamisado se va colocando en la medida en que la perforación avanza. Aunque es factible prescindir del cuerpo del encamisado y atacar sólo con la broca y un anillo en su extremo, no se recomienda, dado que resulta peligroso no contar con un sistema de contención de los empujes generados a nivel del subsuelo.

Los tipos de suelo que puede atacar este sistema van desde las arenas, arcillas, hasta ciertos tipos de roca y conglomerados.



Figura 15 Método de perforación con tornillo sin fin. Fuente: *perforacioneseingenieria.com* (2000)

1.3.3 Equipo y maquinaria.

Para las excavaciones a cielo abierto, el equipo utilizado está en función de las dimensiones de la excavación, desde zanjas poco profundas, en las cuales se utiliza una retroexcavadora, cortadora de disco para pavimentos y camiones de volteo para el retiro de material y acarreo de rellenos, equipo de compactación y equipo propio para reponer la carpeta dañada. Si la profundidad y dimensiones se incrementan se puede utilizar una excavadora de mayores alcances, tal como equipos montados sobre orugas, almejas guiadas o libres, zanjadoras y los mismos equipos de retiro y acarreo de materiales.

En el caso de las excavaciones sin apertura de zanja, además del equipo descrito en los apartados anteriores, como son los compresores de aire, y herramientas propias para cada técnica, cuando la importancia del proyecto lo amerita en cuanto a su extensión, complejidad, cruces con estructuras importantes, diámetros de la línea, es común considerar el empleo de la micro-TBM.

1.4 Tecnología Tunnel Boring Machine (TBM).

Con el objeto de comprender el procedimiento de ejecución de obras con microtuneladoras, es importante saber que éstas máquinas están estrechamente relacionadas con la tecnología de las TBM a gran escala, las cuales fueron desarrolladas para excavar túneles de gran tamaño para diferentes tipos de servicios, tales como pasos ferroviarios, túneles carreteros, grandes emisores de aguas servidas o sistemas de transporte subterráneo, por ejemplo.

De acuerdo con *López, C. (2011)*, la tecnología basada en máquinas integrales para la excavación de túneles, también conocida habitualmente por las siglas TBM, hace referencia a una serie de máquinas capaces de excavar un túnel a sección completa, a la vez que se colabora en la colocación de un sostenimiento provisional o en la puesta en obra del revestimiento definitivo.

Estas máquinas se dividen en dos grandes grupos: topos y escudos. Ambos difieren de forma importante según el tipo de roca o suelo que sea necesario excavar, así como de las necesidades de sostenimiento o revestimiento que requiera cada tipo de terreno.

Así, los topos se diseñan principalmente para poder excavar rocas duras y medias, sin grandes necesidades de soporte inicial, mientras que los escudos se utilizan en su mayor parte en la excavación de rocas blandas y en suelos frecuentemente inestables y en ocasiones por debajo del nivel freático, en terrenos saturados de agua que necesitan la colocación inmediata del revestimiento definitivo del túnel.

1.4.1 Concepto

En función del objetivo que se persigue en un determinado proyecto, del tipo de material que se va a excavar y de las condiciones geohidrológicas del terreno, existen diferentes máquinas y procedimientos, que son los que a continuación se describen, (*López, C. 2011*):

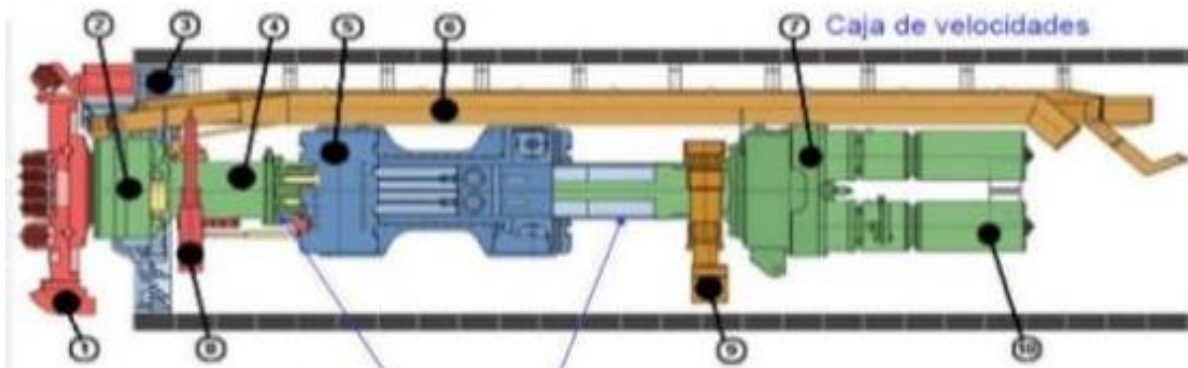
1.4.1.1 Topos.

De manera general, el equipo consiste en una estructura metálica circular de gran diámetro, en cuyo interior se aloja, en el frente, una cabeza rotatoria, que es la encargada de realizar la excavación. Esta cabeza se encuentra equipada con herramientas de ataque y corte accionados por energía mecánica y eléctrica.



Figura 16 Máquina topo. Fuente: Herrenknecht AG

Para la excavación de los escombros producidos, la cabeza incorpora además una serie de cangilones situados en su periferia que recogen el escombro y lo elevan para su descarga en una cinta primaria. La forma de avance de estos equipos se realiza mediante empuje, el cual se da por medio de un sistema de gatos hidráulicos que se apoyan en unos soportes denominados codales o grippers; estos soportes suelen ser móviles y avanzan conforme avanza la maquinaria. En el caso en el que se vayan colocando dovelas como soporte del túnel, el apoyo para el empuje puede ser sobre estas mismas.

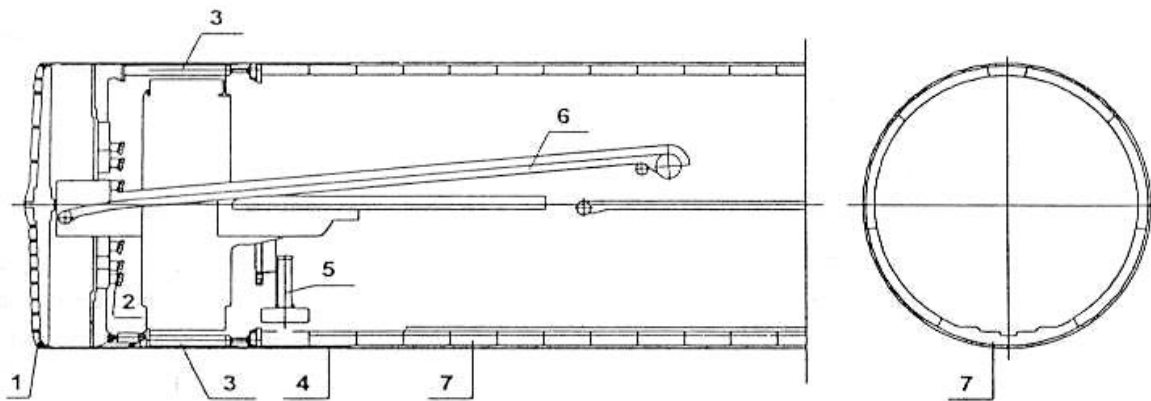


1. Rueda de corte para roca	6. Cinta transportadora
2. Rodamiento principal	7. Accionamiento de rueda de corte
3. Escudo para la tubería de corte	8. Soporte delantero
4. Kelly interior	9. Soporte trasero
5. Kelly exterior	10. Motor eléctrico

Figura 17 esquema de una tuneladora topo. Fuente: Universidad. Francisco de Paula Santander (2005)

1.4.1.2 Escudos.

De acuerdo a la *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales, Puentes y Puertos de Barcelona, E.T.S.E.C.C.P.B. (2005)*, los escudos disponen también de una cabeza giratoria igualmente accionada por motores eléctricos, pero en este caso, normalmente incorpora picas o rascadores, y avanza mediante el empuje de una serie de gatos perimetrales, que se apoyan sobre el revestimiento definitivo de forma inmediata, éste se puede incorporar al retraerse los gatos después de cada avance. Todos estos trabajos se realizan al amparo de una coraza que da el nombre a este tipo de máquinas, tal y como se muestra en la Figura 18.



1. Rueda de corte (equipada con picas o engastes de rueda)	5. Erector de dovelas
2. Motores de accionamiento de rueda de corte.	6. Transportador de banda para evacuación de escombros
3. Cilindros de empuje	7. Dovelas de revestimiento
4. Cola del escudo (zona de montaje de anillo de revestimiento)	

Figura 18 Vista lateral y frontal de un escudo. Fuente: Fernández (1997)

En la coraza del escudo, se aloja el elemento cortador, el cual puede ser manual, una rozadora o una cabeza giratoria.

En este último caso la cabeza giratoria está accionada por motores hidráulicos que permiten una variación constante de la velocidad de giro, y de la reversibilidad de la misma.

La cabeza, en este caso, normalmente monta cinceles o picas, y en ocasiones puede incluso incorporar discos. En terrenos muy variables se pueden colocar discos y picas a la vez, aunque siempre los primeros adelantados 2 o 3 cm sobre las picas. Los cortadores trabajan en terreno duro,

sin intervención de las picas y, en terreno blando, se embotan y dejan la responsabilidad de la excavación a las picas. (*E.T.S.E.C.C.P.B. 2005*).

La cabeza, cuando es giratoria o de rueda, dispone de una serie de aberturas, frecuentemente regulables, por las que el escombros arrancado pasa a una cámara en la que una cinta primaria se ocupa de su evacuación.



Figura 19. Cabeza de corte de la tuneladora La Almodena. Fuente: *Compañía de ecomovilidad, Madrid (2009)*

Como más adelante se verá, en los escudos cerrados que trabajan con presión en el frente, esta cinta primaria se sustituye por un tornillo sin fin o por un sistema de transporte hidráulico del escombros.

Los cilindros de empuje están situados en un tercer cuerpo de la coraza, también llamado cola del escudo. Los cilindros de empuje están distribuidos en toda la periferia de la máquina, y están equipados con zapatas articuladas que permiten un apoyo uniforme sobre las dovelas del revestimiento. Su recorrido marca el ciclo de avance, de acuerdo con *Herrenknecht, M. (2003)*, estando normalmente comprendido entre 1.20 y 1.50 m (ver avance de un escudo en la Figura 20).

Cuando ha finalizado cada ciclo de excavación, se retraen estos cilindros y, en el espacio del tramo de coraza que queda libre, se procede a colocar un nuevo anillo de revestimiento. Para ello, las dovelas que han llegado hasta el back-up de la máquina en mesillas especiales, se transfieren mediante dispositivos adecuados hasta el erector, el cual las coloca una a una hasta completar el anillo. Cuando éste está totalmente cerrado, se puede iniciar un nuevo ciclo de excavación, apoyando los cilindros de empuje contra el nuevo anillo colocado.

El accionamiento del erector suele ser hidráulico, de velocidad variable, muy sensible y preciso para poder aproximar correctamente cada dovela a su situación definitiva.

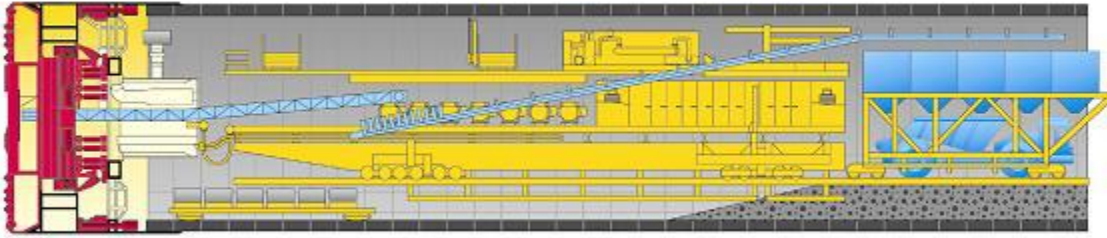


Figura 20 Vista del interior de un escudo abierto mecanizado. Fuente: Herrenknecht AG

La coraza del escudo, en la zona en que se coloca el anillo de dovelas, lleva en toda su periferia unos sellos (cepillos de grasa) que en número de 2 o 3 impiden que la inyección de mortero que rellena el hueco existente en el trasdós de la dovela pase al interior de la máquina.

Este hueco, generado como mínimo por el espesor de la coraza del escudo y por las propias juntas de grasa, tiene habitualmente un espesor entre 7 y 9 cm y su inyección se puede hacer de forma discontinua, es decir, anillo por anillo cada vez que éste queda liberado de la coraza de la máquina o bien, en los casos de gran responsabilidad en cuanto a asentamientos del terreno, de forma continua, a medida que la máquina avanza y el anillo va saliendo de la coraza.

Aunque el esquema de funcionamiento de un escudo en general es semejante, la diferencia se va a encontrar en las características del frente de trabajo y del nivel de estabilidad o inestabilidad que presente el terreno. (E.T.S.E.C.C.P.B. 2005).

De acuerdo con la fórmula de Peck (1967), citada en E.T.S.E.C.C.P.B. (2005), p.p.24, aplicada a suelos, establece que el factor de estabilidad n , se puede calcular de la siguiente forma:

$$n = \frac{\sum_0 - P_a}{c}$$

Donde:

\sum_0 = Presión geostática en el eje del túnel

p_a = Presión que se ejerce contra el frente

c = cohesión

Observación: si $n < 5$; el frente es estable, si $n > 5$; el frente es inestable.

En función de este coeficiente se podrá hablar de escudos abiertos para frentes estables y de escudos cerrados para aquellos frentes que puedan presentar señales de inestabilidad.

En la figura 21 se representa la tipología actual de estas máquinas, partiendo de una división general en escudos abiertos y cerrados, indicando además las características principales en cada uno de ellos.

Tabla 1. Tipología actual de los escudos. Fuente: Fernández (1997)

TIPOLOGÍA DE LA CABEZA	MÉTODO DE EXCAVACIÓN	ESTABILIZACIÓN DEL FRENTE	SISTEMA DE EXTRACCIÓN DE ESCOMBROS	TIPO POSIBLE DE REVESTIMIENTO (DOVELAS)	SECCIÓN TIPO A EXCAVAR
Abierta	Manual (martillo picador, etc.)	Únicamente de tipo pasivo (máquina parada)	Cinta	Expandidas, ordinarias inyectadas o atornilladas inyectadas.	Circular, posible herradura o rectangular
	Semimecanizado (cuchara, rozadora, martillo pesado, etc.)				
	Mecanizados (rueda)				
Cerrada	Mecanizados (rueda sin presión)	Cierre mecánico activo		Atornilladas e inyectadas	Circular
	Presurizados de rueda	Aire comprimido	Tornillo sin fin		
		Presión equilibrada de tierras (EPB)			
		Lodos bentónicos (hidroescudos)			

1.4.1.3 Escudos abiertos.

Son utilizados cuando se presentan condiciones estables del terreno y existe poca o nula presencia de agua, en este caso, el elemento excavador puede ser una rozadora o una retroexcavadora o por medios manuales.



Figura 21 Escudos de frente abierto con rozadora y pala excavadora mecanizada. Fuente: (Geo-Enviroment Laboratory Faculty Of Engineering Nagasaki University)

En esta clasificación, también entran los escudos mecanizados con cabeza giratoria.

1.4.1.4 Escudos cerrados.

Están diseñados para trabajar en terrenos difíciles, no cohesivos y con frecuencia bajo el nivel freático y saturados de agua, en frentes claramente inestables.

En este caso, la única opción disponible es la circular y el revestimiento es de manera casi obligada, a base de dovelas de concreto armadas y atornilladas entre sí, garantizando con esto la impermeabilidad del sistema.

En este esquema, los escudos cerrados se pueden sub-clasificar en escudos mecanizados de rueda con cierre mecánico y en escudos presurizados con aire comprimido.

En los primeros, se dispone de unas puertas de abertura controlada hidráulicamente, que en caso necesario se pueden cerrar totalmente, quedando el túnel sellado. Mediante la regulación de la apertura de estas puertas, se puede controlar la cantidad de material excavado y que penetra en la cámara.

Hablando del segundo caso (escudos presurizados con aire comprimido), el aire comprimido se ha utilizado desde hace bastantes años para presurizar totalmente los túneles construidos bajo freáticos no muy importantes (0.1 o 0.2 Mpa) (*Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales, Puentes y Puertos de Barcelona, 2005*), entre la esclusa inicial de entrada y el frente, en cifras ligeramente superiores a la carga agua más la carga del terreno.

En el frente del túnel se podían utilizar simples escudos de entibación u otros con rueda abierta, ya que la única condición era disponer de un terreno con coeficiente de permeabilidad al aire bajo, constituido en su mayoría por arenas finas, arcillas y limos.

El sistema, teóricamente sencillo, hoy en día está prácticamente abandonado, ya que cualquier pérdida de aire, ya sea en el frente del túnel o a través del propio revestimiento, podría originar una catástrofe.

