



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – TÚNELES Y OBRAS SUBTERRÁNEAS

EVALUACIÓN DEL COSTO DE PROYECTOS Y CONSTRUCCIÓN DE TÚNELES

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ALFREDO ROMERO MARIN

TUTOR PRINCIPAL
JOSÉ FRANCISCO SUAREZ FINO, INSTITUTO DE INGENIERÍA

Cd. Mx. Febrero 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Mendoza Rosas Marco Tulio

Secretario: M. en I. Moreno Y Fernández Andrés A.

1 er. Vocal: M. en I. Suárez Fino José Francisco

2 do. Vocal: Dr. Pérez Reyes José Anselmo

3 er. Vocal: M. en I. López Molina Jorge A.

Ciudad Universitaria, CDMX.

TUTOR DE TESIS:

M. en I. José Francisco Suárez Fino

FIRMA

RESUMEN

La ITA (International Tunneling and Underground Space Association) señala que los aspectos económicos erróneamente continúan siendo una barrera importante para el desarrollo del uso del espacio subterráneo. Debido a que el costo de construcción inicial de las estructuras subterráneas es generalmente más alto que el de la construcción a cielo abierto, las estructuras subterráneas son de cierto modo penalizadas en comparación con la construcción de estructuras a cielo abierto. Por lo tanto, los beneficios económicos de un túnel deben ser calculados estimando los impactos del costo de vida en los beneficios proporcionados por dicha instalación. Además, la evaluación de los túneles debe tener en cuenta las diversas ventajas indirectas que ofrecen.

La complejidad del diseño, construcción y planeación de túneles es incomparable con otro tipo de infraestructura. La planeación de un túnel requiere una intervención y evaluación multidisciplinaria, y debe adoptar los estándares requeridos para su uso final. Es difícil, pero necesario, comprender completamente como se conciben y se construyen los túneles para entender como las variables de costo interactúan y tienen influencia en el costo final de los proyectos.

El panorama internacional de los túneles ha mostrado un crecimiento muy acelerado en los últimos años y se prevé que las construcciones de túneles sigan aumentando. Debido a esto el tema toma relevancia para la planeación y ejecución de las obras de infraestructura venideras.

Para realizar un análisis de los costos para la construcción de un túnel hay que identificar los principales elementos o factores de costos. Identificar y cuantificar las variables que tienen influencia en el costo de los túneles permitirá tomar acción en las áreas de relevancia y podría potencialmente resultar en la reducción del costo de realización del túnel.

El uso de registros históricos es una herramienta usada comúnmente para revisiones preliminares de análisis de costos. Para el caso de proyectos de túneles en México no se cuenta con alguna base de datos que esté disponible para consulta, por lo que se plantea comenzar con la recopilación de la información de los diferentes proyectos que se han ejecutado, los que se están desarrollando y su constante actualización en el futuro.

La opinión de los expertos es un método prácticamente obligado al realizar análisis de costo o riesgo en la gerencia de proyectos. La experiencia de los expertos ayuda a identificar los elementos clave para realizar las evaluaciones desde sus etapas iniciales, evitando invertir tiempo y recursos en elementos irrelevantes para los objetivos del proyecto.

Los proyectos de túneles son obras que deben ser ejecutadas en todas sus fases por empresas especializadas con experiencia en el sector. En la etapa de licitación y contratación se deben de implementar medidas que se aseguren que participen contratistas con experiencia en obras subterráneas.

La constitución de los proyectos de túneles debe ser un proceso flexible de mejora continua. Las condiciones encontradas en el frente de excavación deben de servir para verificar las condiciones de diseño y modificarlas en caso de ser necesario. Las estrategias de construcción deben de verificarse también para identificar potenciales ahorros en los costos.

En la fase de estudios e investigación del sitio es donde se puede tener un mayor impacto en el ahorro de costos. La fase previa al diseño es la siguiente en importancia por su impacto. En esta última son definidos elementos como las dimensiones del túnel, el alineamiento, la ubicación, el sostenimiento, el revestimiento y el proceso constructivo; de los que dependerá en gran medida el costo final de la obra. La información necesaria para poder definir el diseño del túnel viene de los estudios previos. La inversión en estos estudios previos ha demostrado ser importante para lograr un mejor control de costos durante la construcción y la operación.

Durante la construcción de la obra, la clave para el ahorro de costos está en la estandarización de elementos del túnel, el replanteo de avances durante la construcción del túnel, para mejorar los rendimientos (dependiendo del proceso constructivo en cuestión), la automatización de procesos, el desarrollo de tecnologías que permitan disminuir los precios, las reutilización de maquinaria para la ejecución de múltiples proyectos, la participación de expertos en túneles para la construcción, supervisión y administración del proyecto.

Los ahorros o gastos mayores durante la etapa de operación y el mantenimiento necesario dependen directamente de las consideraciones de diseño y de la correcta ejecución de la construcción.

Contenido

1. Planteamiento del problema.....	8
2. Justificación y alcances.....	9
3. Clasificación de Túneles	10
3.1. Método constructivo	10
3.2. Función	11
3.2.1. Transporte	11
3.2.2. Energía, agua y telecomunicaciones	12
3.2.2.1. Hidráulicos y sanitarios.....	12
3.2.2.2. Servicios.....	12
3.2.2.3. Minas.....	12
3.2.2.4. Almacenamiento.....	12
3.3. Ubicación.	12
3.3.1. Urbanos	12
3.3.2. Rurales	13
3.3.3. subacuáticos.....	13
3.4. Longitud.	13
3.4.1. Túneles cortos (menos de un kilómetro).....	13
3.4.2. Túneles medianos (entre uno y cinco kilómetros).....	13
3.4.3. Túneles largos (más de cinco kilómetros)	13
3.5. Características del terreno	13
3.5.1. Túneles en roca	13
3.5.2. Túneles en suelo	13
3.5.3. Terreno mixto.....	13
3.5.4. Subacuáticos	13
4. Proyectos	14
4.1. Ciclo de vida.....	14
4.2. Fase del proyecto.....	14
4.3. Procesos	15
4.3.1. Grupo de procesos	15
4.4. Áreas de conocimiento.....	17
5. Gestión de los costos	19

5.1.	Planificar	20
5.2.	Herramientas de estimación.....	20
5.2.1.	Juicio de expertos.....	20
5.2.2.	Estimación análoga	20
5.2.3.	Estimación paramétrica	20
5.2.4.	Estimación ascendente.....	21
5.2.5.	Estimación por tres valores	21
5.2.6.	Análisis de datos.....	21
5.3.	Determinar el presupuesto	22
5.4.	Controlar los costos.....	22
6.	Proyectos de túneles.....	23
6.1.	Estudios financieros	23
6.2.	Problemas ambientales y comunitarios.....	24
6.3.	Planeación operacional y financiera.....	25
6.4.	Métodos de adjudicación de proyectos	26
6.5.	Análisis y gestión del riesgo	28
6.6.	Programa y costos de ejecución	28
7.	Ciclo de vida de un túnel	30
7.1.	Estudio de factibilidad	30
7.2.	Planeación y diseño	30
7.3.	Construcción	31
7.3.1.	Método convencional	32
7.3.1.1.	Perforación y voladura.....	32
7.3.1.2.	Excavación mecánica mediante máquinas de ataque puntual.	36
	• <i>Martillos hidráulicos pesados.</i>	37
	• <i>Rozadoras.</i>	38
	• <i>Máquinas de precorte.</i>	39
7.3.2.	Excavación mecanizada con TBM.....	40
7.3.3.	Túneles Inmersos	45
7.3.4.	Túneles Falsos	49
7.3.5.	Túneles Flotantes	51
7.4.	Operación.....	53

7.4.1.	Plan general de operación.....	53
7.4.2.	Plan de mantenimiento.....	54
7.4.3.	Reducción de los costos de operación de túneles.....	54
8.	Costos en proyectos de túneles.....	59
8.1.	Estado del arte.....	60
8.2.	Encuesta a expertos.....	66
8.3.	La exploración y su impacto en el costo.....	72
8.3.1.	Exploración en el TEO.....	76
8.3.2.	Tren interurbano México Toluca.....	77
8.4.	Comparativa de porcentaje invertido en exploración con porcentaje de sobrecosto.....	79
8.5.	Manejo contractual del riesgo en obras subterráneas.....	83
8.5.1.	Los riesgos en las obras subterráneas.....	83
8.5.2.	Manejo contractual del riesgo.....	84
8.5.3.	Geotechnical Baseline Report.....	89
8.5.4.	Dispute Boards.....	93
8.6.	Análisis del costo de túneles.....	98
8.6.1.	Túneles carreteros.....	101
8.6.2.	Túneles ferroviarios.....	102
8.6.3.	Costos para túneles con EPB.....	102
9.	Conclusiones.....	105
10.	Bibliografía.....	111

1. Planteamiento del problema

La ejecución de obras subterráneas ha tenido gran crecimiento en los últimos años y son parte fundamental del desarrollo de la infraestructura en las economías emergentes. Se han vuelto más que una opción, en algunos casos la única posibilidad viable para resolver las necesidades.

La tecnología en la industria de los túneles sigue creciendo y permitiéndonos realizar proyectos cada vez más ambiciosos en menor tiempo. En la misma medida se debe fomentar el crecimiento en la administración de los costos inherentes a estos proyectos, que nos permitan realizar propuestas realistas y proyectos adecuados que favorezcan al éxito de estos.

Como ingenieros, durante la ejecución de proyectos en sus diferentes etapas se suele poner especial atención a las cuestiones técnicas dejando de lado las implicaciones económicas. Es importante aumentar los esfuerzos a los estudios en la parte de los costos, que nos permitan obtener mejores resultados. Las innovaciones tecnológicas, técnicas y administrativas son todas importantes para lograr mejores proyectos en el futuro.

La participación de empresas y funcionarios con poco o nulo conocimiento en las obras subterráneas supone un gran riesgo para la inversión del proyecto. El procedimiento de licitación para adjudicación de contratos a la propuesta más barata no garantiza que sea la opción más económica.

Esta investigación se enfocará en identificar los elementos clave en los costos de los túneles, analizando las experiencias de proyectos ejecutados y consultado las opiniones de expertos en la materia. Al identificar los elementos clave, se propondrán las mejores prácticas para evitar, en la medida de lo posible, los sobrecostos.

Los aspectos principales identificados de la problemática que motiva esta investigación son:

- Los sobrecostos históricos presentados en las obras de túneles generan desconfianza para invertir en nuevos proyectos de este tipo.
- Es necesario identificar los factores que influyen en el costo de obras subterráneas y cuáles son los que presentan más variabilidad para plantear estrategias para evitar el sobrecosto.
- Los temas económicos son minimizados por los ingenieros al momento de tomar decisiones.
- Los encargados de tomar decisiones desconocen las implicaciones técnicas.
- No existe una guía para el estudio de costos para obras subterráneas.
- Las obras subterráneas se generalizan como complejas y se normaliza el incremento de costos.

El objetivo general de la investigación es identificar los elementos que tienen mayor impacto en los costos de los túneles y en los que existe mayor oportunidad para disminuirlos, así como proponer las mejores prácticas para evitar los sobrecostos en futuros proyectos de túneles.

Los objetivos particulares son:

- Identificar los costos inherentes a las obras subterráneas.
- Identificar los agentes de costo claves en proyectos de túneles.
- Proponer mejores prácticas y recomendaciones para la gestión del costo.
- Resaltar la importancia de conocer y estudiar los temas de costos dentro del campo de las obras subterráneas.
- Promover la construcción de las obras subterráneas.
- Proponer las mejores prácticas para financiar estos proyectos.
- Plantear cambios en los métodos de contratación actuales.
- Realizar una comparativa internacional de los costos de proyectos de túneles.
- Recopilar la opinión de expertos en la materia.
- Identificar los aspectos de mayor riesgo en relación con los costos de las obras subterráneas.

Va dirigida especialmente a ingenieros relacionados en proyectos, construcción y supervisión de túneles, entidades gubernamentales encargadas de proyectos de infraestructura, contratistas, planeadores urbanos y público en general interesado en las obras subterráneas y particularmente en los túneles.

Para lograrlo se realizará un análisis de los elementos que intervienen en la construcción de túneles, investigando experiencias y estudios previos, analizando proyectos ejecutados, consultado a expertos en la materia, proponiendo estrategias para tener un estimado realista del costo total, y planteando las mejores prácticas para control de los costos durante el desarrollo de la obra.

2. Justificación y alcances

Los costos en las obras subterráneas han tenido históricamente incrementos altos respecto a su precio base, por lo que es necesario identificar cuáles son los factores que propician los aumentos y posteriormente plantear como atenuarlos. Con el desarrollo de este trabajo se busca mostrar una estrategia inicial para evitar, en la medida de lo posible, los sobrecostos en el proyecto y construcción de túneles, además de generar confianza hacia la industria subterránea y promoverla.

3. Clasificación de Túneles

Para realizar un estudio sobre los costos de los túneles es necesario comenzar con lo básico: entender que es un túnel e identificar los diferentes tipos que existen, para posteriormente analizar sus diferencias y similitudes.