1.4.1.5 Hidroescudos o escudos de bentonita (slurry shield).

Los hidroescudos son máquinas diseñadas para trabajar en suelos por materiales blandos, como arenas y gravas y con presencia de agua. En estas condiciones cualquier otro equipo de los anteriormente descritos presentaría problemas al operar. El principio de operación de estos equipos

es el de aprovechar las propiedades de los lodos bentoníticos para estabilizar el frente de excavación.

Una consideración importante es que la granulometría del material deberá estar en el rango de los 0.1 y 60 mm, lo cual ayuda a una eficiente recuperación de la bentonita, rangos que sobrepasen este margen, hacen inviable el sistema desde el punto de vista económico.

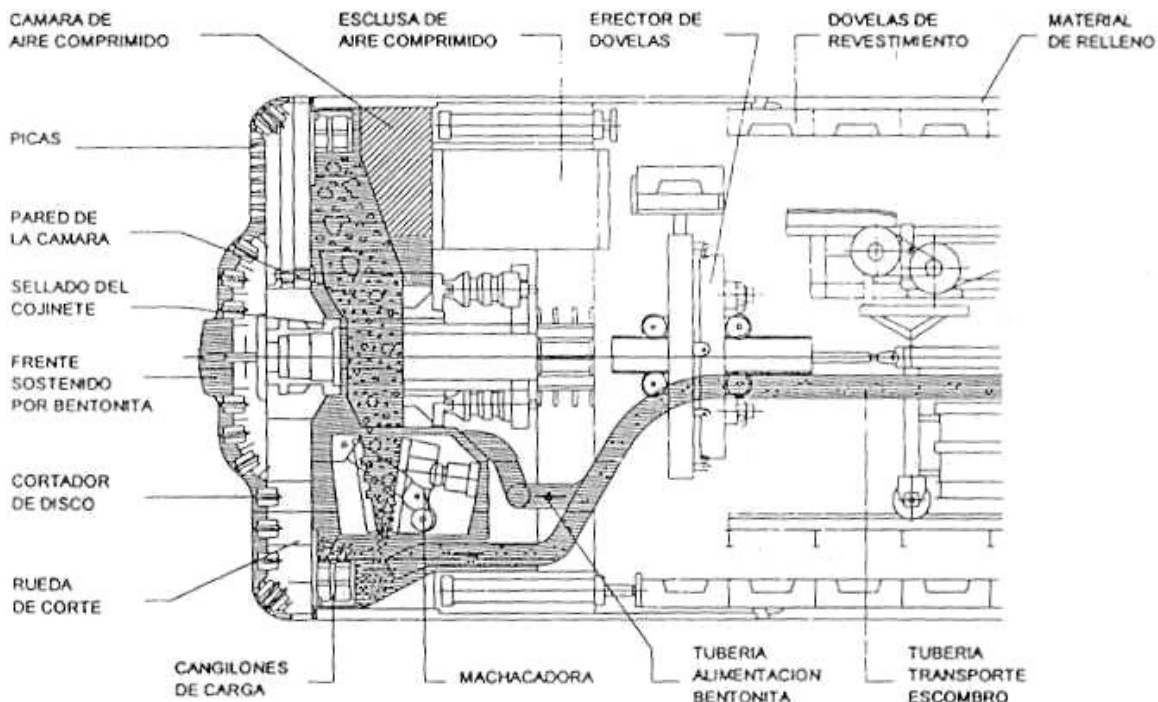


Figura 22 Esquema de un escudo de lodos bentoníticos. Fuente: Fernández (1997)

Por otro lado, un material de granulometría mayor a 60 mm obliga a incluir un sistema de triturado en la cámara, lo cual, aunque es factible, no es la opción más económica.

1.4.1.6 Escudos de frente de presión de tierras (EPB)

También conocidos por sus siglas en inglés EPB (Earth Pressure Balance).

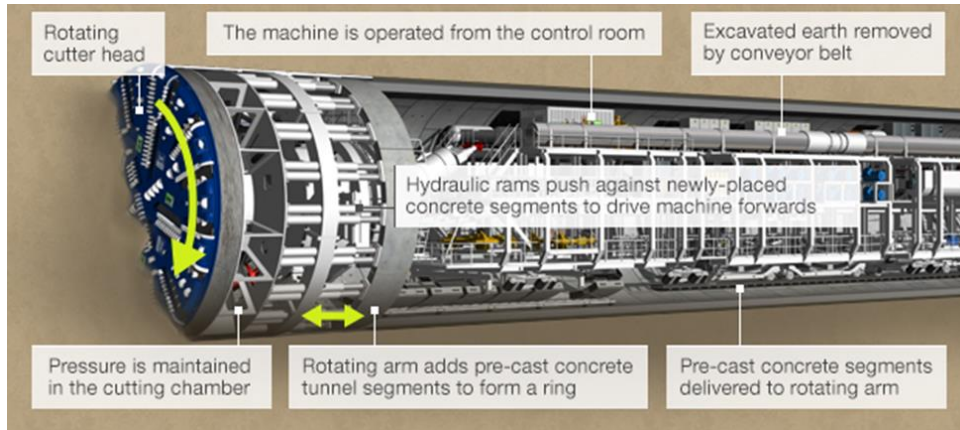


Figura 23 Composición general de una tuneladora EPB. Fuente: Herrenknecht AG.

De acuerdo con López, C. (2011), en este tipo de TBM, se abarcan prácticamente la totalidad de los terrenos que pueden presentar inestabilidades.

La idea de estas máquinas, viene en parte de los hidroescudos y en parte de los escudos de rueda presurizados con aire comprimido.

Del primero toma el principio del sostenimiento del frente mediante un equilibrio de la presión del terreno más el agua con la presión que se mantiene en la cámara de la cabeza del escudo, y del segundo el principio de evacuar el escombros en un estado próximo al sólido mediante un tornillo sinfín en la fase de paso a la presión atmosférica y por medios convencionales (cintas, vagones, etc.) en la fase final (ver Figura 24).

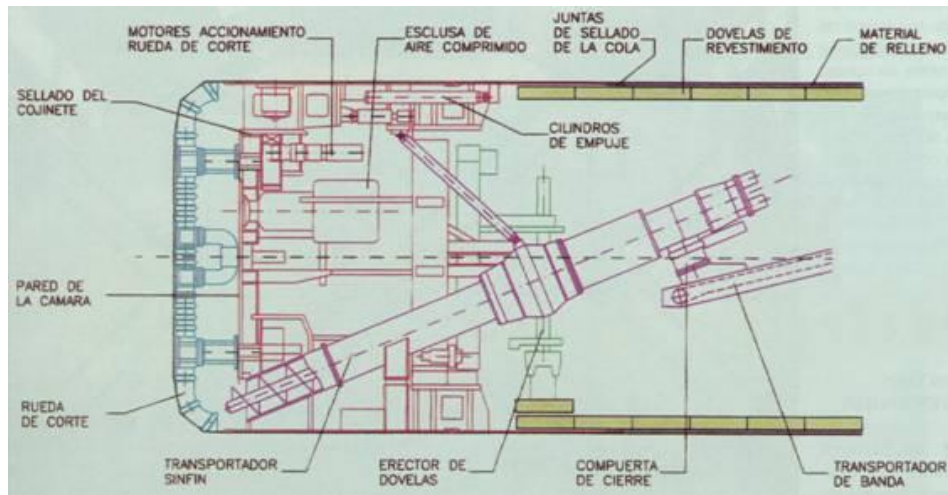


Figura 24 Esquema de funcionamiento de un escudo EPB. Herrenknecht AG.

De acuerdo con *Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales, Puentes y Puertos de Barcelona, (2005)*, el escombros desplazado por el cabezal de corte pasa a una cámara situada tras él, y se va comprimiendo a medida que ésta se va llenando. Un transportador de tornillo procede a desalojar el material excavado, siempre de forma controlada para mantener la presión en la cámara que previamente se ha prefijado.

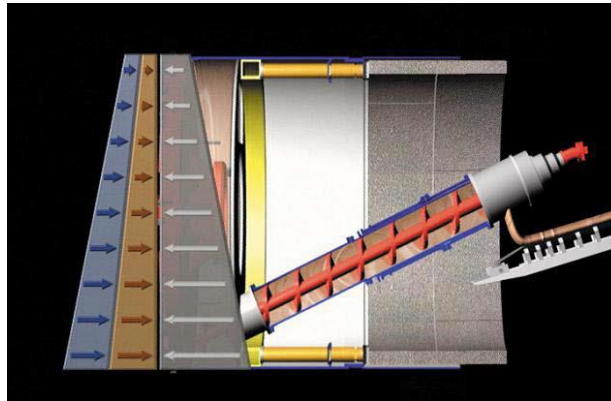


Figura 25 Esquema de presiones ejercidas por el escudo sobre el frente. *Fuente: Herrenknecht AG.*

En la mayoría de los terrenos en los que se utilizan estos tipos de máquinas, y sobre todo en aquellos arenosos o con gravas que presentan una plasticidad muy baja o nula, es necesario disponer de una mezcla plástica y viscosa que satisfaga ciertos requerimientos de impermeabilidad y transmisión controlada de la presión en toda la sección del túnel, a la vez que los productos excavados puedan ser manejados a través del tornillo de desescombros.

Esto se consigue mediante la inyección en la cabeza de la máquina, a través de unas aberturas especiales, de una serie de productos que, en forma de polímeros o espumas, se mezclan con el terreno y el agua que contiene mejorando la plasticidad del terreno que se introduce en la cámara de la cabeza, colaborando eficazmente en la estabilidad del frente. Adicionalmente, estos aditivos, en caso necesario, pueden igualmente inyectarse en la cámara del escudo e incluso en el tornillo sinfín.

Para controlar el sistema de equilibrio por presión de tierras es necesario el control del volumen de escombros desalojados en el tornillo estableciendo un equilibrio con el excavado, lo que se consigue controlando y manteniendo constante la velocidad del tornillo sinfín en relación con la presión de tierras dentro de la cámara.

La presión de tierras se establece inicialmente en función del tipo de terreno y de la carga de agua correspondiente y se va ajustando de forma constante en función de mediciones continuas de subsidencias antes y después de la excavación. La máquina dispone de detectores de presión en la cabeza, cámara y tornillo cuyas lecturas recogidas y procesadas en un ordenador permiten el control de la estabilidad del frente.

1.4.2 Micro-TBM

De acuerdo con Gallo, J. (2017), “*La MTBM es un sistema de excavación de galerías de diámetro 1.000 a 2.500 mm que se emplean para la ejecución de túneles de servicio. El sistema realiza el arranque, carga, transporte y sostenimiento de forma continua. Las MTBMs forman parte de las tecnologías sin zanja*”.

Los proyectos en los que se emplean Micro-TBM, tienen las siguientes particularidades frente a los de TBMs:

- Las Micro-TBM instalan tubos prefabricados, que sirven de sostenimiento, y son empujados desde el bastidor, ubicado en el pozo de entrada, por lo que su cometido es, también, transmitir el empuje desde el pozo. Por el contrario, en el ciclo de trabajo de las TBMs se instalan dovelas o sostenimientos convencionales, tales como anclajes o concreto lanzado.

Las longitudes de los proyectos de Micro-TBM son mucho más cortas, y rara vez superan los 800 m. Las longitudes habituales son menores de 500 m, llegándose incluso a realizar tramos de 50 m para pasos bajo carreteras o ríos.

El diámetro de la galería de Micro-TBM, de dimensiones comunes entre 1,000 a 2,500 mm, dificulta las tareas de cambio de las herramientas de corte, o lo dificulta mucho por debajo de los 1,200 mm. También es imposible cambiar el cabezal de la máquina a no ser que se excave un pozo y se rescate. Esta maniobra también es complicada dado que muchos de los proyectos se realizan en entornos urbanos.

Las obras de Micro-TBM se realizan a pequeñas profundidades, normalmente menores de 20 m, por lo que es frecuente atravesar transiciones entre macizos rocosos sanos y alterados donde la resistencia y grado de fisuración varían notablemente. Los proyectos de Micro-TBM tienen una inversión mucho menor que en las TBMs debido a su baja longitud y diámetro. Normalmente, los

limitados recursos económicos no permiten costear un estudio geológico lo suficientemente detallado que requiere la dificultad geológica de perforar en terrenos previsiblemente cambiantes.

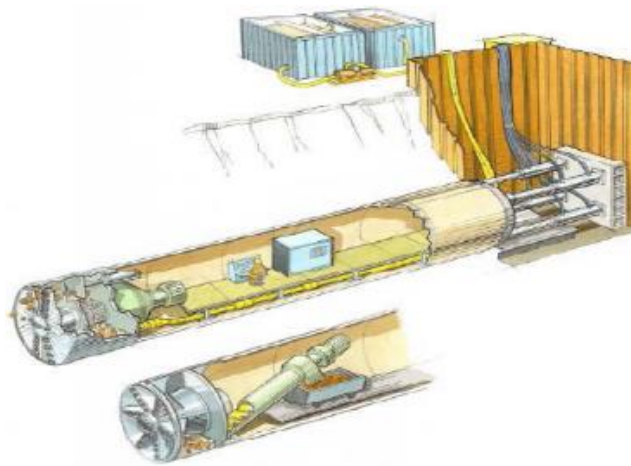


Figura 26. Sistema de microtuneladora. Fuente: Mínguez, F. (2015)

1.5 Selección de la técnica de excavación más apropiada.

De acuerdo con López, C. (2011), la selección de la técnica de excavación tendrá que ver con una lista de condiciones que a continuación se presentarán de manera general. Todas estas condiciones formarán parte de un análisis de beneficio-costos.

Para determinar la posibilidad de la ejecución de una perforación es necesario realizar al terreno un estudio geotécnico básico, que entregue información sobre los tipos de terreno a excavar y su comportamiento, para disponer de antemano de una serie de medios y cálculos con los cuales comenzar el trabajo tratando de controlar una serie de riesgos establecidos. Algunos de estos valores que entrega un estudio geotécnico son:

- Granulometría.
- Consistencia.
- Humedad.
- Permeabilidad.
- Estratigrafía, buzamiento y fallas.
- Factores climatológicos, (aguas, lluvias, hielos, sequía).
- Vibraciones.

Los suelos se componen de partículas sólidas y huecos. Los huecos pueden retener agua en mayor o menor medida de acuerdo con el tipo, forma, tamaño y disposición de las partículas que condicionan la permeabilidad a través del tamaño de los poros. Del contenido de agua retenida depende a su vez la deformabilidad y resistencia del suelo. Así podemos diferenciar varias clases:

- Los suelos de grano grueso o arenosos, son permeables y su comportamiento mecánico viene definido por el peso y rozamiento de sus partículas; su resistencia está en función de la proximidad de sus partículas (densidad relativa). Las deformaciones motivadas por la acción de fuerzas exteriores se producen con rapidez.
- Los suelos de grano muy fino, arcillosos, contienen huecos muy pequeños y son impermeables, por lo que retienen el agua; su comportamiento depende de la película de agua existente entre sus partículas; su resistencia depende del espesor de esta película, cuanto más gruesa es más débil el suelo; las deformaciones son motivadas por la acción de las fuerzas exteriores que se producen muy despacio, ya que el paso de agua a través de los huecos es un proceso lento.
- Los suelos limosos tienen un comportamiento intermedio. Los inorgánicos son suelos de grano fino con poca o ninguna plasticidad. Generalmente, se denominan polvo de roca, que se constituye de partículas más o menos equidimensionales de cuarzo.

Granulometría: se denomina composición granulométrica al conjunto de distintos tamaños que integran un suelo en relación con el peso total del mismo. Para conocer el tamaño exacto de las partículas del suelo se procede a un estudio granulométrico. Las partículas grandes se identifican por tamizado hasta 63 micras. Las de menor tamaño se identifican por sedimentometría basada en la ley de Stokes o bien por centrifugado.

Casi todos los técnicos de mecánica de suelos, emplean su criterio y experiencia personal para la clasificación del mismo, la mayoría se basan en la diferenciación de cuatro fracciones granulométricas: la fracción arena y grava se puede subdividir en fina, muy fina y gruesa; las gravas mayores pueden denominarse como bloques; las arcillas suelen encontrarse en la fracción más pequeña del material del suelo, superando raramente las 4 micras de tamaño; y entre las cinco y setenta micras podemos encontrar los limos.

Las resistencias mecánicas de los suelos arenosos, arcillosos y limosos ya mencionados son bajas comparadas con las rocas que se pueden encontrar en los trabajos de perforación.

Dureza de las rocas. La resistencia a la compresión simple es el mejor indicador de la dureza de las rocas frente a su aptitud a la trituración. Esta resistencia puede estimarse, sea directamente en el laboratorio, ensayando muestras provenientes de perforaciones con recuperación de núcleos, o indirectamente en el campo, a partir de muestras irregulares mediante el ensayo de carga puntual, o aún en el mismo macizo mediante la lectura de rebote del martillo Schmidt, o, finalmente, a partir de tablas de clasificación de dureza.

Herramientas de corte. Esta selección estará determinada por el grado de dureza del material predominante a excavar o el tipo de suelo, según sea el caso.

Tamaño. Esta característica estará en función del tipo de tubería que se servirá, así como del tamaño del motor con el que contará la maquinaria, además del tipo de herramienta.

Sistema de sujeción, de avance y de control. Estos configuran el sistema de operación que proporcionará el rendimiento proyectado.

Sistema de retiro de rezaga. El cual estará también en función del tipo de escombros a retirar, su tamaño y composición, de lo cual se puede derivar a la utilización de un sistema de canchales o de tornillo sin fin.

Infraestructura que habrá que cruzar. Muchas veces un proyecto de excavación mecanizada, tiene que ver con salvar cierto tipo de infraestructura o algún sistema natural, como lo es un arroyo, un río, laguna, etc. De tal forma que el sólo hecho de cruzar estos puntos sin afectaciones, ya es un componente a favor de la excavación mecanizada en lugar de un sistema convencional.

2 Etapas del proyecto.

2.1 Anteproyecto.

En la etapa de anteproyecto, se hacen definiciones preliminares en base a la información de la ingeniería básica. Menciona *López, C. (2011)*, que el proyectista de un túnel debe tener siempre en cuenta seis grupos de temas básicos, los cuales son:

- El objetivo de la obra subterránea
- La geometría del proyecto: trazado y sección tipo
- La geología y la geotecnia del macizo
- El sistema constructivo

- Dimensionamiento y cálculo de la propuesta estructural
- Las instalaciones para la explotación
- Los riesgos a asumir
- La financiación del proyecto.
- Temas varios

2.1.1 Formulación del problema.

Menciona López, C. (2011): “(...) el proyecto de una obra subterránea, como el de cualquier obra ingenieril, suele ordenarse en cuatro conjuntos documentales, denominados memoria, planos, especificaciones y presupuesto”.

“Los dos primeros documentos, la memoria y los planos, contienen lo que se podía llamar **el diseño de la obra**, entendiendo por tal la aportación personal del proyectista”.

Continúa López, C. (2011), “(...) pues bien, el diseño de un túnel no puede seguir el proceso ordinariamente aplicado al resto de los tipos estructurales, porque existen hechos no habituales en otras especialidades de la ingeniería, entre los que hay que destacar, en primer lugar, la complejidad del elemento estructural. Dicho en otro modo, en el diseño del túnel el proyectista no puede emplear libremente su imaginación para llegar a definir un conjunto de elementos estructurales aportados, que han de dimensionarse sin más influencia externa que la comprobación de que su apoyo o cimiento en el terreno es viable”.

En efecto, la estructura a considerar en el caso de un túnel es tanto el elemento o elementos materiales aportados por el hombre, como como el terreno constitutivo del propio macizo. Puede decirse realmente que el terreno próximo al conducto forma parte de la estructura resistente, con tanta o más incidencia en el proyecto, que los materiales que añade el proyectista”.

2.1.2 Marco de referencia (alternativas de excavación).

De acuerdo con la *Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes*. (2013), en su capítulo 7, nos dice que “La elección del método de excavación de un túnel depende de varios factores dentro de los que destacan el tipo de terreno a excavar y su longitud. Hasta ahora la construcción de túneles carreteros en México se ha realizado con los métodos de excavación convencional con perforación y voladura utilizando explosivos y la excavación mecánica mediante máquinas de ataque puntual como rozadoras, martillos

hidráulicos, etc. Otro método de excavación de túneles corresponde con la utilización de máquinas tuneladoras TBM (Tunnel Boring Machine), a la fecha en México no se ha construido ningún túnel carretero con este método”.

Es importante mencionar que cada método de excavación tiene ventajas y desventajas por lo que se deberá hacer un análisis y una evaluación de cada proyecto en particular, para determinar el más conveniente.

El método de excavación con TBM permite excavar la sección completa del túnel al mismo tiempo que se realiza la colocación del sostenimiento o un revestimiento.

Lo anteriormente descrito, aplica también para una micro-TBM, ya que los trabajos son similares aun cuando el propósito de la estructura sea distinto.

La aplicación de algún método de microtuneleo está en función principalmente del tipo de terreno a excavar, como se ya se ha visto, de igual manera en que una tuneladora de grandes dimensiones funciona, a nivel microtuneladora, también existen los equipos que se adecuan a las condiciones del terreno en cuanto a su composición, desde arcillas, arenas sueltas, conglomerados, roca de distintos grados de dureza o terreno de composición mixta, de estas características se elegirá la que tenga predominio en función al trazo del proyecto, para poder implementarla.

Otra característica que interviene en la definición del tipo de equipo a utilizar, será el tamaño del proyecto, dado que, si el tramo es relativamente corto y a una profundidad escasa, se puede pensar en alternativas tales como las que se describieron en el apartado 1.3.2, con las cuales se podría solucionar el problema sin hacer una inversión tan fuerte.

La disponibilidad de los recursos es otra característica que puede llegar a limitar el uso de estas tecnologías, en cuanto a su disponibilidad o a la economía que nos permita acceder a estas.

Las condiciones del entorno también pueden llegar a ser determinantes al momento de la elección del método de excavación, dado que la densidad de infraestructura que exista, la disponibilidad de espacio de trabajo, la importancia de las zonas que eventualmente se pudieran cerrar al servicio, nos van a acotar hasta qué punto se puede usar determinada alternativa.

2.1.3 Justificación.

La decisión de elegir un método de excavación por microtuneleo dependerá también de un estudio de costo-beneficio, en el cual podremos determinar si el uso de esta tecnología es rentable en cuanto a tiempos, montos de inversión, beneficios esperados y una posible reutilización del equipo en otros proyectos, con lo cual se podría incluso amortizar dicha inversión. Un rubro importante es el tiempo de instalación, el cual se reduce significativamente con este tipo de tecnología.

El uso de la tecnología de microtuneleo, nos ayuda a generar mucho menos molestias al tránsito y, en consecuencia, reducimos la contaminación ambiental.



Figura 27 microtuneleo contra excavación a cielo abierto. *Fuente: AMITOS (2004)*

Otro factor importante es que entre más largo sea el tramo del proyecto, más se incrementa la relación costo-beneficio, dado que las ventajas seguirán incrementándose. De igual manera, se reducen los accidentes dado que el microtuneleo es un procedimiento más seguro porque no se necesita tener personal dentro de la excavación, los manejos de elementos de contención (ademes) se eliminan en el tramo, sólo se utilizan en los pozos de acceso.

2.1.4 Objetivo.

El objetivo principal es el de realizar un proyecto de excavación sin el uso de zanjas para inducir un servicio, en las mejores condiciones de economía, seguridad, funcionamiento, respeto al entorno con una mínima invasión del espacio, garantizando la obra en costo, seguridad, tiempo y calidad.

2.1.5 Metodología.

De acuerdo con el objetivo del presente trabajo, se propone el uso de una microtuneladora con la cual se logrará un avance efectivo en el proyecto, cuidando los tiempos de ejecución y la calidad de la obra.

La geometría del proyecto es uno de los primeros puntos a considerar, esto es, su trazo y sección tipo.

En primera instancia, se deberá contar con los estudios de levantamiento topográfico ubicando en trazo y nivelación todos los elementos físicos que se encuentren involucrados. Contar con una georreferenciación de los elementos que pudieran significar algún riesgo al momento de la excavación.

Los estudios de caracterización geológica son importantes, para determinar en un nivel de información básica el tipo de terreno que se tiene y en base a esta información, poder hacer un programa de estudios geotécnicos que otorguen información específica de las condiciones de excavación.

De acuerdo con *López, C. (2011)*, por lo que al trazado en planta se refiere, el proyectista ha de considerar como principales puntos de partida los siguientes:

- La geotecnia local del macizo a atravesar. Desde el momento en que se estima la posible solución (o soluciones) en planta del proyecto, hay que disponer de una información de tipo general sobre las condiciones geotécnicas del macizo a atravesar, aunque luego se vuelva sobre el tema. Ello permitirá establecer las alternativas del trazado, en principio, más adecuadas desde el punto de vista geotécnico.
- La afectación a obras subterráneas existentes. Esta información es tan importante como la relativa al conocimiento geotécnico del macizo.
- La afectación a obras exteriores existentes. El fenómeno de la subsidencia del terreno superficial, debida a la ejecución de un túnel bajo el mismo, existe siempre, aunque, naturalmente, depende específicamente de las características geotécnicas del terreno.
- Verificar si los radios de trazado están condicionados.
- Verificar contrapendientes y drenajes de agua.

De acuerdo con *López, C. (2011)*: El estudio geológico de un macizo se concreta en el establecimiento de diversas características de las rocas del mismo, entre las que destacan dos: la *estructura geológica* que presentan y la *clasificación geológica habitual* junto con el posible estudio de su *mineralogía*.

En cuanto al estudio geotécnico se refiere, este tiene que ir mucho más allá, porque de lo que se trata es de prever *el comportamiento mecánico del macizo rocoso*, cuando se encuentre sometido a *modificaciones* en su *estado tensional de equilibrio*, consecuencia de la construcción del túnel.

En los estudios geotécnicos, ya conoceremos a detalle las características que son importantes para el funcionamiento de la máquina, tales como presión debida al nivel de aguas freáticas, características del suelo y extensión del mismo, dado que puede cambiar, presión que ejercerá sobre nuestro frente de excavación o si se trata de roca, su índice de calidad que nos hablará acerca del desgaste de las herramientas de corte.

El proyectista deberá considerar (para el caso de rocas) que en un macizo rocoso necesita una definición geotécnica que ha de abarcar los cuatro aspectos siguientes:

- a) Características intrínsecas del material básico (las rocas matrices).
- b) Evaluación de discontinuidades. Rumbos y buzamientos, su frecuencia, apertura o separación de dichos planos, rugosidad de los planos límites, presencia y circulación de agua.
- c) Respuesta esperable de la roca (así como de las discontinuidades que presente) en el supuesto de cambios en el estado de equilibrio tensional “roca-rellenos-agua”.
- d) Respuesta final esperable del macizo a los cambios antes citados, que es el objetivo final del estudio geotécnico del mismo.

En cuanto al sistema constructivo se refiere, se dice frecuentemente que éste es consecuencia de los estudios básicos del proyecto. Una planeación de espacios y vialidades de uso en etapa de obra, nos servirá para definir el tipo de procedimiento constructivo que haremos para ejecutar los pozos de ataque y llegada, así como ubicar bancos de tiro y contar con los permisos correspondientes y planear la llegada de los equipos y tener en tiempo y forma las estructuras que los recibirán para empezar a habilitarlos.

2.1.6 Recursos.

Se deberá proveer al proyecto de los recursos suficientes en cuanto a:

Materiales: revestimientos, concreto premezclado, lodos estabilizadores, agentes espumantes si es el caso, así como patios de materiales bien organizados para evitar movimientos innecesarios, taller de mantenimiento y reparación, y bodegas.

Mano de obra: requerida en cantidad y calificación como técnicos soldadores, albañiles, ayudantes, operadores, topógrafos, y mandos superiores y medios. Contar con espacios planificados para reuniones de carácter técnico.

Equipos: se debe planificar la llegada, operación y salida de excavadoras para habilitar el pozo de entrada, así como del sistema que se elija para generar el espacio (tablestacas o estructuras más definitivas como pilas o lumbreras).

2.1.7 Cronograma.

Se deben estimar los tiempos de todas las actividades que componen el proceso de la obra, preferentemente manejar por partidas, desde actividades preliminares, preparación de estructuras de acceso, tiempo de llegada del equipo, montajes, habilitado de sistemas de suministro de energía eléctrica, neumática, taller de mantenimiento y reparación. En cuanto a la actividad principal, que será la excavación, conocer los rendimientos de la maquinaria en función del tipo de terreno a excavar, ayudará a definir el tiempo de terminación de la obra.

En el cronograma de obra, se deberá generar una ruta crítica, en la cual se identifican las actividades que no tienen holgura en su tiempo de ejecución, de tal modo que cualquier retraso en estas actividades, nos llevará a un retraso en la entrega final o a sobrecostos no contemplados.

2.2 Ingeniería básica.

2.2.1 Estudio geológico.

La caracterización geológica es el primer estudio de gabinete y campo que se realiza para comenzar a definir las estrategias en cuanto al proceso de excavación.

La intención de este estudio es la de representar sobre el área de recorrido del trazo previamente establecido por la topografía, la composición del terreno, desde su formación en términos geológicos y los eventos que lo fueron configurando y el resultado es un mapa en donde se reflejan

las distintas composiciones de rocas y materiales, tales como tipos de suelo, macizos rocosos, sedimentos, lentes de arena o conglomerados, minerales existentes, disponibilidad de mantos acuíferos y su geología estructural (fallas, rumbos y echados, etc.).



Figura 28 ejemplo de composición estratigráfica del terreno. *Fuente Instituto de Geología UNAM (1998)*

Aun cuando este estudio es más útil en términos de aplicación hacia la conservación y manejo de los recursos naturales, para efectos de trabajos de ingeniería, representa una primera aproximación a la calidad de los suelos con los que se va a trabajar.

En el estudio de caracterización se definen los materiales de acuerdo a su tipo: si son rocas, estas pueden ser de formación ígnea, sedimentaria o metamórfica, también se determina su composición y edad. Del mismo modo se definen las estructuras que componen la estratigrafía, tales como falla o pliegues y que tendrán un impacto en el rendimiento de la excavadora. Un punto relevante puede ser la conformación de oquedades o socavones, los cuales vuelven el terreno inestable, sobre todo cuando se excava.

En este nivel de información, también se puede obtener un perfil estratigráfico, el cual representa la secuencia de formación de los diferentes estratos en el tiempo, así como su composición en cuanto a los materiales que lo constituyen.

2.2.2 Estudio geotécnico.

Los estudios geotécnicos nos ayudan a definir con mayor detalle las propiedades de los suelos que estamos estudiando. En este apartado se estudian las propiedades físicas y mecánicas del terreno.

Para contar con un estudio completo de geotecnia, se deben cumplir las siguientes etapas:

- Exploración de campo. En la cual se realiza una inspección visual y reporte fotográfico de la zona y se realizan estudios tales como sondeos de penetración estándar, muestreos con tubo shelby, estudios con cono eléctrico, obtención de núcleos de roca, etc.
- Pruebas directas en sitio, tales como placas de carga y pruebas de grado de compactación.
- Estudios de laboratorio. En donde se determinarán las propiedades índice (límite líquido, límite plástico) y las propiedades mecánicas (tenacidad, resistencia a cortante, etc.)
- Estudios de gabinete. En donde se interpretarán los resultados obtenidos en campo y en laboratorio y se emitirán recomendaciones acerca de posibles asentamientos y de la capacidad de carga del terreno.



Figura 29 Estudio geotécnico en campo. Fuente: Laboratorio Labycta, (2003)

Los valores esperados de un estudio geotécnico para realizar los estudios básicos son (*Salcedo, H. 2007*):

- Granulometría
- Consistencia
- Humedad
- Permeabilidad
- Estratigrafía, buzamientos y fallas
- Factores climatológicos (agua, lluvia, hielo, sequía)
- Vibraciones.

Además de los estudios geotécnicos, que son estudios directos, se cuenta con el apoyo de los estudios geofísicos, los cuales utilizan metodologías indirectas para determinar, por ejemplo, la existencia de cavidades o minas. Estos estudios se hacen mediante técnicas especializadas tales como georadar, prospección eléctrica y prospección sísmica.

2.2.3 Estudios complementarios.

En este apartado, hablamos de realizar estudios tales como ubicación de bancos de tiro, los cuales son de alta relevancia en función de que se tendrán considerables volúmenes de excavación y será necesario disponer de ellos de la manera más adecuada.

También dentro de los estudios complementarios, se tienen los que nos determinan las presiones que ejercerá el nivel freático (en caso de existir), sobre el subsuelo. Mediante la prospección geohidrológica se pueden determinar los tipos de material que conforman un terreno, así como sus espesores aproximados, las estructuras geológicas y la presencia de agua.

Los estudios topográficos, son los primeros trabajos que se realizan, dado que nos otorgan información inmediata acerca del proyecto. De acuerdo a *Moreno, A. (2006)*, y haciendo referencia a *O'rouke, T.D. (1984)*, durante el proceso de planeación y diseño, existen áreas de especial cuidado en las investigaciones geotécnicas, tales como el alineamiento y perfil al momento de hacer la selección del tipo de túnel, así como las condiciones generales del subsuelo, principales discontinuidades, contactos y discordancias, así como los edificios adyacentes e instalaciones subterráneas existentes.

El plano de trazo topográfico nos mostrará el relieve del terreno bajo el cual pasará nuestro proyecto y nos dará la información necesaria para el control de asentamientos en el mismo y así evitar daños en las estructuras que se encuentren en el área. La información de niveles será importante para la tarea anterior y además para el control de la ruta del proyecto.

Dentro de la gestión de riesgos de los proyectos de túneles, la topografía juega una tarea importante en razón de que cualquier desviación no planeada representa tiempos y costos considerables.