Un túnel es una obra subterránea de carácter lineal; es un paso subterráneo abierto artificialmente para establecer una vía de comunicación a través de un monte, por debajo de un río u otro obstáculo¹.

Dentro del mundo de los túneles existen características propias de cada uno que nos permiten diferenciarlos y agruparlos para su análisis y estudio.

Un túnel para un metro tiene consideraciones de diseño, constructivas y de operaciones distintas a las necesarias para un túnel para una carretera, como sus características geométricas, métodos de construcción, sistema de revestimiento, y en los materiales requeridos para su uso. Estas diferencias nos llevan a clasificarlos en las siguientes categorías.

La siguiente clasificación está basada en asociación internacional de túneles (ITA), y el manual de diseño y construcción de túneles del departamento de transporte de Estados Unidos (Technical manual for design and construction of road tunnels, US department of transportation and federal highway administration).

3.1. Método constructivo

De manera general, existen dos métodos de excavación de túneles; el método convencional que se divide en perforación y voladura, y con máquinas de ataque puntual; y el método mecanizado con tuneladoras. Tres métodos adicionales de construcción de túneles son los túneles falsos, sumergidos y los flotantes, cuyo método constructivo es muy distinto al de los primeros dos.

Una primera clasificación de túneles puede darse por su método constructivo²:

- 3.1.1. Método convencional
 - 3.1.1.1. Perforación y voladura
 - 3.1.1.2. Mecánico con máquinas de ataque puntual
- 3.1.2. Método mecanizado
- 3.1.3. Túneles falsos
- 3.1.4. Subacuáticos
 - 3.1.4.1. Sumergidos
 - 3.1.4.2. Flotantes

En el capítulo 7.3 se describen los distintos métodos constructivos.

¹ Real Academia Española, *Túnel*. (<https://dle.rae.es/t%C3%BAnel>)

² ITA, how to go underground, construction methods, (<https://tunnel.ita-aites.org/en/how-to-go-underground>)

3.2. Función

Los túneles son construidos para cumplir una función que nos permite clasificarlos en las siguientes categorías generales.

3.2.1. Transporte

El transporte es una de las funciones principales y la identificada por la mayoría de las personas cuando se piensa en un túnel, en parte porque son de los únicos tipos de túneles que llegan a ser visibles para la mayoría de la población. En esta categoría existen diferencias importantes entre los diferentes tipos de transporte para los cuales son construidos:

- **Carreteros.** Los túneles para uso vehicular son indispensables para una eficiente red de carretera. El ahorro en tiempos que representa el atravesar una obstrucción en comparativa con rodearla, les da una ventaja que generalmente rebasa el costo inherente. Los niveles de seguridad necesarios para túneles carreteros son un aspecto importante que los diferencian del resto de los túneles.
- **Ferrocarril.** Para proyectos ferroviarios se han construido túneles de más de 50 kilómetros de longitud, como el túnel San Gotardo en Suiza y el túnel Seikan de Japón. El diseño y construcción de este tipo de túneles tiene su característica principal en las instalaciones y equipo necesario para su operación conjunta con el resto de la red ferroviaria.
- **Metro.** Los túneles son parte importante de las redes de metro. Las líneas subterráneas son ajenas a lo que sucede en superficie y permiten un uso más eficiente del espacio. Las primeras líneas de metro fueron inauguradas en Londres en 1863, y consistían en una red subterránea de 6 km. En el metro de la ciudad de México de las 195 estaciones en total, 115 son subterráneas.
- **Pasos peatonales y de ciclovías.** Los túneles para uso peatonal y ciclovías son una de las alternativas para cruces de grandes avenidas. A diferencia de los cruces elevados, se tiene un aprovechamiento del espacio subterráneo y se evita el impacto visual en superficie.

3.2.2. Energía, agua y telecomunicaciones

3.2.2.1. Hidráulicos y sanitarios

En el mundo de los túneles, los hidráulicos y sanitarios son los de mayor longitud que existen en el mundo. El túnel emisor oriente de la Ciudad de México con 62 kilómetros, es el túnel de drenaje más largo del mundo. Estos túneles deben de cumplir con características geométricas que favorezcan el flujo hídrico y tienen que ser impermeables.

3.2.2.2. Servicios

El uso de túneles para servicios de suministro de eléctricos, de internet, de gas, por mencionar algunos, es cada vez más común en las ciudades. Lograr calles limpias y visualmente estéticas en las que todos los cables e instalaciones de suministros domésticos sean subterráneas es la tendencia actual. Las micro tuneladoras actuales permiten realizar las excavaciones desde una lumbrera de entrada y una de salida, sin impacto en superficie.

3.2.2.3. Minas

Es la función más antigua de los túneles. Se tienen registros de la primera mina y los primeros túneles excavados hace 40,000 años, en el actual Egipto. Mucha de la tecnología e investigación sobre los túneles proviene de la minera, debido en parte a la gran cantidad de túneles que son necesarios para las minas subterráneas y a su importancia económica.

3.2.2.4. Almacenamiento

Hidrocarburos, desechos industriales, alimentos, son algunos ejemplos de este uso.

3.3. Ubicación.

Pueden clasificarse también por la zona de su construcción en:

3.3.1. Urbanos

Este tipo de túneles tiene restricciones espaciales, ambientales y sociales, que condicionan los métodos constructivos. La interacción con la infraestructura existente debe ser medida con precisión, y los trabajos deben interferir lo menos posible con las actividades de la ciudad. Las condiciones del sitio tienen a ser más conocidas por la cantidad de proyectos ejecutados en las urbes.

3.3.2. Rurales

En zonas rurales, las características de la geología tienen a ser menos conocidas que en las ciudades. Generalmente no se tienen restricciones espaciales y se tiene más libertad para decidir entre los distintos métodos constructivos. Por ejemplo, se pueden ejecutar voladuras o excavaciones en roca con tuneladora con menores restricciones sobre las deformaciones del terreno circundante.

3.3.3. subacuáticos

Las condiciones submarinas son las menos estudiadas debido a que la cantidad de este tipo de proyectos es menor. Aún con esto, los primeros túneles en excavados debajo de lechos marinos y ríos se remontan a mediados del siglo XIX. Proyectos como los de túneles flotantes aún no se han construido, a pesar de haberse planteado como idea hace años.