Menciona *López, C. (2011)* que, por lo que al trazado en planta se refiere, el proyectista ha de considerar como principales puntos de partida los siguientes:

- La geotecnia local del macizo a atravesar. Lo cual permitirá establecer las mejores alternativas del trazado en función de la geotecnia existente.
- La afectación a obras subterráneas existentes.
- La afectación a obras exteriores existentes. El fenómeno de la subsidencia de la superficie del terreno, debida a la ejecución del túnel bajo la misma, está siempre presente.

- El trazado en alzado. Con el cual en caso de que el servicio sea para aguas servidas, le garantizará el escurrimiento proyectado, y en el caso de que sea para cruzar algún otro servicio o infraestructura existente, nos dará la seguridad de un paso sin afectaciones.
- El trazo de la sección tipo del túnel que, para el alcance del presente trabajo, ya viene dado por el tipo de Micro-TBM a ocupar.

Aun cuando el sistema de guiado de una tuneladora es a base de un láser controlado por una estación total desde el puesto de control, el uso de la topografía clásica es recomendable para la verificación del recorrido como de la geometría.

Por otra parte, los estudios geohidrológicos en la etapa de estudios complementarios nos definen la cantidad de riesgos que deberemos prever durante el proceso de excavación. Menciona *López, C. (2011)* que el conocimiento de la complejidad del terreno, es esencial para el buen diseño geotécnico de las excavaciones subterráneas dado que, conociendo el comportamiento del terreno circundante, podrán elegirse adecuadamente las medidas de ingeniería y el sostenimiento adecuados. El colapso es el resultado de la inestabilidad. El comportamiento del terreno depende de diversos factores, como pueden ser la composición de un macizo rocoso, el efecto de las tensiones y del agua subterránea presentes, así como el propio tamaño de la excavación.

De acuerdo con *Muñoz, L. (1987)*, las condiciones geohidrológicas se evalúan de dos maneras: de manera cualitativa, que es por medio de la observación directa, y de manera cuantitativa, que es midiendo el caudal de agua o presión existente en el subsuelo. Para el caso de un macizo rocoso, estos datos nos servirán para hacer ajustes a los valores de calidad de la roca, con la cual se efectúa el diseño de los sostenimientos de los túneles.

Con la información geológica, topográfica y geohidrológica, se puede estimar el comportamiento del subsuelo al momento de generar la excavación y del mismo modo, se puede ir evaluando en cada avance, el comportamiento del mismo, tanto a corto como a largo plazo.

Las características geológicas más habituales que pueden presentar un peligro para la seguridad y la salud en la construcción de túneles, son:

- Agua a presión.
- Arcillas no consolidadas o zonas arenosas.
- Tensiones en la roca (altas o bajas).

- Macizos rocosos fracturados o bloques.
- Gas.

También, como parte de los estudios complementarios, se deberá definir el tipo de tubería a hincar. Como se ha mencionado, los rangos de aplicación para el método de microtuneleo con hinca de tubería, van de los 25 mm hasta los 3,500 mm, siendo el rango más común, entre los 600 mm y los 1,200 mm, y las opciones de hincar tuberías van desde líneas conductoras (paso único), como tubería de concreto reforzado y tubería reforzada con fibra de vidrio, hasta tubería de acero (paso doble), las cuales se pueden usar en diferentes servicios, tales como acometidas, colectores, oleoductos, gasoductos, etc. (*Mínguez, F., 2015*).

Finalmente, ya con la información recabada, dentro de la ingeniería básica debemos contar con un estudio de factibilidad técnica y económica, el cual deberá contener los elementos anteriormente mencionados y un estudio de inversión, en el cual se describan los montos de gastos y los beneficios esperados en el período de tiempo de la vida útil del proyecto, con lo cual determinaremos su viabilidad.

2.3 Proyecto ejecutivo.

En el apartado de proyecto ejecutivo, se integra toda la información de campo y gabinete, se desarrollan las ingenierías que definirán todo el proyecto, desde su geometría, composición de los elementos mecánicos, las estructuras de apoyo, tales como pozos de entrada y de salida. En función del tipo de microtuneladora, se requerirá desarrollar detalles de apoyos, logísticas para los equipos de suministro de energía eléctrica, mecánica, desalojo de escombros y disposición de los mismos.

Los resultados esperados del proyecto ejecutivo además de los detalles constructivos, son las especificaciones de obra, las cuales regirán la ejecución de la misma. En este caso, cobra importancia un documento conocido como Geotechnical Baseline Report (GBR). De acuerdo a *Moreno, A. (2006)*, el reporte geotécnico de referencia tiene sus antecedentes en los siguientes eventos:

Reporte geotécnico de referencia.

1. En el mundo, la construcción subterránea ha sido un campo fértil para las reclamaciones.

2. En 1997, la Sociedad Norteamericana de Ingenieros Civiles (ASCE) emitió un documento muy importante llamado Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction, producto de 3 reuniones en Las Vegas, Washington y Los Ángeles.
3. Se presentan la filosofía y recomendaciones para la preparación de reportes geotécnicos interpretativos para que se integren en las Bases de Licitación (BDL).
4. El principal objetivo es presentar en las BDL y en el contrato de obra, las condiciones geotécnicas que se anticipa estarán presentes durante la construcción de la obra subterránea.
5. Esto se le conoce contractualmente como la línea base o de referencia. Los riesgos asociados con condiciones menos adversas a la línea base serán absorbidos por el contratista y los mayores serán absorbidos por el dueño de la obra.
6. También incluye la presentación de las condiciones geotécnicas que servirán de base para el diseño de los componentes subterráneos.
7. Propone una cláusula contractual para considerar las condiciones diferentes del sitio (DSC).

2.3.1 Ingeniería de detalle.

Una vez contando con la información de anteproyecto, y una vez que se ha justificado el empleo de una microtuneladora, se procede a detallar los procedimientos de construcción y los componentes físicos del proyecto.

De acuerdo con *Moreno, A. (2006)*, y en referencia a los puntos de especial preocupación geotécnica indicados por *T.D. O'Rourke (1984)*, habrá que tener especial cuidado en la selección del túnel en función de su alineamiento y perfil, las predicciones del comportamiento del terreno dentro del túnel, con lo cual definiremos el tipo de revestimiento y la decisión de drenar o resistir el empuje del agua.

Esta metodología es también aplicable al momento de decidir por el uso de una microtuneladora, aun cuando los diámetros son mucho menores que los de un túnel común, también es necesario controlar el estado de esfuerzos en el subsuelo, de igual modo que los empujes de agua y terreno, los cuales se contrarrestan con el mismo escudo de la máquina.

2.3.2 Diseño de micro-TBM.

De acuerdo al material por excavar de manera predominante, la primera selección es el tipo de herramienta de corte para la máquina (*López, C. 2011*), la cual estará en función del material más duro a atacar. Una característica importante es que la herramienta que se seleccione sea fácil de cambiar para ahorrar tiempo y recursos durante la excavación.

El tamaño de la microtuneladora estará en función del diámetro de la tubería a colocar, considerando además la sobreexcavación para el paso de la misma, el cual se irá relleno durante el proceso cíclico de excavación-avance-hinca y relleno. Otro factor que incide en el tamaño de la microtuneladora es la potencia requerida para la hinca, la cual nos arrojará un cierto tamaño de motor y repercutirá en el diámetro de la máquina.

También en función del subsuelo estará el sistema de sujeción de la máquina, que variará entre un sistema de zapatas que ejerzan presión contra el terreno si es que este es de una dureza aceptable, hasta un banco de gatos hidráulicos que empujen desde el pozo de ataque y, de ser necesario, la implementación de estaciones intermedias de empuje que apoyen al sistema central. También son sujetos a diseño el sistema de avance, que generalmente se logra con el escudo y las herramientas de corte, y el sistema de control, del cual trataremos en el siguiente apartado.

2.3.3 Instrumentación.

De acuerdo con *Índigo Construcciones (2017)*, la instrumentación geotécnica tiene como finalidad determinar el comportamiento y las características del terreno para predecir su evolución frente a cargas, movimientos, empujes y demás acciones, tanto naturales como inducidas por las obras.

La planificación de un programa de instrumentación requiere elegir las magnitudes a medir y el tipo de instrumentos a utilizar, entre otras podemos hablar de:

- Movimientos superficiales.
- Movimientos al interior del terreno.
- Movimientos de apertura de grietas y entre diferentes puntos.
- Presiones intersticiales y sus variaciones.
- Empujes en el terreno sobre elementos de construcción.

La frecuencia de las lecturas y la toma de datos depende de las magnitudes a medir y la velocidad del proceso a controlar. Las lecturas pueden ser manuales o automáticas, primordialmente, en función del presupuesto. A su vez, las primeras están indicadas, normalmente, para los casos en que el número de sensores o puntos de registro sea pequeño; por su parte, la elección de un sistema de toma de datos automatizado viene condicionado por el número de sensores y características del mismo, frecuencia de lecturas, número de datos a tratar, rapidez con la que se desea realizar el tratamiento e interpretación, situación y accesibilidad del lugar y ubicación de los sensores.

Piezómetros. Son instrumentos utilizados para medir la presión intersticial en el interior de masas de suelo y roca. Para el caso de los de tipo abierto, consisten en la instalación de una tubería abierta en sus dos extremos colocada a lo largo de todo el sondeo. En el interior de la tubería se mide la altura que alcanza el agua.

El control del nivel del agua en sondeos es de gran importancia y su medición durante la perforación como después de finalizada, permite obtener información significativa sobre el tipo de acuífero y sus implicaciones en la permeabilidad del terreno y otros problemas hidrogeológicos y geotécnicos.

Los piezómetros proporcionan información esencial para:

- La comprensión de las condiciones geohidrológicas del lugar.
- La determinación del nivel de seguridad para la colocación de relleno
- La predicción de la estabilidad de taludes.
- Diseñar para empujes laterales.
- Evaluación de la eficacia de los sistemas de drenaje.
- Comprobación del funcionamiento de los sistemas de contención.

Otro tipo de piezómetros son los de cuerda vibrante, los cuales son muy útiles ya que se adecuan a la mayoría de las condiciones del proyecto. Se instalan dentro de barrenos que contienen una tubería que aloja el cable del instrumento y, en la punta, el sensor de cuerda vibrante, el cual se protege con un filtro, o no, en función del tipo de instrumento, de su instalación y de las condiciones del subsuelo. Las lecturas se obtienen mediante un Datalogger o consola para la lectura de instrumentos de cuerda vibrante.

Inclinómetros. Constituyen uno de los principales métodos de investigación de desplazamientos y, en general, de control de movimientos transversales a un sondeo. Consisten en la medida de inclinaciones en diversos puntos del interior de un sondeo mediante una sonda que transmite una señal eléctrica proporcional a la inclinación. Esta lectura permite cuantificar y conocer los movimientos transversales del sondeo.

Los inclinómetros se utilizan para controlar los movimientos del subsuelo y sus deformaciones; las aplicaciones más comunes son:

- La detección de zonas de movimiento, su aceleración para, en su caso, establecer las medidas correctivas.
- Comprobar que las deformaciones están dentro de los límites de diseño.
- Verificación de la estabilidad de las estructuras (lumbreras, muros, dovelas, etc.).
- Monitoreo de perfiles de asentamiento de terraplenes, cimentaciones y otras estructuras.

Extensómetros. Miden movimientos entre dos puntos, uno situado en la parte superior del sondeo y otro en la parte inferior al que se fija mediante un anclaje. Los desplazamientos de los puntos de anclaje se transmiten al extremo inicial del sondeo mediante alambres o varillas, midiéndose dichos desplazamientos por procedimientos mecánicos o eléctricos. Los extensómetros se utilizan para medir los movimientos de tierra y roca a lo largo de un solo eje.

Las aplicaciones que tienen los extensómetros, son:

- Monitoreo de asentamiento en las excavaciones, cimentaciones y terraplenes.
- Monitoreo de los movimientos en deslizamientos de rocas, muros y pilas.
- Monitoreo de consolidación del suelo bajo terraplenes.
- Monitoreo de la compresión de los pilotes y el suelo bajo carga.
- Monitoreo extendido en terraplenes.
- Monitoreo de la convergencia en las aberturas subterráneas, como túneles.

Celdas de presión. Para el caso de los túneles, las celdas de presión están diseñadas para medir las cargas transmitidas por el terreno en el perímetro del túnel. Normalmente se instalan en elementos prefabricados como dovelas o tuberías.

Piezoceldas. Miden la presión combinada de tensión efectiva y la presión del agua intersticial, las aplicaciones típicas incluyen:

- Monitoreo de la presión total ejercida sobre una estructura para verificar las hipótesis de diseño.
- La determinación de la magnitud, distribución y orientación de los esfuerzos.

2.3.4 Impacto ambiental.

Con la información de la ingeniería básica, se conoce del entorno del proyecto y el posible impacto que se tendrá en el mismo. Un primer problema a evaluar será el posible asentamiento del terreno por causa de una pérdida de soporte al momento de ejecutar la excavación. Otra posible afectación pudiera ser la contaminación del subsuelo por el uso de agentes acondicionantes si la excavación es a frente presurizado, o también la interferencia en mantos acuíferos.

Las afectaciones en la superficie generalmente son pocas y tienen que ver con los materiales de desecho de la obra, la disposición de lodos y del material producto de excavación. Aunado a esto, se produce un uso intensivo de las vialidades que corren hacia el sitio de la obra.

Todos estos aspectos se deberán cuantificar y planificar en las etapas previas, durante el proyecto, la ejecución de la obra y al final de la misma, para poder establecer medidas de mitigación o de reparación de daños, según sea el nivel de afectación.

Para lograr esta evaluación, se deberá respetar la legislación ambiental vigente y se deberán proponer soluciones en base a la propia experiencia y de acuerdo al entorno del proyecto.

Aparte de la matriz de impacto ambiental, es necesario generar una matriz de riesgos para este tipo de obras, con lo cual se busca la evaluación de los riesgos inherentes a este tipo de proyectos, su impacto y la administración de los mismos, lo que finalmente repercute en una curva de aprendizaje importante para trabajos posteriores.

2.3.5 Revestimiento.

Como ya se mencionó en los capítulos pasados, el revestimiento para el caso específico de trabajos de microtuneleo es a base de tubería hincada. En este sistema, a medida que el frente avanza, se realiza el empuje desde el pozo de entrada a través del sistema de gatos hidráulicos principales al tiempo que se genera el espacio necesario para la posterior inserción de un nuevo tramo de tubería y así consecutivamente hasta lograr la estructura del túnel. El espacio que queda entre la tubería y

el terreno, se inyecta con mortero a presión para lograr tanto la estabilidad de la excavación, como la estanqueidad de la línea. Tanto los cables de energía del sistema como las líneas de lodos son desconectadas durante la inserción de un tramo de tubería, para posteriormente volver a conectarse. Este proceso se vuelve repetitivo hasta que el frente excavador alcanza el pozo de salida. La dirección de la excavadora se controla remotamente en un panel de operación y se guía por medio de un sistema láser colocado en el pozo de entrada. Si es el caso de que se inyecten lodos para estabilizar el frente de excavación, estos se recirculan para volver a acondicionarse en unos recipientes colocados en el exterior y volver a inyectarse. El producto de la rezaga, como se mencionó, se realiza por medio de un tornillo de Arquímedes y tuberías o bandas transportadoras hasta el sistema de góndolas de retiro. Todo este sistema se diseña de acuerdo a la longitud del tramo y las condiciones de rezaga.

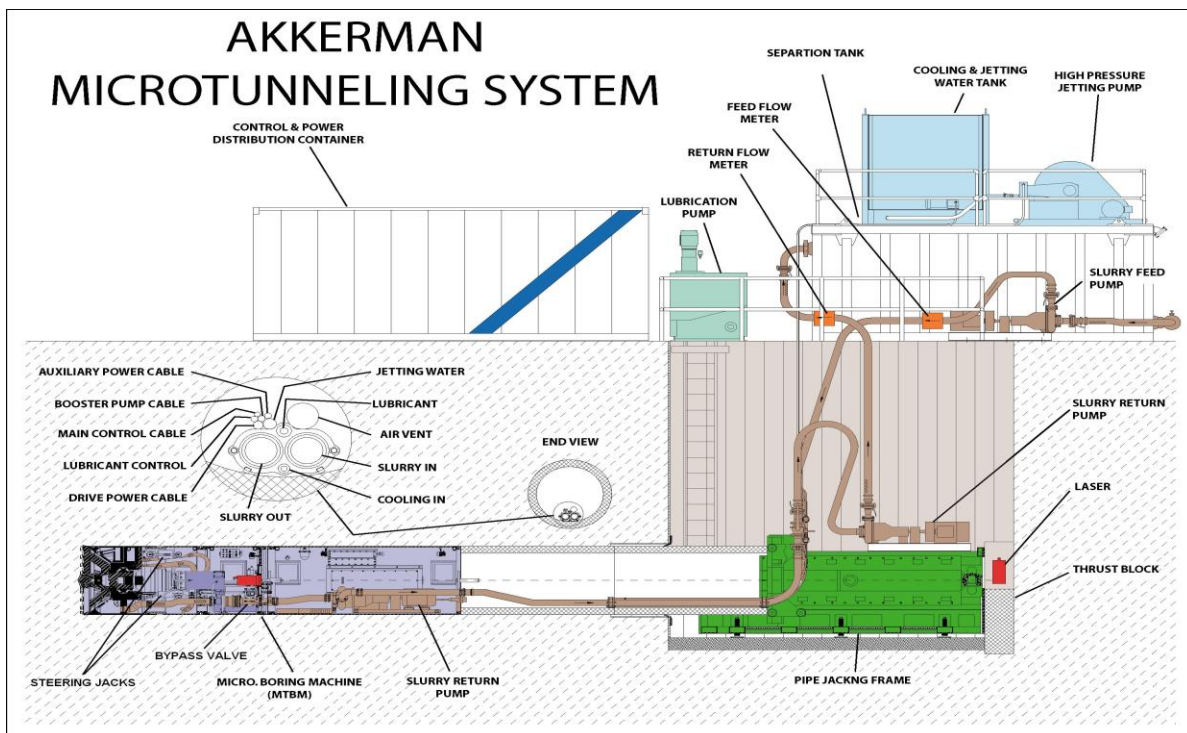


Figura 31 sistema de microtúnel, Fuente: Akkerman, 2015

3 Excavación con micro-TBM

3.1 Concepto.

De acuerdo a la definición de Mínguez, F. (2005), el método de excavación con microtuneladora, consiste en un proceso de empuje de tuberías guiado por un sistema láser y controlado

remotamente que suministra presión de manera continua al frente de excavación para equilibrar las presiones de agua subterránea y del suelo y no requiere personal dentro del túnel.