3.4. Longitud.

De acuerdo con su longitud se pueden clasificar en:

3.4.1. Túneles cortos (menos de un kilómetro)

3.4.2. Túneles medianos (entre uno y cinco kilómetros)

3.4.3. Túneles largos (más de cinco kilómetros)

3.5. Características del terreno

3.5.1. Túneles en roca

3.5.2. Túneles en suelo

3.5.3. Terreno mixto

3.5.4. Subacuáticos

4. Proyectos

Como punto de partida para el análisis de un proyecto, en este capítulo se abordan de manera general las definiciones de conceptos básicos y características de un proyecto.

Un proyecto es un conjunto de esfuerzos temporales, dirigidos a generar un producto o un servicio único.

Los proyectos de infraestructura tienen como objetivo cubrir una necesidad por medio del diseño, la construcción y la operación del producto, que puede ser un edificio, una carretera, un puente, un túnel, etc.

Un proyecto de un túnel consiste en la concepción, planeación, desarrollo y construcción, operación y mantenimiento, para las características y uso particular.

4.1. Ciclo de vida

El ciclo de vida es la serie de fases que atraviesa un proyecto desde su inicio hasta su conclusión. Proporciona el marco de referencia básico para dirigir el proyecto. Las fases generales del ciclo de vida son:

- Inicio
- Organización y preparación
- Ejecución
- Cierre

4.2. Fase del proyecto

Una fase del proyecto es un conjunto de actividades relacionadas de manera lógica con un objetivo final. Las fases o subcomponentes generalmente reciben nombres que indican el tipo de trabajo que realizan. Algunos ejemplos de fases son:

- Desarrollo conceptual
- Estudio de viabilidad
- Desarrollo de soluciones
- Diseño
- Prototipo
- Construcción
- Prueba
- Transición
- Puesta en marcha
- Revisión de hitos
- Lecciones aprendidas

Las fases del proyecto pueden establecerse en base a diversos factores como los siguientes:

- Naturaleza del proyecto
- Características únicas de la organización, industria y tecnología
- Elementos del proyecto como: tecnología, ingeniería, negocios, procesos o elementos legales
- Puntos de decisión

El uso de múltiples fases brinda una oportunidad para evaluar el desempeño del proyecto y tomar las acciones correctivas o preventivas necesarias para las fases siguientes.

4.3. Procesos

El ciclo de vida del proyecto se gestiona mediante la ejecución de una serie de actividades conocidas como procesos. Cada proceso produce un resultado mediante el uso de herramientas y técnicas.

Los procesos de un proyecto se vinculan lógicamente entre sí a través de los resultados que producen. Los procesos pueden contener actividades superpuestas que tienen lugar a lo largo de todo el proyecto. En general, el final de un proceso tiene como resultado una entrada a otro proceso.

En general, los procesos se encuadran en una de tres categorías:

- Procesos utilizados una única vez o en puntos predefinidos.
- Procesos que se llevan a cabo periódicamente.
- Procesos que se realizan de manera continua.

4.3.1. Grupo de procesos

Un grupo de procesos es un agrupamiento lógico para alcanzar objetivos específicos, y son independientes de las fases del proyecto. Los procesos se agrupan en los siguientes cinco grupos:

- **Inicio.** Procesos realizados para definir un nuevo proyecto o una nueva fase. Establecer la visión, la misión por cumplir y sus objetivos, la justificación, las restricciones y supuestos.
- **Planificación.** En estos se establece el alcance, se refinan los objetivos y define el curso de acción requerido para alcanzarlos. También se desarrolla un plan que nos ayude a prever el cómo cumpliremos los objetivos, tomando en cuenta los factores que afectan al proyecto. Las metas se establecen con énfasis en la prevención en lugar de la improvisación.

- **Ejecución.** Son los procesos para completar el trabajo definido en el plan, a fin de satisfacer los requisitos del proyecto. Implementar el plan, contratar, administrar los contratos, integrar al equipo, distribuir la información y ejecutar las acciones requeridas, son las actividades consideradas para este grupo.
- **Monitoreo y Control.** Grupo requerido para dar seguimiento, analizar y regular el progreso y desempeño del proyecto, para identificar áreas en las que el plan requiera modificaciones y aplicar los cambios correspondientes. Se compara lo ejecutado contra lo previsto o planeado (control), de no identificar desviaciones, se continúa con la ejecución. Si se encuentran desviaciones, se acuerda la acción correctiva y posteriormente se continúa la ejecución.
- **Cierre.** Tienen como objetivo completar y cerrar formalmente el proyecto, fase o contrato en cuestión. Se concluyen las relaciones contractuales profesionalmente para facilitar referencias posteriores al proyecto, así como para el desarrollo de futuros proyectos. Por último, se elaboran los documentos con los resultados finales, archivos, cambios, directorios, evaluaciones, lecciones aprendidas, entre otros.

Al observar las ilustraciones 1 y 2, podemos ver que al eliminar los procesos de inicio y cierre tenemos una operación de rutina. El ciclo de mejora continua **planear-hacer-verificar-actuar** descrito por Deming.

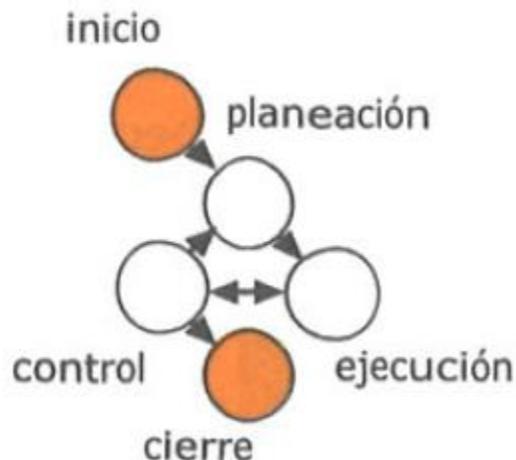


Ilustración 1. Procesos en el desarrollo de proyectos. Adaptación de Yamal Chamoun de: Project Management Institute, PMBOK Guide 2000 EDITION, USA.

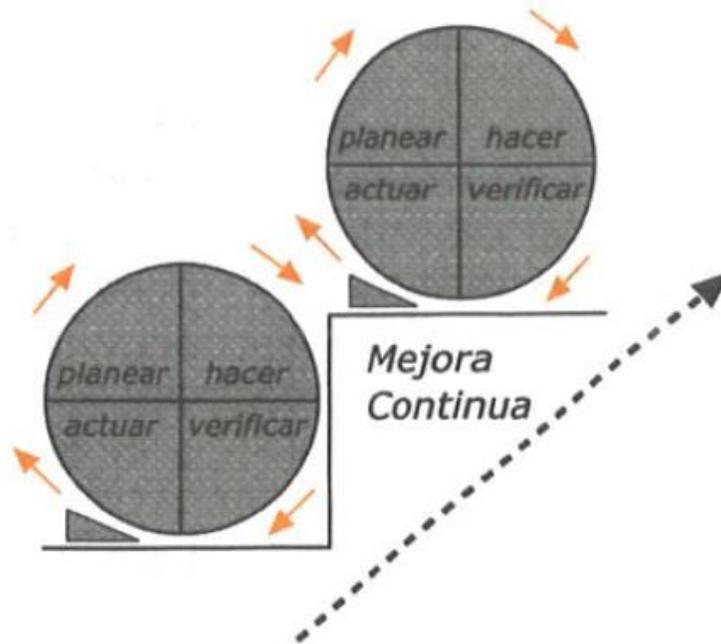


Ilustración 2. Ciclo Planear – Hacer – Actuar – Verificar. Yamal Chamoun.

4.4. Áreas de conocimiento

Además de los grupos, los procesos también se categorizan por áreas de conocimiento. Un área de conocimiento es definida por sus requisitos y se describe en términos de los procesos, prácticas, entradas, salidas, herramientas y técnicas que lo componen. Las diez áreas de conocimiento que se utilizan en los proyectos son:

- **Gestión de la integración.** Incluye las actividades para identificar, definir, combinar, unificar y coordinar los diversos procesos del proyecto.
- **Gestión del alcance.** Son los procesos requeridos para garantizar que el proyecto incluye todo el trabajo requerido para completarlo con éxito.
- **Gestión del cronograma.** Se refiere a las actividades para administrar la finalización del proyecto a tiempo.
- **Gestión de los costos.** Los procesos involucrados en planificar, estimar, presupuestar, financiar, obtener financiamiento, gestionar y controlar los costos, están incluidos en esta área, con el objetivo de que se complete el proyecto dentro del presupuesto aprobado.
- **Gestión de la calidad.** Esta área funciona para incorporar la política de calidad de la organización en cuanto a la planificación, gestión y control de los requisitos de calidad del proyecto y el producto final, a fin de satisfacer las expectativas de los interesados.
- **Gestión de los recursos.** Incluye los procesos para identificar, adquirir y gestionar los recursos necesarios para la conclusión exitosa del proyecto.
- **Gestión de las comunicaciones.** Procesos requeridos para garantizar que la planificación, recopilación, creación, distribución, almacenamiento, recuperación, gestión, control, monitoreo y disposición final de la información sean oportunos y adecuados.

- **Gestión de los riesgos.** En esta se lleva a cabo la identificación, análisis, planificación e implementación de respuestas y monitoreo de los riesgos del proyecto.
- **Gestión de las Adquisiciones.** Es el área encargada de la compra o adquisición de los productos, servicios o resultados requeridos por fuera del equipo del proyecto.
- **Gestión de los Interesados.** Se refiere a los procesos requeridos para identificar a las personas, grupos u organizaciones que pueden afectar o ser afectados por el proyecto, para analizar sus expectativas y su impacto en el proyecto, y posteriormente desarrollar estrategias con el fin de lograr su participación en las decisiones y en la ejecución del proyecto.

Las necesidades de un proyecto específico pueden requerir áreas de conocimiento adicionales. Por ejemplo, la construcción de infraestructura podría requerir la gestión de la seguridad, salud y medio ambiente.

5. Gestión de los costos

La gestión de costos es una de las áreas de conocimiento, descrita en el capítulo 4.3.1. En esta actividad se incluye los procesos involucrados en gestionar, estimar, presupuestar, y controlar los costos. Los procesos involucrados son:

- **Planificar.** En este se define como se han de estimar, presupuestar, monitorear y controlar los costos.
- **Estimar costos.** Es el proceso de desarrollar una aproximación de los recursos monetarios necesarios para completar el trabajo.
- **Determinar el presupuesto.** Consiste en sumar los costos estimados de las actividades individuales o paquetes de trabajo para establecer una línea base de costos.
- **Controlar costos.** Este proceso se encarga de monitorear el proyecto para actualizar los costos y gestionar cambios a la línea base.

Debido a que la capacidad de influir en los costos es mucho mayor en las primeras etapas del proyecto, la definición temprana de los alcances es una tarea crítica.

La gestión de los costos se ocupa principalmente del costo de los recursos necesarios para completar las actividades del proyecto. Se debe tener en cuenta el efecto que tendrán las decisiones tomadas sobre los costos operación y mantenimiento. Por ejemplo, el hecho de limitar el número de revisiones de un diseño podría reducir el costo del proyecto, pero podría asimismo resultar en un incremento de los costos operativos. De manera similar en un proyecto de un túnel, el ahorrar recursos reduciendo el presupuesto para la exploración geotécnica, puede significar un incremento importante en los costos de construcción.

Otro aspecto que vale la pena resaltar de la gestión de los costos es que los diversos interesados miden los costos del proyecto de diferentes maneras y en momentos distintos. El equipo de construcción piensa en los recursos necesarios para la mano de obra maquinaria y equipos que necesitará para la semana siguiente. El equipo de compras piensa en los pagos que tiene que hacer a proveedores. La gerencia piensa en los costos para ejecución, en el cobro de estimaciones y en la inversión necesaria.

Los proyectos con altos grados de incertidumbre o aquellos proyectos en los que el alcance no está completamente definido pueden no beneficiarse de cálculos de costos detallados por los cambios frecuentes. En su lugar, pueden utilizarse métodos de estimación simple para generar un pronóstico rápido de los costos, que luego puede ajustarse fácilmente al surgir cambios. Las estimaciones detalladas se reservan para escenarios de planificación a corto plazo.

En los casos de proyectos de alta variabilidad que también están sujetos a presupuestos estrictos, el alcance y el programa se ajustan con mayor frecuencia para permanecer dentro de las restricciones.

5.1. Planificar

El beneficio clave de este proceso es que proporciona una guía y dirección sobre cómo se administrarán los costos. El trabajo de planificar tiene lugar en las etapas iniciales del proyecto, y establece el marco de referencia para cada uno de los procesos de costos, de modo que el desempeño sea eficiente y coordinado.

5.2. Herramientas de estimación

El objetivo principal de este proceso es determinar los recursos monetarios requeridos.

Una estimación de costos consiste en una evaluación cuantitativa de los recursos necesarios para una actividad. Es una predicción basada en la información disponible en un momento determinado. Para lograr un costo óptimo para el proyecto, se debe tener en cuenta el balance entre costos y riesgos.

Se estiman los costos para todos los recursos que se van a asignar al proyecto. Estos incluyen, el personal, materiales, equipo, servicios e instalaciones.