Las principales características que definen el microtuneleo (*Herrenknecht, M., 2003*), son:

- Es una construcción sin zanjas.
- Utiliza el método de empuje de tuberías.
- Ejecuta las tareas a control remoto.
- Es el método más rentable de instalación de tuberías, tomando en cuenta los costos directos e indirectos.
- Aparte de las estaciones de inicio y recepción, no hay más perturbaciones ambientales, económicas o sociales (de superficie, tráfico, ruido, vibraciones, etc.).
- Excavación de material minimizada es igual a mínimos asentamientos y mínima disposición de escombros.
- Instalaciones muy precisas (rangos de ± 25 mm).
- No requiere de abatimientos de niveles de agua (niveles freáticos).

De acuerdo con *Yepes, V. (2017)*, el método de hincado de tubería con microtuneleo consiste en empujar esta tubería desde un pozo de ataque, e ir hincándola en el terreno a la vez que el escudo de la Micro-TBM (elemento excavador) por delante de ella va abriendo el hueco aprovechando el empuje transmitido por dicha tubería y que es recibido desde el banco de empuje de los gatos hidráulicos. Este método se emplea para diámetros superiores a 500 mm, y puede llegar a ocuparse en diámetros de hasta 1,200 y 4,000 mm.

Se denominan microtúneles porque éstos se realizan sin la presencia de operarios dentro de la perforación, controlándose la perforadora de forma remota. Este sistema de hincado de tubería, consta de las siguientes partes principales:

- Pozo de ataque. El cual deberá contar con el espacio mínimo suficiente para alojar los componentes de la hincada y la debida protección del área de trabajo.
- El muro posterior (muro de reacción), deberá ser lo suficientemente resistente para soportar las cargas de empuje.
- Cabeza cortadora o microtuneladora. Formada básicamente por el cabezal de ataque donde van colocados los grupos eléctricos, hidráulico y compresor, así como los depósitos de aire

y combustible y las distintas coronas de corte dependiendo de los terrenos a perforar. La microtuneladora avanza asistida por un láser de guiado y los cilindros de orientación, que garantizan la correcta alineación y dirección de la hinca. Los desechos de la excavación se sacan por medio de una banda transportadora hacia el pozo de ataque. Una bomba de inyección de bentonita permite la lubricación de los tubos y favorece el transporte del material de desecho.

- Elemento de empuje: formado por un sistema de cilindros hidráulicos en número adecuado al diámetro de los tubos que, a través de una corona para repartir esfuerzos, empuja sobre los tubos para introducirlos en la perforación. Dado que los cilindros hidráulicos tienen un recorrido limitado, se colocan extensiones a medida que el tubo va introduciéndose con el fin de no parar el avance. Cuando las condiciones del proyecto, como longitud, diámetro y fricción lateral son considerables, se hace necesario la utilización de estaciones intermedias de empuje. Estas constan de un sistema de cilindros hidráulicos de carrera corta, cuyo empuje actúa alternándose con el de la estación principal. La longitud de una perforación viene condicionada por la máxima presión que pueden desarrollar los cilindros y, por otra parte, por la resistencia que ofrece la compresión longitudinal de la tubería.

Las microtuneladoras, al igual que las grandes tuneladoras, son máquinas integrales que excavan a sección plena y se clasifican de manera general en dos grandes grupos: máquinas de roca dura y escudos (o máquinas de rocas blandas y suelos) (López, C. 2011, *et. al.*)

3.2 Alternativas de procesos constructivos.

La elección del método dependerá de la técnica apropiada de sostenimiento, en función del terreno a atravesar y del método de rezaga. Este sistema de extracción apropiado dependerá del espacio disponible dentro del pozo y del túnel, el método de excavación del suelo y el mecanismo de sostenimiento del frente, así como de la longitud total del túnel.

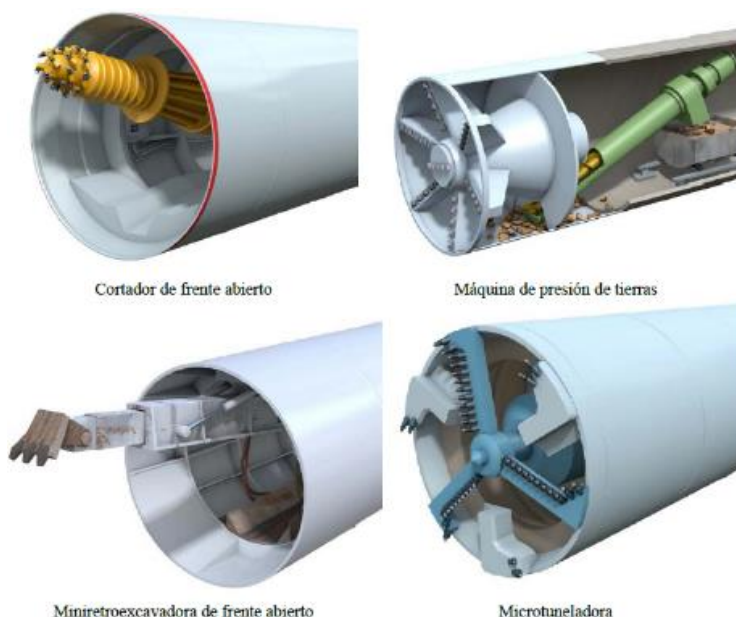


Figura 32 Maquinaria para los diferentes tipos de excavación por hincado de tubería Fuente: Mínguez, F. (2015)

Existe también una clasificación del microtuneleo que está en función del diámetro del túnel, el cual se presenta a continuación:

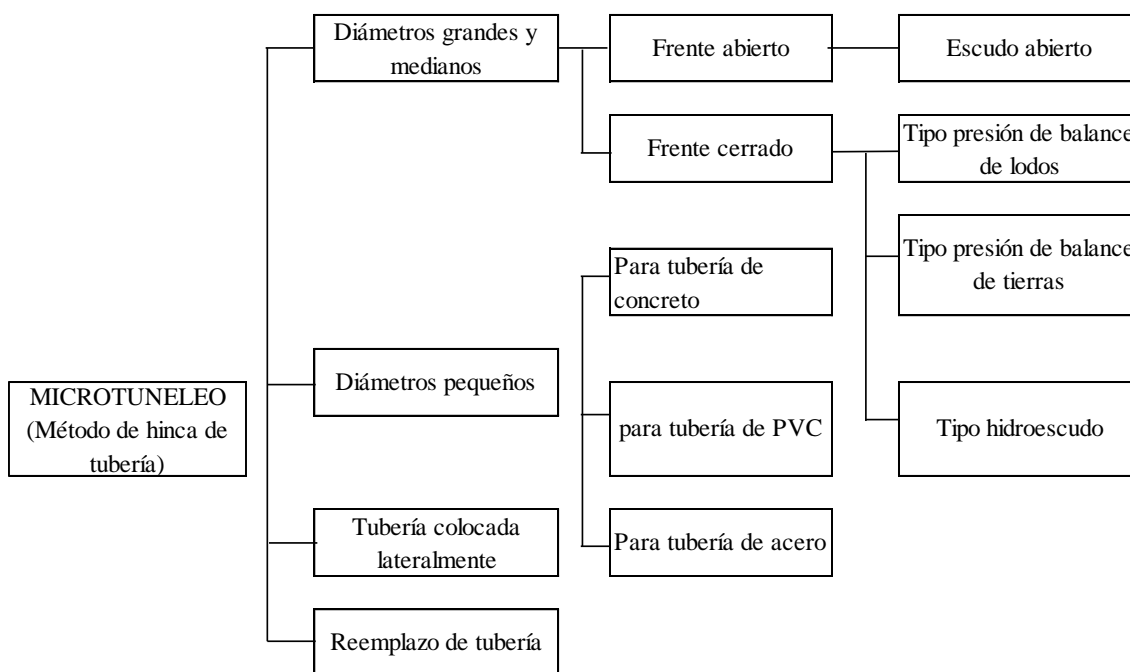


Figura 33 Procedimientos de microtuneleo. Fuente: Japan microtunneling association (2012)

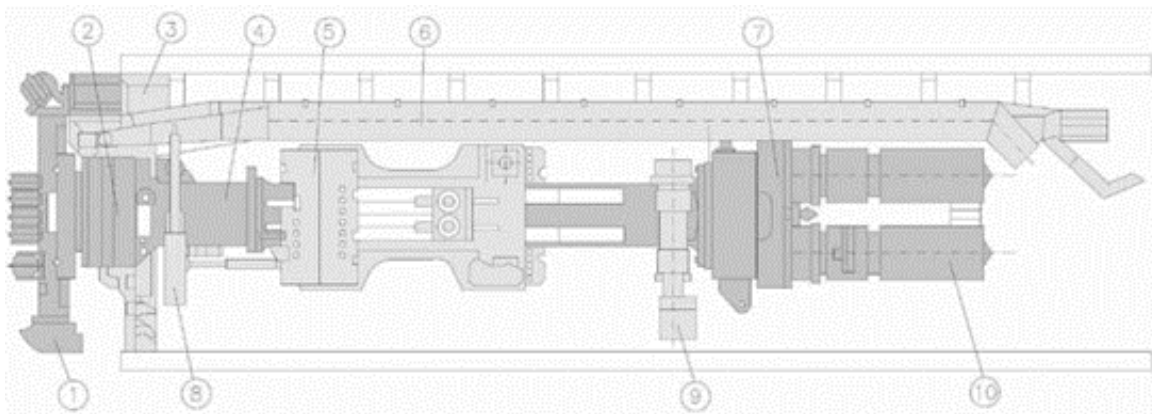
De acuerdo con Hoyo, J. (2015), en el estado actual de los criterios de diseño y selección del método constructivo de los microtúneles, a pesar de los numerosos y rápidos avances de esta

tecnología, los estudios o investigaciones no han seguido el mismo ritmo, por lo que la técnica carece en gran parte de una “teoría” a la cual acudir para realizar un proyecto acorde con la finalidad de la instalación y de las condiciones, tanto técnicas, como económicas.

En ocasiones, se puede pensar en la extrapolación de sistemas que se emplean en túneles de gran diámetro para el uso en micro túneles, pero la probabilidad de error puede ser elevada, ya que el factor escala juega un papel fundamental que condiciona la construcción.

3.2.1 Microtuneladora para roca dura.

Es un equipo también conocido como topo y su funcionamiento es a base de empuje contra el frente de excavación que generalmente es abierto, dado que rara vez se trabaja con presiones del suelo tales como niveles freáticos o presiones intersticiales. Sus herramientas de corte son discos metálicos que presionan y provocan la rotura del material el cual, ya despedazado por esta acción, se acumula en el fondo y se extrae mediante un sistema de rieles y vagonetas, las cuales son extraídas en el pozo de ataque mediante una grúa que las vacía en el sitio destinado para su futuro retiro al banco designado.



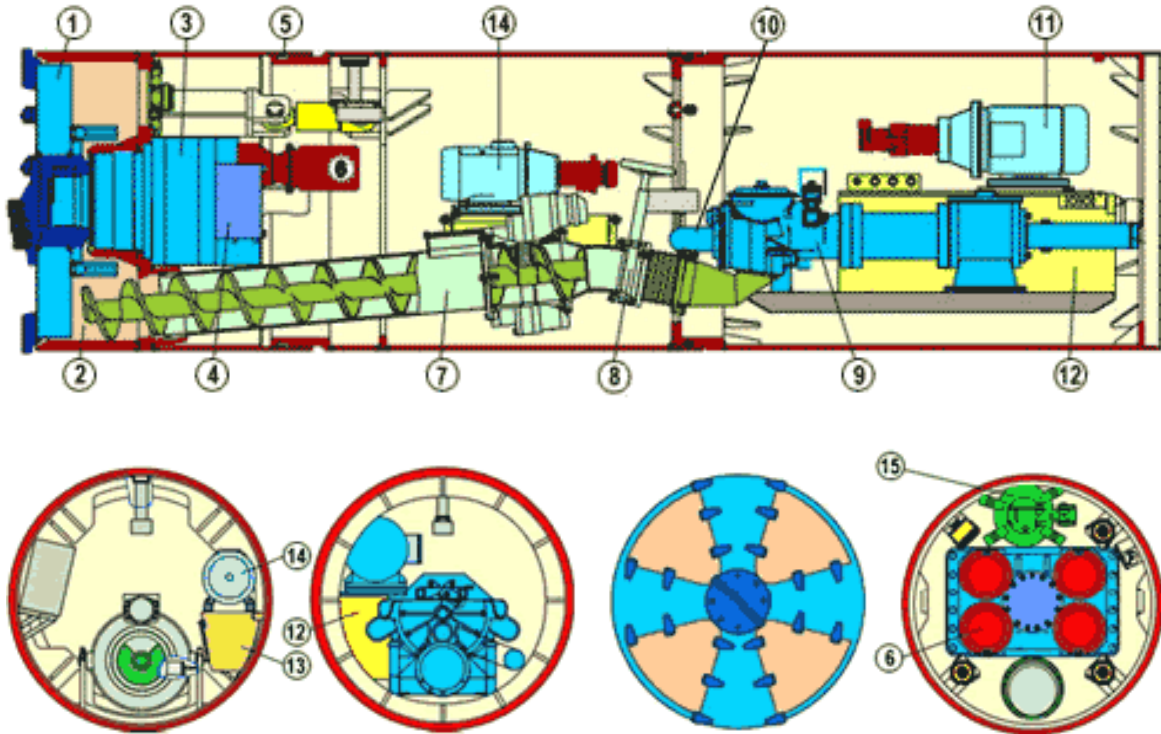
1 Rueda de corte para roca.	6 Cinta transportadora.
2 Rodamiento principal.	7 Accionamiento rueda de corte.
3 Escudo para rueda de corte.	8 Soporte delantero.
4 Mecanismo de empuje interior.	9 Soporte trasero.
5 Mecanismo de empuje exterior.	10 Motor eléctrico

Figura 34 Elementos principales que componen una micro-TBM (topo). Fuente: Herrenknecht AG.

La eficiencia de este tipo de máquinas estará en función de la calidad del macizo rocoso y de la eficiencia en el ciclo de trabajo.

3.2.2 Escudo de presión de tierras (micro-EPB).

En este caso la condición del terreno es que es poco estable, razón por la cual existe la necesidad de equilibrar la presión en el frente de trabajo. Dicho frente de trabajo constará de un anillo que al tiempo que se encarga de estabilizar el terreno circundante, permite la colocación de la tubería.



1. Rueda de corte	9. Bomba de extracción del material
2. Cámara de excavación	10. Circuito de extracción
3. Accionamiento principal	11. Motor de la bomba de extracción del material
4. Accionamiento	12. Depósito hidráulico de la bomba de extracción
5. Junta articulada	13. Depósito hidráulico de la bomba de máquina
6. Motor principal	14. Bomba hidráulica para máquina
7. Tornillo sinfín	15. Pared de presión
8. Desfogue del tornillo sinfín	

Figura 35 Esquema de funcionamiento de una micro-tuneladora EPB. Fuente Mínguez, F. (2015)

En el frente de excavación, que como se mencionó, se mantiene presurizado, también se realiza el machacado y mezcla del suelo con el fin de extraerlo, y en ocasiones se añaden agentes químicos para facilitar la extracción (agentes espumantes, polímeros o bentonita). El material, al encontrarse a presión en el interior de la cámara, se extrae a través de un tornillo helicoidal encamisado, esto con el objetivo de que, dentro del mismo, el lodo vaya perdiendo presión desde la cámara hasta su salida. El equilibrio de la presión en el frente de trabajo, se logra controlando la presión de salida del material y la presión ejercida por el terreno y la presión de agua.

3.3 Actividades previas al inicio de la obra.

Los trabajos previos al inicio del proyecto son importantes dado que un evento significativo es la llegada del equipo, la cual deberá ser ágil para evitar pérdida de tiempo en su uso, así como las menores complicaciones en su ingreso.

El trazo y nivelación es generalmente el primer paso, así como asegurar la zona de trabajos, esto con personal de seguridad. Los pozos de inicio y llegada, dado que generalmente se vuelven a cubrir, se pueden conformar en sus paredes con un sistema de tablestacado, a excepción del banco de empuje, el cual será diseñado y ejecutado en concreto armado. Una vez ejecutadas las paredes de la excavación, se procede al vaciado y conformación del fondo y portal de ingreso de la microtuneladora. Si los cálculos efectuados en el terreno arrojan la necesidad de un sostenimiento inicial, éste se ejecutará de acuerdo a lo proyectado. Estos trabajos se ejecutan con los métodos convencionales de excavación, o con algún método de construcción de lumbreras si la profundidad lo requiere.

El siguiente paso es la construcción del muro de empuje y la llegada e instalación de los equipos que suministran energía eléctrica y mecánica. Otra tarea es el habilitado de los patios de almacenaje y maniobra de materiales; dado que el proceso una vez iniciado es continuo, se deberá asegurar un suministro eficiente, así como el desalojo de la rezaga hacia los bancos de tiro establecidos.

Se deberá contar con el suministro programado de los elementos que formarán parte del recubrimiento, tales como tubos de concreto e insumos para los equipos.

3.4 Metodología.

La metodología queda determinada en base al proyecto ejecutivo, y es la estrategia para la ejecución del mismo. De acuerdo a *López, C. (2011)*, se deben identificar las grandes áreas de trabajo del proyecto con el objeto de planear y gestionar su ejecución con el menor riesgo posible:

Estabilidad del área de trabajo. Cuidar los riesgos geotécnicos y antropogénicos, tales como riesgos de colapso de excavaciones o fugas de gases o derrames de materiales. Monitorear constantemente con topografía e instrumentación los asentamientos o distorsiones en la sección excavada.

Excavación y sostenimiento. Estar atentos a los cambios en los materiales de excavación para poder hacer un tratamiento adecuado en función de ellos, cuidar que las herramientas de

excavación no se atoren o sufran daños y estar atentos a posibles averías de equipos que deben estar en buen estado funcional. El cuidado de las deformaciones y tensiones en el suelo, así como cuidar el equilibrio de la presión en el frente de excavación por medio de un monitoreo constante, y el aseguramiento de la estanqueidad de la tubería colocada.

Plan de manejo de contingencias. Importante para la toma de decisiones en cualquier cambio de circunstancia durante la excavación, prever acciones en cuanto a tratamiento de materiales, fugas de líquidos o gases, manejo de los accidentes de trabajo o filtraciones hacia el interior de la zona de trabajo.

Impactos ambientales. Ligado al párrafo anterior, se deberá prever el manejo y mitigación de los efectos de acciones no contempladas debidas, por ejemplo, al ruido, vibraciones, polvo hacia el interior y exterior, o algún daño a los acuíferos existentes.

La técnica de microtuneleo no está exenta de contratiempos y complicaciones dado que, aunque se haga una planeación para excavar por debajo del nivel de los servicios existentes (agua, gas, drenaje, etc.), existen estructuras subterráneas tales como las cimentaciones profundas (zapatas, pilotes, muros pantalla) que pueden verse afectadas por este tipo de trabajos y pueden dar lugar a reclamos que retrasen o hagan inviable el proyecto, para lo cual los trabajos de ingeniería básica ayudan a tomar la mejor decisión. (*Pedraplus, I., 2014*)

Con base en la información de ingeniería básica y a la caracterización que se haga del suelo durante el avance de los trabajos, es que se establecen los ajustes a la metodología de los mismos.

3.4.1 Ciclo de trabajo de la Micro-TBM.

El ciclo de trabajo de una Micro-TBM, está definido por ciertas secuencias establecidas una vez que se cuente con la infraestructura de arranque.

De acuerdo a *Pedraplus, I. (2014)*, la hincas consiste en la perforación de un túnel de pequeño diámetro con la ayuda de un escudo y la instalación simultánea del revestimiento del túnel con tubería. Los tubos, que se sitúan inmediatamente detrás del escudo, son empujados por gatos hidráulicos a través del terreno, siendo esto posible gracias a que, de forma simultánea, dicho terreno es excavado por un escudo situado en el frente de excavación.

El avance se realiza mediante la superposición de un esfuerzo de corte, generado por la rotación de la cabeza del escudo, y un esfuerzo de compresión provocado por la transmisión de la presión de los gatos hidráulicos.

Los gatos hidráulicos apoyados en el muro de reacción, deberán tener el empuje necesario determinado en proyecto. Estos se sitúan en el pozo de ataque alineados con los propios tubos ya hincados. Todas las órdenes de guiado y empuje se gestionan desde una computadora situada en la superficie.



Figura 36 Pozo de ataque y sistema de empuje. Fuente: *Pedraplus, I. (2014)*

Para asegurarse de que las fuerzas de empuje sean distribuidas alrededor de la circunferencia del tubo que está siendo empujado, el anillo de empuje cuenta con un cierto diseño dependiendo del número de cilindros que se están usando. Los cilindros están conectados hidráulicamente para asegurar que el empuje de cada uno sea igual. El diámetro de cilindros utilizados varía dependiendo del tamaño del tubo, de la fuerza de los gatos de empuje, de la longitud a instalar y de la resistencia de rozamiento. La tubería y la microtuneladora son guiadas por los cilindros a través del dado de ataque.

De lo anterior, se deduce que el ciclo de trabajo básico para este tipo de proyectos es:

- a) Excavación.
- b) Rezaga.
- c) Hincado de tubería.

- d) Lubricación de la tubería.
- e) Relleno del espacio anular entre tubería y terreno.
- f) Retracción de gatos.
- g) En su caso, colocación de estaciones intermedias.

3.4.2 Tuberías para hinca.

Con las características del proceso anteriormente descritas, la tubería de hinca debe contar con altas especificaciones de calidad y resistencia de sus materiales y una geometría exacta que impida una mala unión.

De acuerdo a *Mínguez, F. (2015)*, los tubos de concreto armado para hinca, por los esfuerzos que deben soportar y por la complejidad del hincado (ya que requiere un perfecto paralelismo en sus caras), deben ser diseñados y fabricados siguiendo las más estrictas normas de calidad. Al respecto, existen cuatro aspectos fundamentales que caracterizan y condicionan el diseño de la tubería de hinca:

- a) Limitación de la longitud útil a tres metros como máximo, para evitar el pandeo. De igual manera, las superficies frontales de los tubos, que transmitirán las cargas de empuje durante el montaje de la tubería, deberán ser perfectamente planas y libres de irregularidades, que puedan ocasionar concentraciones puntuales de carga.
- b) Los tubos llevan un zuncho metálico galvanizado, conocido como virola, en uno de sus extremos, de manera que, para conseguir la hermeticidad del sistema, se coloca una junta flexible en la junta macho del tubo, para que ésta haga sello con la virola.
- c) Los tubos de hinca llevan desde su construcción, instalados unos taladros en sus paredes con el objeto de que sean usados para inyectar el lodo bentonítico que se usará para lubricar y reducir el rozamiento entre el espacio de la sobreexcavación y la tubería y que, al mismo tiempo, impedirá que haya caídos en el subsuelo.
- d) En el caso de juntas a medio espesor, el acero de refuerzo de los tubos deberá prolongarse desde el cuerpo del tubo, hasta los extremos macho y hembra. El acero de refuerzo transversal, deberá incrementarse un 20% en ambos extremos del tubo, en una longitud equivalente a la cuarta parte del diámetro o como mínimo 25 cm. Adicionalmente, se deberá contar con estribos que conecten el acero de refuerzo exterior e interior en ambos extremos del tubo. La cuantía de acero longitudinal,

deberá ser al menos, un 10% del correspondiente acero de refuerzo transversal, respetando una separación máxima entre varillas, de 40 cm.

Para el caso de las tuberías de acero, el proceso de hincas es muy similar y estas se van soldando a cada tramo que avanza y a diferencia de la tubería de concreto reforzado, la cual se usa más en sistemas de saneamiento, en el caso de las tuberías de acero, se utilizan para abastecimiento y eventualmente también saneamiento y de igual manera, pueden alojar otras tuberías para conducciones específicas.

3.4.3 Sistema de inyección de bentonita.

La bentonita cumple las siguientes funciones en el proceso de excavación con microtuneladora: al inyectarse en el frente de excavación, ayuda a generar una presión de equilibrio contra el empuje del terreno y el empuje hidrostático, al tiempo que funciona como acondicionador del material excavado para facilitar su retiro. Inyectada en el espacio anular generado por la sobreexcavación y la tubería hincada, reduce la fricción entre las paredes, reduciendo el consumo energético necesario para el empuje y evitando posibles daños a la tubería, al tiempo que también evita caídos de las paredes de la excavación, los cuales se pueden traducir en asentamientos en la superficie o daños a estructuras que se vayan cruzando.

Menciona *Pedraplus, I. (2014)* que, al trabajar normalmente por debajo del nivel freático y utilizar bentonita para la lubricación de las tuberías para reducir la fricción de las mismas, es necesario disponer de una junta de estanqueidad en el dado de ataque para garantizar el perfecto sellado entre la sobreexcavación y la tubería. Continúa: la evacuación del material excavado se realiza mediante transporte hidráulico, por lo que será necesario contar con un sistema de bombeo y conducciones, que inyecte agua o bentonita que actuará como vehículo de transporte del material excavado, y que guíe la papilla resultante hasta un decantador que nos permita reutilizar el agua o bentonita, e ir separando el material excavado, funcionando todo el sistema en circuito cerrado, reduciendo, por tanto, las aportaciones de líquido. Una vez en la superficie, la bentonita es recuperada por medio del uso de un sistema de decantación e hidrociclones, para su posterior reúso.

3.4.4 Estaciones intermedias de empuje.

De acuerdo a *Pedraplus, I. (2014)*, en hincas largas o terrenos duros, es necesario distribuir las fuerzas de empuje a fin de no deteriorar los tubos. Para este fin se utilizan las estaciones

intermedias que, mediante la expansión de los gatos hidráulicos que las componen, realizan el empuje de la cabeza y de los tubos anteriores y mediante su recogida propician el empuje del resto de los tubos desde el pozo de ataque.



Figura 37 Estación intermedia de empuje. Fuente: (Pedraplus, I., 2014)

3.5 Control de procesos de excavación.

El Control de Procesos en procesos industriales tiene sus orígenes a mediados del siglo XX, inicialmente como simples interfaces de usuario. En un sistema de estas características el operador de una máquina tiene la función de operar, observar y corregir. Las correcciones se ejecutan cuando ciertos parámetros superan unos valores límite de referencia.

Los sistemas de Control de Procesos basados en simples interfaces de usuario se muestran insuficientes para procesos complejos como la excavación con tuneladora, dado que faltan herramientas eficientes que permitan captar y reaccionar antes variaciones de la geología y ante la compleja interacción suelo-tuneladora

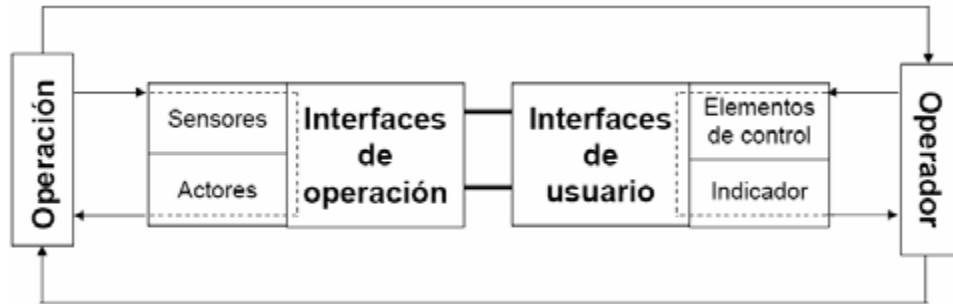


Figura 38 Esquema de un modelo de interfaz de usuario. Fuente: Comulada, M. (2005)

Para el caso que ocupa al presente trabajo, el control de procesos de excavación se referirá al manejo, interpretación y realización de acciones en la excavación, de acuerdo a la información que se derive de los controles topográficos, instrumentación y los cálculos que se realicen para la definición de los parámetros de la Micro-TBM, como: presiones de frente, torque y velocidad de la rueda de corte, acondicionamiento del material de excavación, cálculo de la fuerza de empuje en el banco de ataque y en las estaciones intermedias de empuje.

De acuerdo a Comulada, M. (2005), en el estado del arte de la tecnología de tuneladoras de gran diámetro se registran y almacenan hasta 600 parámetros operacionales cada 10 a 60 segundos; en Micro-TBM, la información que se registra es menor y va en función del equipamiento de sensores de la máquina. Hasta hace poco, en la mayoría de proyectos los datos de funcionamiento de las tuneladoras se han almacenado como documentación y para retro análisis tras la ocurrencia de fallos. Con objeto de sacarle el máximo provecho a la información proporcionada por los datos operacionales de las tuneladoras es necesario llevar a cabo un análisis sistemático de forma simultánea con la excavación. Para conseguir un eficiente control, análisis y evaluación del proceso de excavación con tuneladora, es necesario identificar y comprender los procesos clave y su interacción con el suelo. El control de estos procesos alcanzará su máxima eficiencia cuando el tiempo entre el registro de datos del proceso constructivo, el análisis de los mismos y la toma de decisiones se reduzca lo más cercano posible al tiempo real. El Control de Procesos en tiempo real ya se usa en varios proyectos de excavación. El Control de Procesos debe contar con herramientas de apoyo, entre ellas un software adecuado que permita llevar a cabo una efectiva gestión de datos.

En este sentido, la excavación con microtuneladora puede enmarcarse dentro de los denominados sistemas dinámicos. Para el control de sistemas de este tipo, se precisa de modelos de control predictivos, que fueron desarrollados para el control de complejos procesos industriales.

En comparación con otros métodos constructivos, la excavación con Micro-TBM cumple el prerequisite de proporcionar en tiempo real y en formato digital, un gran número parámetros de funcionamiento de la máquina que pueden integrarse eficientemente en un circuito de control de procesos.

No obstante, a diferencia de la mayoría de procesos industriales controlados, las inesperadas variaciones de la geología e hidrología durante el avance de la Micro-TBM y la interacción suelo-máquina no se pueden describir mediante sistemas de ecuaciones diferenciales, sino que se basan en valores de cálculo y de experiencias anteriores.