Es conveniente revisar y adecuar las estimaciones de costos durante el desarrollo del proyecto, para reflejar la información actualizada de manera precisa. La exactitud de la estimación del costo de un proyecto aumenta conforme el proyecto avanza a través de su ciclo de vida. Un proyecto en su fase de inicio, por ejemplo, puede tener una exactitud del orden de -25% a +75%. En una etapa posterior del proyecto, conforme se cuenta con más información, el rango de exactitud de las estimaciones puede reducirse de -5% a +10%.

5.2.1. Juicio de expertos

El juicio de expertos se define como la opinión que se brinda con base en la experiencia en un área de aplicación, conocimiento, disciplina o industria. Dicho juicio puede ser proporcionado por cualquier grupo o persona con educación, conocimiento, habilidad, experiencia o capacitación especializada en la materia en cuestión.

5.2.2. Estimación análoga

La estimación análoga es una técnica para estimar la duración o el costo de una actividad utilizando datos históricos de un proyecto similar. La técnica utiliza los valores de alcance, costo, presupuesto, duración y la unidad de medida un proyecto anterior, para ponderar a los del proyecto nuevo. Esta técnica es menos costosa y requiere menos tiempo que otras, pero al mismo tiempo es menos exacta.

5.2.3. Estimación paramétrica

La estimación paramétrica es una técnica en la que se utiliza una relación estadística entre los datos históricos relevantes para calcular una estimación del costo. Con esta técnica se pueden lograr niveles superiores de exactitud, en función del nivel de detalle de los datos que utilice el modelo.

5.2.4. Estimación ascendente

Este método sirve para estimar componentes de trabajo individuales a nivel de detalle. El costo detallado individual se acumula en niveles o partidas superiores para fines de seguimiento.

5.2.5. Estimación por tres valores

Se puede mejorar la exactitud de las estimaciones de costos si se consideran la incertidumbre y el riesgo, y se utilizan los tres valores siguientes para definir un rango aproximado del costo de la actividad:

- Mas probable (cM). Se estima con base de una evaluación realista de los recursos necesarios para el trabajo requerido y de cualquier gasto previsto.
- Optimista (cO). El costo se estima con un análisis del mejor escenario para esa actividad.
- Pesimista (cP). Se refiere a un análisis del peor escenario para esa actividad.

Se puede calcular el costo esperado, cE, mediante el uso de una fórmula, en función de la distribución asumida de los valores dentro del rango de las tres estimaciones. Las fórmulas más utilizadas son las distribuciones triangular y beta. Las fórmulas son las siguientes:

- Distribución triangular. $cE = (cO + cM + cP) / 3$
- Distribución beta. $cE = (cO + 4cM + cP) / 6$

Las estimaciones de costos basadas en tres valores con una distribución determinada despejan el grado de incertidumbre y proporcionan un costo esperado.

5.2.6. Análisis de datos

Las técnicas de análisis de datos son:

- **Análisis de alternativas.** Es una técnica utilizada para evaluar las opciones identificadas a fin de seleccionar cuales utilizar para ejecutar y llevar a cabo el trabajo. Un ejemplo sería evaluar los impactos en costo, cronograma, recursos y calidad al comprar un producto, frente a la opción de producirlo.
- **Análisis de reserva.** Las estimaciones de costos incluyen reservas para contingencias para tener en cuenta la incertidumbre. Las reservas consisten en el presupuesto, que se destina a los riesgos. Pueden definirse como un porcentaje del costo estimado, como un monto fijo, o calcularse utilizando métodos cuantitativos. A medida que se dispone de información más precisa sobre el proyecto, la reserva para contingencias puede utilizarse, reducirse o eliminarse. Las reservas forman parte de la línea base de costos y de los requisitos generales de financiamiento del proyecto.

- **Costo de la calidad.** Estos costos incluyen evaluar el impacto en el costo de la inversión adicional de conformidad, frente al costo de la no conformidad. Incluye también la evaluación de reducción de costos a corto plazo frente a la implicación de problemas más frecuentes, más tarde durante el ciclo de vida del proyecto.

5.3. Determinar el presupuesto

Es el proceso que consiste en sumar los costos estimados de las actividades individuales para establecer una línea base de costos. Con la línea base de costos se puede monitorear y controlar el desempeño del proyecto.

La línea base de costos es la versión aprobada del presupuesto del proyecto. Se utiliza como base de comparación con los resultados reales. Los requisitos de financiamiento se derivan de la línea base de costos.

5.4. Controlar los costos

El control de costos es el proceso de monitorear el estado del proyecto, analizando la relación entre los fondos consumidos y el trabajo efectuado. También incluye las actividades de actualización de los costos y la gestión de los cambios a la línea base.

6. Proyectos de túneles

Los proyectos de túneles tienen origen en el momento en que se contemplan como una opción para solucionar una necesidad. Como se describió en el capítulo 3, existen diferentes tipos de túneles, que sirven para dar solución a diferentes problemas. Como puede ser un túnel para un tren de pasajeros para atravesar un cuerpo montañoso, un túnel para llevar agua desde una presa hasta la zona habitacional de una ciudad, uno para conectar dos ciudades separadas por un cuerpo de agua, una red subterránea de túneles para la red de metro de una ciudad; entre muchos otros ejemplos en los que surge la posibilidad de que un túnel sea considerado. Posterior al origen como posibilidad, vienen los estudios factibilidad; y después los de topografía, alineamiento, geología, geofísica, geohidrología y geotecnia, donde se obtiene la información necesaria para realizar el diseño del túnel. En la fase de proyecto ejecutivo se dan recomendaciones para el proceso constructivo y se obtiene el costo estimado de la construcción.

6.1. Estudios financieros

La viabilidad financiera de un túnel depende del análisis del costo de su ciclo de vida. Las normas técnicas complementaria establecen que las estructuras para edificios deben de tener una vida útil de por lo menos 50 años. El manual técnico de diseño y construcción de túneles para carretera del departamento de transporte de Estados Unidos señala que los túneles son diseñados generalmente para una vida útil de 100 a 125 años. En México existen túneles de más de 100 años que aún están en servicio, como los túneles de la calle subterránea en Guanajuato, Guanajuato, cuyo túnel más antiguo data de 1823. Otro ejemplo es el túnel Ogarrío de Real de catorce, San Luis Potosí terminado de construir el 1901.

Para saber cuál es la inversión necesaria para la construcción de un túnel y poder tomar una decisión sobre su viabilidad, todos los costos asociados deben estar expresados en términos del ciclo de vida.

Al evaluar el ciclo de vida de un túnel, se debe incluir el proyecto, la construcción, la operación y el mantenimiento, y el financiamiento. Además, se deben considerar los beneficios adicionales que brinda la ejecución del proyecto, como los ambientales, económicos, el aprovechamiento de espacios tanto subterráneos como en superficie, la resiliencia de este tipo de estructuras, entre otros.

Una evaluación financiera debe de tener en cuenta los riesgos constructivos y de operación. Estos riesgos son normalmente considerados como costos de contingencias. El monto considerado para contingencias será disminuido en la medida que el diseño del proyecto avance y los riesgos sean identificados, cuantificados y se planteen medidas para su administración.

El costo del ciclo de vida de un túnel incluye:

- Proyecto
- Construcción
- Operación
- Mantenimiento
- Financiamiento
- Beneficios adicionales del proyecto
- Riesgos en construcción y operación

6.2. Problemas ambientales y comunitarios

Durante la etapa de elaboración del proyecto ejecutivo de un túnel, el impacto de la construcción en la comunidad y en el ambiente debe ser abordado. Sus efectos en la biodiversidad de la región, en el tráfico vehicular, en los comercios, los servicios públicos, en zonas habitacionales, entre otros, deben ser considerados. El método constructivo por emplearse e incluso la factibilidad de la obra puede depender de los afectos adversos inherentes. El ruido provocado por la construcción, la disposición de los materiales resultantes de la excavación, la generación de polvo, las vibraciones y los efectos en la calidad del agua, son algunos de los factores que requieren ser evaluados para todas las etapas del proyecto.

El crecimiento demográfico en las grandes ciudades va en aumento. Según datos del Banco Mundial³ se espera que para el 2050 un 70 % de la población mundial vivirá en las ciudades. Ante este panorama, la infraestructura y servicios en las ciudades requieren un desarrollo de las mismas proporciones.

Una de las dificultades a las que se enfrentan las ciudades en su crecimiento, es la falta de espacios. Se requieren parques, escuelas, calles, estacionamientos, servicios y oficinas; el problema es que el espacio es finito. Una de las ventajas que ofrecen los túneles en este sentido, es el uso del espacio subterráneo. Los túneles permiten aprovechar el subsuelo para resolver algunas de estas necesidades y que, al mismo tiempo, el espacio en superficie pueda ser utilizado con otros fines.

Un ejemplo de esto es la construcción de un paso vehicular. Supongamos que se requiere resolver un problema de congestión vehicular en la zona centro de la ciudad. Una de las soluciones planteadas es un puente vehicular y otra es un túnel. Durante la construcción del paso vehicular, el tránsito por la zona será restringido, lo que puede traer un problema de tráfico adicional. Posterior a su construcción, el puente ocupará un espacio en superficie, que además tendrá un impacto visual y auditivo en el centro de la ciudad. Un túnel necesitará de la construcción de por lo menos una lumbrera o un portal para comenzar su

³ Desarrollo Urbano, Banco Mundial.
<https://www.bancomundial.org/es/topic/urbandevelopment/overview#1>

construcción. La zona donde se requiere la nueva vialidad podrá continuar en funcionamiento normal en superficie mientras se realizan los trabajos bajo tierra. Al terminar el túnel, el espacio en superficie sufre modificaciones únicamente en los portales de entrada y salida, además de que se resuelve el problema con el uso de un espacio subterráneo que antes estaba desperdiciado.

Evidentemente, las implicaciones para cada caso son más complejas de lo descrito en el ejemplo anterior, pero ilustra de manera general la oportunidad que ofrece el uso de los túneles para las ciudades.

La construcción necesaria para un tren de pasajeros, un ferrocarril o una carretera, incluye túneles y cortes. Los túneles presentan la ventaja de afectar en menor medida la vida en la superficie. El daño permanente será en la zona de los portales. Contrario a un corte, que eliminará todo lo que esté a lo largo del alineamiento. El impacto ambiental de ambas opciones debe ser considerado para tomar la decisión final.

En el caso de los túneles carreteros dentro de zonas urbanas, uno de sus beneficios es la disminución de la congestión vehicular dentro de las calles de la ciudad por la existencia de rutas alternativas abiertas por los túneles. Otra ventaja es la mejora en la calidad del aire, debida a que los contaminantes producto del tráfico son capturados y tratados lejos de las zonas conurbadas de la ciudad. Del mismo modo, se reduce el ruido y el uso del suelo mejora, dando oportunidades para el desarrollo de espacios en superficie a lo largo del alineamiento del túnel.

Con los túneles de drenaje se tiene la ventaja de que los residuos pasan desapercibidos por las personas en superficie, mejorando la imagen de las calles y evitando malos olores e incluso enfermedades. Otro ejemplo es la captación de aguas pluviales, en los que en algunos casos como en la ciudad de México, los túneles dan salida de la ciudad a enormes cantidades de agua, que de otro modo terminarían inundadas.

Para la instalación de servicios se tiene la opción del microtuneleo para evitar afectaciones en superficie. Además de también mejorar la imagen urbana, cuando se utilizan para reemplazar los servicios cableados en superficie por subterráneos.

Comparando el impacto que cada tipo de obra tiene, se puede decir que los túneles son más amigables con el medio ambiente en comparación con obras a cielo abierto.

6.3. Planeación operacional y financiera

Tradicionalmente recursos gubernamentales son la principal fuente de financiamiento para los túneles. Sin embargo, recientemente empresas privadas y proyectos público - privados se han vuelto fuentes más atractivas para el financiamiento.

Al desarrollar una estrategia de financiamiento, es importante considerar y asegurar el flujo de efectivo necesario para completar el proyecto. Factores como mano de obra en el área, disponibilidad de materiales, disponibilidad de mano de obra especializada, equipo especializado, y similares, deben ser considerados.

6.4. Métodos de adjudicación de proyectos

Las dos principales categorías de adjudicación de proyectos de túneles son:

- Diseño – Licitación – Construcción
- Diseño – Construcción

Los tipos de contrato de ejecución de proyectos son variados. El más común es el de precios unitarios. Otros tipos de contrato utilizados son:

- Precio fijo
- Licitación más baja con precios unitarios
- Selección basada en calidad
- Oferta final
- Costos más utilidad

El modelo tradicional de ejecución de proyectos es el de diseño, licitación y construcción. En este método el cliente financia el proyecto y se encarga de gestionar la definición del proyecto, los términos legales, aspectos comerciales, y de adquisición de tierras. Se contrata una empresa consultora bajo un contrato de servicios profesionales para actuar en nombre del cliente, encargándose de ciertos diseños, adquisiciones, supervisión de construcción, y administración de contratos. El cliente adjudica los contratos de construcción siguiendo un proceso de licitación, seleccionando usualmente la oferta más baja.