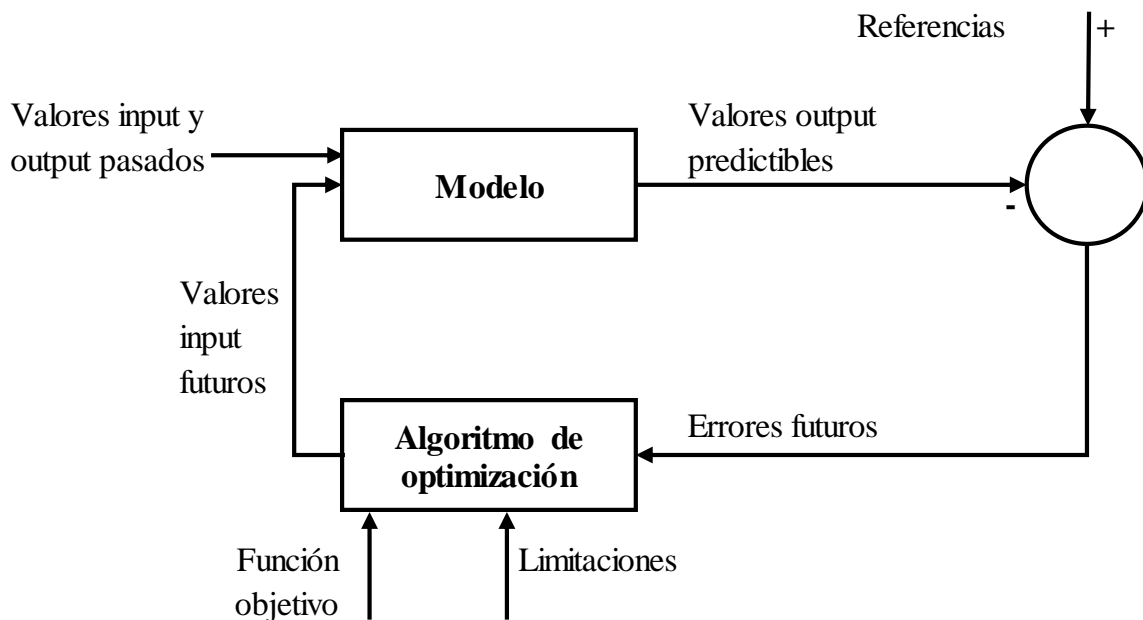


Figura 39 Esquema de un modelo de control predictivo, Fuente: Comulada, M. (2005)

A este respecto, durante la ejecución del control de procesos de excavación intervienen diversas áreas y participantes que aportan información relevante al procedimiento constructivo del túnel. La interacción entre éstas se define con un ciclo de trabajo que se ejemplifica a continuación:

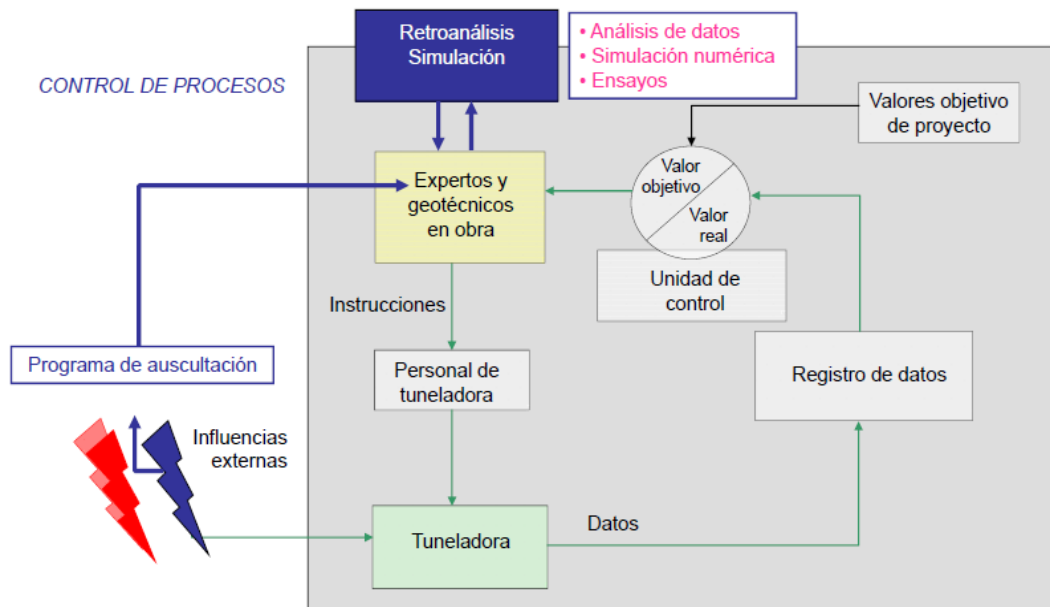


Figura 40 Esquema del control de procesos para una tuneladora. Fuente: Pérez, J.A. (2013)

A este respecto, afirma Pérez, J. A. (2013): “Los sistemas de auscultación en tiempo real actualmente representan un requisito operacional en las grandes obras civiles subterráneas a nivel mundial; esto debido a los emplazamientos urbanos, situaciones geológicas y geotécnicas complejas y las consecuentes normas actuales de seguridad y calidad en la excavación. El diseño de este tipo de sistemas versa en su capacidad por definir, paramétrica y automáticamente, el comportamiento del terreno excavado, las estructuras e instalaciones propias de la construcción y también las del entorno; estas últimas, en gran medida, definen los procedimientos y parámetros de excavación.”

De acuerdo a (Pérez, J. A. et al), las principales variables y los instrumentos empleados para el monitoreo de túneles, son:

- a) Deformaciones intrínsecas en los revestimientos (deformímetros para acero y para concreto).
- b) Esfuerzos (celdas de presión).
- c) Instrumentación en edificios aledaños (prismas automáticos, geófonos, micrófonos, fisurómetros).
- d) Presiones de poro (piezómetros y pozos de observación).

De este modo, a la maquina se le alimentarán como datos de entrada, los valores objetivo del proyecto de la excavación y de igual manera y en tiempo real, se estarán recibiendo los valores al instante del proceso, los cuales se compararán con los iniciales y se tendrá un estado de toma de decisiones, (Pérez, J. A. et al).

Continúa (Pérez, J. A. et al): *“Deficiencias en la inyección de mortero pueden ocasionar deformaciones excesivas en este tipo de túneles debido a la pérdida de confinamiento de la estructura. A su vez, una inadecuada definición de las presiones del frente podría ocasionar asentamientos y/o bufamientos en superficie que originen indirectamente daños estructurales en las edificaciones aledañas. Incluso la aplicación de altas velocidades de excavación podría incurrir en el deficiente abastecimiento de los medios de acondicionamiento del terreno, ocasionando deficiencias en el rezagado del material producto de la excavación, desgaste innecesario de las herramientas de corte y la consecuente disminución en los rendimientos, elevando sustancialmente el costo del proyecto. Por lo tanto, factores como la geología que define al trazo del túnel, la infraestructura en la superficie y la asignación de los parámetros de excavación, inciden directamente en el comportamiento de la estructura, por lo que el control de procesos resulta una herramienta fundamental para el análisis de su comportamiento y las modificaciones necesarias en la operación del escudo que permitan asegurar la construcción y la optimización de los rendimientos”*

4 Caso de estudio.

En este apartado, se presenta un caso hipotético diseñado con la finalidad de ilustrar, de manera práctica, los cálculos básicos que definen a un proyecto con microtuneladora. Se elaboró para el caso de trabajo con un microescudo de frente presurizable, diseñado para la excavación en suelos inestables, por lo que los cálculos y procedimiento corresponden a dichas condiciones.

Descripción del proyecto: *Diseño de un sistema de microtuneleo mediante tubos hincados.*

Se requiere construir un conducto de desagüe bajo la superficie del terreno a una profundidad de 6 m en la zona metropolitana de la ciudad de México, mediante la utilización de tubos hincados, procedimiento que es solicitado para no afectar las actividades normales en la superficie.

Para lograr lo anterior, se utilizará una microtuneladora de frente presurizable con lodo, de 3 m de diámetro, acorde con las necesidades hidráulicas de proyecto, y tubos de concreto armado de 2.65 m de diámetro interior.

Los principales componentes y conceptos del sistema de microtuneleo a considerar, son:

- Lumbreras para el lanzado y recuperación del microescudo. Éstas pueden ser circulares o de sección cuadrada o rectangular. Las dimensiones deben ser las mínimas necesarias para albergar el muro de reacción, la estación principal de gateo, una pieza de tubería por hincar, el microescudo y el muro del portal de salida.
- Definición de la longitud de los tramos en cuyos extremos se construirá una lumbrera.
- Identificación de la capacidad máxima de empuje de la estación de gateo.
- Estratigrafía y propiedades del subsuelo.
- Tubería hincable de concreto armado (de acuerdo a especificaciones y geometría).

El diseño geotécnico de las lumbreras sale del alcance de este ejercicio, pero se aclara que, por lo menos en la revisión de los estados límite de falla y de servicio, se debe cumplir con la normatividad vigente en la ciudad de México (**Reglamento de Construcciones y sus Normas Técnicas Complementarias**). Se entiende que su diseño incluye: cálculo de empujes activos y pasivos, diseño de tablestacas y troqueles, revisión de falla de fondo, revisión de falla por subpresión, abatimiento del nivel freático, etc. Adicionalmente, es importante garantizar una capacidad de reacción por empuje pasivo de las paredes de las lumbreras equivalente a la capacidad de empuje de la estación principal de gateo a fin de contrarrestar las fuerzas (en este caso el empuje máximo de la estación de gateo es igual a 1,200 ton, de acuerdo a las especificaciones del fabricante, que considera 6 gatos con capacidad de 200 ton cada uno). En ciertos casos, cuando no se alcanza la reacción pasiva necesaria, se puede recurrir a la ayuda de la losa de fondo y de las paredes del tablestacado mediante su contribución por fricción al terreno vecino para completar el déficit de capacidad de reacción de las paredes de la lumbrera.

De acuerdo con las necesidades particulares de cada proyecto, la existencia de estructuras superficiales, y aprovechando experiencias anteriores, se proponen en nuestro caso, de manera preliminar, 4 tramos de túnel con las siguientes longitudes, para un total de tuneleo de 1,572 m; estas longitudes tentativas se revisan más adelante en función de la capacidad de empuje de la

estación principal, condicionada a la magnitud de la fricción lateral de los tubos durante su hincado:

Tabla 2 Longitudes parciales de excavación para el proyecto.

No. de subtramo	Longitud (m)
Subtramo 1	479.00
Subtramo 2	300.00
Subtramo 3	549.00
Subtramo 4	244.00
Longitud total	1,572.00

1. Descripción de los parámetros geotécnicos de diseño.

Como ya se mencionó, el sitio se localiza en la zona metropolitana de la ciudad de México, caracterizada típicamente por tener espesores importantes de arcilla de alta compresibilidad y baja resistencia al corte, con alto contenido de agua. La secuencia estratigráfica obtenida de sondeos efectuados en el área de proyecto se puede resumir en las siguientes 2 formaciones principales:

Costra superficial: de 0.0 a 2.8 m de profundidad: constituida por limos arenosos firmes y arenas limo-arcillosas compactas, con contenidos de agua de 80 a 150%, pesos volumétricos de 1.50 a 1.60 t/m³, y cohesiones variables entre 3.5 y 4 t/m². Su ángulo de fricción interna es del orden de 20°.

Formación Arcillosa Superior: de 2.8 a 35 m de profundidad: constituida por una serie de estratos arcillosos con contenidos de agua de 250 a 450 %, pesos volumétricos de 1.15 a 1.3 t/m³, y resistencias al corte “c” variables entre 2 y 2.5 t/m².

Para nuestro caso en estudio, se consideran las siguientes propiedades:

Profundidad promedio, desde el terreno natural al eje del túnel:	6 m
Cohesión promedio de los suelos arcillosos atravesados:	2 t/m ²
Peso volumétrico promedio:	1.3 t/m ³
Profundidad promedio del nivel freático:	1.5 m

Diámetro exterior del tubo de concreto:	3 m
Coefficiente de empuje de tierras en reposo K_0 :	0.7
Presión vertical efectiva al nivel del sensor de presión	3.6 t/m ²

2. Parámetros a calcular:

a) Presión del frente.

Para garantizar la estabilidad del frente y minimizar el efecto del cambio de esfuerzos que podrían provocar hundimientos o bufamientos en la superficie, se debe mantener una presión en la cámara de lodos del microescudo igual a la presión activa del terreno más la presión hidrostática generada por la posición del nivel freático de tal forma de preservar las condiciones iniciales de esfuerzo en la masa de suelo. Esta presión teórica puede verificarse en todo momento con el sensor de presión que el escudo tiene habilitado en la cámara de lodos (aproximadamente al nivel de su base, $H = 7$ m). Para el caso del ejercicio planteado, tenemos una presión vertical efectiva al nivel del sensor de 3.6 t/m².

La presión del frente se calcula con:

$$p_f = [(\sigma_v \times K_a) - 2c\sqrt{K_a}] + \gamma_w H \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

p_f = presión del frente, en t/m²

σ_v = presión vertical efectiva al nivel del sensor de presión (3.6 t/m²)

γ_w = peso volumétrico del agua, (1 t/m³)

H = altura entre el nivel freático y el punto donde se ubica el sensor de presión del microescudo, en metros (5.5 m)

c = cohesión del suelo, (2 ton/m²)

ϕ = ángulo de fricción interna del suelo, en grados (≈ 0 para arcillas)

K_a = coeficiente de presión activa, de Rankine; $K_a = (\tan^2(45-\phi/2) = 1)$

Por lo tanto, la presión del frente, será igual a:

$$p_f = \left[(3.6 \times \tan^2(45^\circ - 0/2) - 2(2) \sqrt{\tan^2(45^\circ - \frac{0}{2})} \right] + (1)(5.5) ;$$

$$p_f = 5.1 \text{ t/m}^2$$

Este valor corresponde a la presión que se ejercerá en el frente de la microtuneladora por causa del terreno y el empuje hidrostático. Considerando el área del frente del equipo: $A = \pi r^2$; $A = 7.07 \text{ m}^2$, entonces la fuerza puntual resultante tendrá una magnitud de: $P = 5.1 \text{ t/m}^2 \times 7.07 \text{ m}^2$;

$$P = 36.06 \text{ t}$$

b) Fricción entre la tubería hincada y el subsuelo vecino:

Para suelos con cohesión y fricción, la expresión general a usar es:

$$f_s = \alpha c + \sigma_v K_0 \tan \delta \dots \dots \dots (2)$$

Donde:

- f_s = Fricción lateral, en t/m^2
- α = coeficiente de adherencia, adimensional (para concreto-arcilla blanda, de acuerdo con el criterio de Tomlinson, ($\alpha \approx 0.40$))
- c = cohesión del suelo, (2 ton/m^2)
- σ_v = presión vertical efectiva, al nivel del eje del túnel ($H = 6 \text{ m}$ y la presión vertical efectiva a este nivel, se supone de 3.3 t/m^2)
- K_0 = coeficiente de empuje en reposo, adimensional (0.7)
- δ = ángulo de fricción entre concreto y suelo (17°)
- $\tan \delta$ = coeficiente de fricción ($\tan 17^\circ = 0.306$)

$$f_s = (0.4)(2) + (3.3)(0.7)(0.306)$$

$$f_s = 1.51 \text{ t/m}^2$$

De manera general, se tendrá un sistema de fuerzas actuando, en el cual, como se ha mencionado, es necesario, por una parte, equilibrar el empuje activo del subsuelo más el empuje hidrostático y, por otra parte, se requiere vencer la fuerza de fricción lateral para lograr el avance de la microtuneladora. En el siguiente esquema, se representan las fuerzas actuantes en el sistema:



Esquema de fuerzas actuantes en el cuerpo de la tubería y frente de excavación

c) Fuerza total de empuje requerida para cada uno de los subtramos:

De acuerdo al esquema, esta fuerza quedará definida por la expresión:

$$E = F_s [(\pi \times D \times L \times f_s) + P]$$

Donde:

- D = Diámetro del escudo; D = 3 m
- L = Longitud del tramo; L = variable, de acuerdo a la longitud de cada tramo (ver tabla 1).
- f_s = Fricción lateral; $f_s = 1.51 \text{ t/m}^2$, de acuerdo a lo calculado en (2)
- P es la magnitud de la presión de frente actuando en el área de la microtuneladora, P = 36.06 t.
- F_s = factor de seguridad por condiciones imprevistas que pudieran generar una sobrecarga en el sistema de gateo, para el caso que nos ocupa, $F_s = 1.1$

Elaborando los cálculos, tendremos que:

Para el sub-tramo 1 (L = 479 m):

$$E = F_s [(\pi \times D \times L \times f_s) + P] = 1.1 [(\pi \times 3 \times 479 \times 1.51) + 36.06] = \mathbf{7,538.20 \text{ t}}$$

Para el sub-tramo 2 (L = 300 m):

$$E = F_s [(\pi \times D \times L \times f_s) + P] = 1.1 [(\pi \times 3 \times 300 \times 1.51) + 36.06] = \mathbf{4,736.03 \text{ t}}$$

Para el sub-tramo 3 (L = 549 m):

$$E = F_s [(\pi \times D \times L \times f_s) + P] = 1.1 [(\pi \times 3 \times 549 \times 1.51) + 36.06] = \mathbf{8,634.02 \text{ t}}$$

Para el sub-tramo 4 ($L = 244$ m):

$$E = Fs [(\pi \times D \times L \times fs) + P] = 1.1 [(\pi \times 3 \times 244 \times 1.51) + 36.06] = \mathbf{3,859.38 \text{ t.}}$$

Por lo cual, la tabla de empujes queda de la siguiente manera:

Tabla 3. Longitudes de subtramos y empuje calculado.

Subtramo	Longitud (m)	Empuje (t)
Subtramo 1	479.00	7,538.20
Subtramo 2	300.00	4,736.03
Subtramo 3	549.00	8,634.02
Subtramo 4	244.00	3,859.38
L total (m):	1,572.00	

Colocada la microtuneladora en el pozo de lanzamiento y una vez realizada la primera excavación ayudada por los gatos hidráulicos que se apoyan sobre el muro de reacción, éstos se retraen para poder permitir el ingreso del primer tubo a hincar; a su bajada, se alinea con el carro guía que corre en el pozo de ataque y los gatos avanzan para colocar el anillo de empuje en el tubo. Una vez en esta posición, de manera simultánea, la cabeza de corte comienza a girar y los gatos hidráulicos inician con su trabajo para generar la inserción de la tubería; cuando ésta penetró totalmente, los gatos se vuelven a contraer para dar paso a un nuevo tramo y el ciclo se repite.

El sistema de guiado del microescudo es en base a un rayo láser colocado en la entrada del proyecto, el cual, de acuerdo con la información de la trayectoria alimentada a la computadora, va guiando a la máquina de tal suerte que su trazo se puede ir verificando en una consola central.

Cada tramo de tubería, como ya se ha mencionado, lleva un cinturón metálico el cual, al recibir el empuje del sistema hidráulico y al ejercer presión contra el tramo contiguo, forma el sello que garantiza la hermeticidad de la unión.

Con la tubería en proceso de hincado, es necesario inyectar, tanto en el frente de excavación, como en el espacio anular entre el diámetro exterior de la tubería y la periferia de la excavación, la bentonita que nos ayudará a generar una presión de equilibrio en el frente contra la ejercida por el terreno y la presión hidrostática que, en el caso de este ejemplo, es del orden de 5.1 t/m^2 , y, en segundo término, para disminuir la fricción lateral que resultó para este ejemplo, de 1.51 t/m^2 . La inyección hacia el frente de la excavación se realiza en la cámara del microtúnel y la inyección hacia el espacio anular se realiza por los pasos que tiene la tubería.

Estaciones intermedias o lumbreras adicionales. Dado que la estación principal de gateo tiene una capacidad nominal de empuje de 1,200 t, se deberá definir el número y espaciamiento de cada estación intermedia que ayude a generar el empuje necesario calculado en el apartado c).

Siguiendo el ejemplo de que se requiera implementar estaciones intermedias de empuje, en cada tramo del proyecto, se tendrá que generar una fuerza que resulte de la diferencia del empuje total en cada tramo, menos la contribución inicial debida a la estación central de gateo.

Existen diferentes capacidades de empuje de las estaciones intermedias, para el caso de este ejemplo, se supone la contribución de dichas estaciones, de $E = 900 \text{ t}$.

➤ Para el sub-tramo 1 ($L = 479 \text{ m}$):

Empuje total necesario = 7,538.20 t, menos contribución inicial = 1,200.00 t; empuje remanente a vencer = 6,338.20 t.

Por lo tanto, la cantidad de estaciones intermedias de empuje para este subtramo, será de:

$$\text{No. Estaciones} = \frac{6,338.20}{900.00} = 7.04 ;$$

Se determina que para este Subtramo se tendrán **7 estaciones**.

Y su espaciamiento será de: $e = \frac{479}{7} = 68.43$; @ 68.50 m

➤ Para el sub-tramo 2 ($L = 300 \text{ m}$):

Empuje total necesario = 4,736.03 t, menos contribución inicial = 1,200.00 t; empuje remanente a vencer = 3,536.03 t.

Por lo tanto, la cantidad de estaciones intermedias de empuje para este subtramo, será de:

$$\text{No. Estaciones} = \frac{3,536.03}{900.00} = 3.93 ;$$

Se determina que para este Subtramo se tendrán **4 estaciones**.

$$\text{Y su espaciamento será de: } e = \frac{300}{4} = 75.00; @ 75.00 \text{ m}$$

➤ Para el sub-tramo 3 (L = 549 m):

Empuje total necesario = 8,634.02 t, menos contribución inicial = 1,200.00 t; empuje remanente a vencer = 7,434.02 t.

Por lo tanto, la cantidad de estaciones intermedias de empuje para este subtramo, será de:

$$\text{No. Estaciones} = \frac{7,434.02}{900.00} = 8.26 ;$$

Se determina que para este Subtramo se tendrán **8 estaciones**.

$$\text{Y su espaciamento será de: } e = \frac{549}{8} = 68.62; @ 69.00 \text{ m}$$

➤ Para el sub-tramo 4 (L = 244 m):

Empuje total necesario = 3,859.38 t, menos contribución inicial = 1,200.00 t; empuje remanente a vencer = 2,659.38 t.

Por lo tanto, la cantidad de estaciones intermedias de empuje para este subtramo, será de:

$$\text{No. Estaciones} = \frac{2,659.38}{900.00} = 2.95 ;$$

Se determina que para este Subtramo se tendrán **3 estaciones**.

$$\text{Y su espaciamento será de: } e = \frac{244}{3} = 81.33; @ 81.00 \text{ m.}$$

Con este procedimiento numérico y con base en los datos iniciales de partida, se han podido determinar las principales características que regirán el diseño del sistema de microtuneladora para el caso que se planteó.

Los datos finales se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Características finales proyectadas para la excavación con microtuneladora presurizada de lodos.

Subtramo	Longitud (m)	Empuje (t)	Estaciones intermedias (pza)	Espaciamiento (m)
<i>Subtramo 1</i>	479.00	7,538.20	7.00	68.50
<i>Subtramo 2</i>	300.00	4,736.03	4.00	75.00
<i>Subtramo 3</i>	549.00	8,634.02	8.00	69.00
<i>Subtramo 4</i>	244.00	3,859.38	3.00	81.00

De acuerdo al resultado de los cálculos, el empuje del microescudo y de la hilera de tubos de concreto en cada subtramo, se da mediante la acción conjunta de los 6 gatos de la estación principal, que pueden generar un empuje nominal total de $200 \times 6 = 1,200$ t, al tiempo que las estaciones intermedias de empuje contribuyen con el empuje remanente necesario para lograr el avance. Dicho progreso, se logra mediante la operación simultánea del empuje de la estación central y de las estaciones intermedias, el giro de la cabeza de corte del microescudo y la activación del sistema de circulación de lodos para producir la presión requerida en el frente. También, de manera simultánea, se activa el sistema para transportar la rezaga hacia su extracción.

Para conseguir el equilibrio de presiones en el frente de excavación, el sistema se apoya en las lecturas constantes del sensor situado en el frente del escudo, para que, con base en dichas lecturas, se pueda recalcular y regular dicha presión. La manera física de hacerlo es operando de manera diferencial, según se requiera, las bombas que suministran y/o extraen el lodo del frente.

Una vez activada la circulación de los lodos estabilizadores, éstos se van mezclando con el suelo excavado para acondicionarlos y facilitar su extracción, Una vez en la superficie, se recibe el lodo “pesado” proveniente del frente de excavación y se “limpia” retirando los materiales granulares que van mezclados con él. El lodo pesado se “aligera” agregando agua y nuevamente se envía al frente de excavación.

Para el proceso de colocación de tubería hincada, una vez que los gatos alcanzan su máxima extensión después de hincar un tramo, éstos se retraen y se coloca un anillo metálico de extensión, repitiendo el proceso de empuje. Nuevamente se retraen los pistones, se retira el anillo metálico de extensión y se coloca un tubo de concreto alineándolo y nivelándolo topográficamente.

Lubricación: A medida que va creciendo la longitud de la hilera de tubos hincados, se va inyectando el agente lubricante a través de las boquillas o taladros ubicados en cada tramo de la tubería, para disminuir la fricción con el terreno circundante.

Se recurre a la lubricación de la superficie lateral de los tubos para reducir la fricción entre el suelo y el concreto de los mismos, mediante la inyección de bentonita o productos químicos comerciales (por ejemplo, mezclas de polímeros: acrilatos/acrilamida en presentación líquida, rebajados con agua). Para llevar a cabo esta operación es necesario instalar boquillas de inyección o “graseras” (comúnmente 3 piezas de 1” de diámetro) a separaciones equidistantes de 120 cm, fijando una de las boquillas en la clave del túnel y las dos boquillas restantes, a la separación mencionada quedando en la sección inferior del tubo. Normalmente las “graseras” inferiores se utilizan para inyectar el lubricante utilizando la superior como “testigo” pero también se pueden utilizar las superiores como puntos de inyección. Se ha comprobado que el uso del lubricante puede reducir la fuerza teórica de empuje hasta 1/4 o 1/5 de su valor calculado sin el uso del mismo, (Pérez, J.A., 2013).

5 Conclusiones.

La excavación con Micro-TBM es una técnica que, en los últimos años, ha tenido una gran demanda debido a su ejecución poco invasiva, la cual es muy conveniente en proyectos de suministro de servicios (agua potable, drenaje, gas natural, electricidad, telecomunicaciones, etc.) que se ejecutan en entornos urbanos. Considerando la gran cantidad y variedad de servicios que dichos entornos demandan, así como la existencia de estructuras naturales o artificiales preexistentes en el trazo, el sistema ofrece muchas ventajas en cuanto a la formas de salvar dichos obstáculos. Esto favorece, en gran medida, la disminución en costos y tiempos de ejecución.

Cabe señalar que, dentro de las técnicas de excavación sin zanja, existen diferentes alternativas que se adecúan al objetivo del proyecto y a los diferentes entornos. Por lo anterior, resulta muy importante la evaluación de la técnica más apropiada en función de los requerimientos generales del proyecto y con la intención de encontrar el mejor balance costo-beneficio. Respecto a lo anterior, existen ciertos criterios para la selección del método más adecuado; a saber;

- Identificar claramente la necesidad a cubrir y el objetivo funcional (objetivo principal), así como el o los objetivos complementarios de la obra, los cuales se derivan generalmente del primero, (*López, C. 2011*)
- Proponer, en la etapa de anteproyecto, las posibles rutas, así como puntos obligados de conexión o alternativas al respecto, tipo de servicio que prestará, conexión con redes ya existentes, tipo de tubería a utilizar, dimensiones, etc.
- Realizar los estudios básicos que, independientemente de la técnica elegida, serán de utilidad para el desarrollo del proyecto, tales como: levantamiento topográfico y georreferenciación de cada una de las estructuras o sistemas naturales que estén involucrados en el trazo del proyecto, caracterizaciones geológicas, estudios geotécnicos y geohidrológicos, matrices de impacto ambiental con sus medidas de mitigación, estudios específicos como análisis físico-químicos de los suelos, así como evaluaciones de impactos socioeconómicos.
- Análisis del balance costo-beneficio del proyecto, el cual otorgará la viabilidad, o no, de la propuesta.
- Revisar la disponibilidad del método y tecnología propuestos.

A su vez, las inconsistencias en los proyectos de microtuneleo se reducen ejecutando una adecuada ingeniería básica y de detalle, sobre todo, considerando que toda obra subterránea representa un alto grado de incertidumbre, por lo que la correcta caracterización del subsuelo representa el punto de partida para el éxito de este tipo de obras. Al respecto, el uso de la metodología del “Base Line Report” ayuda, tanto al cliente como al constructor, a contar con certidumbre en cuanto a los límites de responsabilidad de cada parte y a los posibles ajustes en tiempo y costo en que se pudiera incurrir, por lo que se sugiere su implementación en este tipo de proyectos.

En cuanto a la decisión del método a utilizar, resulta evidente que el diámetro de excavación y de las tuberías a emplear repercuten directamente en las técnicas disponibles. Mientras mayor sea el diámetro, se requerirá de técnicas más sofisticadas como el caso que ocupa al presente trabajo.

Aún con todas las ventajas que tiene el uso de la tecnología de microtuneleo, el costo de inversión en el equipo sigue siendo una limitante, aunado al hecho de que, dado que cada proyecto es un traje a la medida, difícilmente un equipo se puede ocupar más de una vez, a menos que las características de otro proyecto se asemejen al que dio origen a la adquisición del equipo.

Este tipo de técnicas requieren un elevado nivel de capacitación para el personal que opera cada uno de los sistemas involucrados en la operación.

Es importante mencionar que la cantidad de variables que intervienen en este tipo de proyectos pueden superar, en número, a las indicadas dentro del alcance del presente trabajo por lo que todas ellas representan una referencia, no limitativa, a las que se pudiesen presentar en los diferentes proyectos con microtuneleo, sobre todo, por la complejidad que representa la construcción de tipo subterránea, en donde el tipo de terreno y su geohidrología condicionan los parámetros de operación y las actividades relacionadas con éstos.

A su vez, se indicó que, con respecto a las estaciones intermedias de empuje, su uso se recomienda cuando la distancia sobrepasa los 150 m (*Mínguez, F. et al*); sin embargo, en el caso presentado, se deben superar esfuerzos con valores por encima de los que proporciona la estación principal de empuje, dichos esfuerzos se calcularon en función de las condiciones del subsuelo y de los parámetros que se indican en el apartado correspondiente. La fuerza de fricción lateral se calcula a partir de la presión vertical efectiva a nivel del eje del túnel.

Dentro de la evolución de los procesos de excavación, sobre todo en zonas urbanas y congestionadas, el contar con alternativas para poder generar infraestructura sin afectar a dicho entorno, representa grandes ahorros en tiempo y costos.

Actualmente, las grandes urbes se encuentran en el proceso de revisión de sus políticas de desarrollo urbano. El incremento poblacional incrementa la demanda de servicios, hasta el punto de rebasar la capacidad de respuesta de la autoridad. A su vez, el impacto ambiental, que es un tema que ha tomado relevancia en los últimos años, es un punto a favor para el uso de tecnologías de construcción más acordes con el cuidado del medio ambiente. La integración de nuevos servicios que generen menos molestias e impactos ambientales, se convierte en una ventaja hacia esta tecnología.

En otros métodos, un problema recurrente al momento de trabajar con excavaciones a cielo abierto es el control de los asentamientos, dado que se extrae el material en su estado consolidado para dar paso a un sistema que no siempre logra igualar las condiciones iniciales y, cuyas consecuencias, son asentamientos o daños a estructuras vecinas por causa de consolidaciones de los materiales de relleno.

Una línea de investigación que este trabajo propone, consiste en elaborar normas de proyecto y construcción para este tipo de tecnología ya que, a la fecha, es poca la información existente al respecto y muchos los procesos que se pueden normar para dar mayor certeza e impulso a este campo de la ingeniería.

Además, con base en el hecho de que las zonas urbanas siguen presentando un ritmo de crecimiento cada vez mayor, se hace evidente la necesidad de aprovechar aún más el espacio subterráneo, por lo que se espera que el presente trabajo tenga el alcance suficiente para sensibilizar al gremio y a las autoridades correspondientes sobre el impulso en el uso de estas tecnologías para la construcción de la infraestructura que se requiere.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Comisión de Aguas del Estado de México. (2000). Especificaciones generales para la construcción de obras de agua potable y alcantarillado. México: CAEM.
2. Comulada S. (2005). Process controlling and data management for shield tunnelling. Maidl & co., <http://www.maidl-tc.de>.
3. Departamento de construcción, División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. (1985). Apuntes de movimientos de tierras Tomo I. México, D.F.
4. Dirección General de Servicios Técnicos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2013). Capítulo 7 Métodos de excavación. Manual de diseño y construcción de túneles de carretera (40p). México.
5. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales, Puentes y Puertos de Barcelona, *E.T.S.E.C.C.P.B.*. (2000). Ingeniería geológica, excavaciones subterráneas, excavación con máquinas integrales: topos y escudos, ww.etcg.upc.edu.
6. Fernández L.M. & González de Vallejo L. (1987). Aplicación de las clasificaciones geomecánicas al estudio de excavaciones subterráneas. Henares, revista geológica, 1, 71-76
7. Gallo J. & Pérez-Acebo, H. (2017). Modelo de rendimiento de microtuneladoras (MTBM). *Informes de la Construcción*, 69(546): e203, <http://dx.doi.org/10.3989/id55211>.
8. Herrenknecht, M. (2003). *Microtunneling with Herrenknecht MicroMachines*. Colorado School of Mines, 2003.
9. Hoyo Rodríguez J.J. & Romana M.G. (2015). La selección del método constructivo en hincas, comparación con los túneles de dovelas de mediano diámetro. *Ingeo túneles*, 22, 14.
10. Índigo Construcciones Ltda. (2017). Instrumentación geotécnica, <http://www.indigoconstrucciones.com>
11. Jaime A. (2004). Uso del espacio del subsuelo. Serie Investigación y Desarrollo, Instituto de Ingeniería, UNAM, SID/643, 27.
12. López C. (2011). *Manual de túneles y obras subterráneas, tomos I y II*, Móstoles: Entorno Gráfico, S.L.

13. Mínguez S.F. (2015). Métodos de excavación sin zanjas. Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
14. Moreno y Fernández, A.A. (2006). Construcción de lumbreras y túneles en suelos y rocas. México, D.F.: AMITOS.
15. Muñoz, L.M. & González, L. (1987). Aplicación de las clasificaciones geomecánicas al estudio de excavaciones subterráneas. En Incidencia de las condiciones geomecánicas en la estabilidad de excavaciones subterráneas: Desarrollo de las Clasificaciones Geomecánicas a partir de datos de superficie, (71-76). Madrid, España: Universidad Complutense de Madrid.
16. Pedraplus Ingeniería. (2014). Microtúneles e hinca de tubería. 2017, de Pedraplus Ingeniería, SL, <http://victoryepes.blogs.upv.es>.
17. Pérez Reyes J.A. (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 (pp 2-6). Ciudad de México: COMISSA.
18. Peurifoy H.L. (1978). Métodos, planeamiento y equipos de construcción. México: Diana.
19. Riascos L.A., Rincón M.A., Torres D.A. & Torres A.C. (2007). Evolución histórica, actualidad y tendencia de explotación del espacio subterráneo en Bogotá - Colombia. Revista Épsilon, No. 8 57 - 70, 14.
20. Salcedo Vera H.E. & Valencia D.O. (2007). Diseño de una microtuneladora para excavaciones con tecnología sin zanja. Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
21. Viana F. E. (2004). Técnicas de construcción fundamentadas en la tecnología sin zanjas, tesis, Universidad San Carlos de Guatemala.
22. YEPES, V. (2014). Maquinaria para sondeos y perforaciones. Apuntes de la Universitat Politècnica de València, Ref. 209. Valencia, 89 pp.