Este tipo de contrato es simple, directo y familiar para las entidades públicas. Sin embargo, en este proceso el riesgo constructivo es transmitido prácticamente en su totalidad al contratista, que usualmente utiliza factores de contingencia altos en sus precios, para cubrir el riesgo constructivo. Con este enfoque el cliente paga al contratista por asumir el riesgo, independientemente de si se presentan incidentes. Aunque este tipo de contrato tiene sus ventajas, sus deficiencias especialmente en grandes proyectos de infraestructura pueden ser importantes. Relaciones adversas entre participantes del proyecto, sobrecostos, y retrasos en el programa son usuales en estos contratos.

En un proceso de tipo diseño-construcción, el proyecto es adjudicado a una entidad que se encarga del diseño del proyecto y también construye. Los propietarios del proyecto usualmente establecen los requerimientos de licitación basados en diseños preliminares. Los tipos de contratos varían entre precio fijo, precios unitarios y costo más utilidad.

El modelo de diseño y construcción tiene la ventaja de que el diseño puede adecuarse a los medios y métodos constructivos del contratista, gracias a que se trabajan por medio de un solo contrato. El contratista seleccionado prepara la ingeniería final (usualmente con apoyo del propietario) y ejecuta la construcción.

Otra ventaja es que se reduce el tiempo para completar el proyecto, además de evitar disputas debidas durante la fase de construcción por ser la misma contratista la encargada de la ingeniería.

La distribución del riesgo entre el cliente y el contratista es un tema determinante en los métodos de contratación para obras subterráneas, tiene relación directa al monto de contingencia considerado por el contratista como parte de su oferta. Por esto es importante implementar un mecanismo de riesgo compartido que sea equitativo, y que resulte en una medida de contingencias razonable por el contratista y una suficiente reserva de recursos para que este a disposición del cliente para manejar condiciones no previstas. Por ejemplo, condiciones imprevistas debidas al cambio en las condiciones esperadas del terreno, son pagadas por el propietario del proyecto, mientras que los medios y los métodos constructivos son generalmente responsabilidad del contratista, y le corresponde a este último absorber los riesgos de su incapacidad para desempeñarse en las condiciones previstas.

Con un adecuado de contratación y una distribución equitativa del riesgo entre el contratante y el contratista, los montos de contingencias, que es parte del precio de la oferta, serán reducidos. De manera similar, la reserva de presupuesto del contratante será utilizada únicamente si condiciones no esperadas son encontradas, resultando en una disminución del costo total del proyecto.

Para proyectos de túneles, las investigaciones geotécnicas y ambientales deben ser realizadas a mayor detalle para proveer de información y lograr una mejor comprensión de los riesgos constructivos a los licitantes y al propietario. Compartir el riesgo es especialmente útil si las condiciones esperadas pueden ser definidas en cierto límite, y el cliente toma el riesgo si este límite es excedido. Ejemplos de condiciones que podrían no ser esperadas incluyen comportamiento del suelo, dureza de la roca o suelo, fallas en el terreno, niveles de freáticos; entre otros. Actualmente el geotecnical baseline report (GBR) es la herramienta utilizada para definir las condiciones esperadas del terreno. El GBR se abordará a detalle en el capítulo 8.

En el proceso de adjudicación de contratos, es importante establecer una selección en la que únicamente contratistas calificados puedan licitar en proyectos de túneles. Además, se deben utilizar contratos justos que permitan distribuir los riesgos de manera equitativa entre el cliente y el contratista, con el objetivo de tener proyectos subterráneos seguros, en tiempo, y de alta calidad, con precios competitivos.

Los métodos de contratación y términos contractuales actuales no han podido prevenir las controversias, inconformidades, y aumentos de costos en los proyectos, y es evidente que se requiere de un nuevo enfoque. Aunque en cada caso son distintas y muy variadas las causas que propician los inconvenientes, el método de contrato es una herramienta que tiene mucho peso para evitarlos. Dentro de las propuestas más vanguardistas se encuentra la de los contratos por colaboración. En estos se plantea una interacción de todo el equipo: contratista, diseñador, supervisión, y cliente, trabajando en conjunto para lograr los objetivos

finales del proyecto. En esta metodología, se establecen los objetivos del proyecto en términos de costo, calidad y tiempo, y se obtienen remuneraciones económicas al lograr los objetivos planeados. Estas remuneraciones son establecidas desde el inicio del proyecto. Otra característica planteada en este método es que el costo del proyecto sean los gastos totales más la utilidad (gastos totales + utilidad = costo total). Con esto se busca que los proyectos sean más abiertos y transparentes, que no existan secretos entre las partes involucradas. Lo que se gasta se paga, y la utilidad ya está establecida. Este tipo de contratación puede ser especialmente útil para la ejecución de las obras subterráneas, que como ya se ha mencionado, debido a su complejidad, requiere de una gran labor de trabajo en equipo para tener éxito.

El contrato es tal vez la herramienta más importante para favorecer las condiciones de trabajo en equipo con enfoque a cumplir los objetivos del proyecto. Este es un elemento clave para evitar los sobrecostos en los proyectos de infraestructura subterránea.

6.5. Análisis y gestión del riesgo

El análisis y gestión del riesgo es esencial para cualquier proyecto y en especial para los subterráneos. Un registro de riesgos debe ser establecido tan pronto como sea posible en el desarrollo del proyecto. Con este, se identificarán riesgos potenciales, la probabilidad de ocurrencia y sus consecuencias.

Un plan de gestión del riesgo debe ser establecido para tratar los riesgos, ya sea eliminándolos o reduciendo su impacto con planeación, diseño, y medidas operativas. Para riesgos que no puedan ser mitigados, se deben reducir y manejar sus consecuencias. El plan integral de gestión del riesgo debe ser regularmente actualizado para identificar todos los riesgos asociados con el diseño, construcción y operación del túnel. El plan debe incluir también los riesgos relacionados con la salud, la seguridad, la sociedad y el ambiente.

Las principales categorías de riesgo incluyen fallas de construcción, impacto social, retrasos del programa, problemas ambientales, fallas en la operación y mantenimiento, desafíos tecnológicos, condiciones geotécnicas imprevistas, y de aumento de costos.

6.6. Programa y costos de ejecución

Realizar una programación realista y un costo estimado para todas las fases de un proyecto es de suma importancia. Es crítico entender la relación entre las actividades y los recursos necesarios, así como las necesidades e intereses de todos los involucrados en la planeación, diseño, construcción, pruebas y puesta en operación. Esto permite que el proyecto avance de manera ordenada y predecible, beneficiando a todos los involucrados.

Los factores de costo se pueden agrupar en físicos, económicos, y políticos. Dentro de los físicos, el elemento más importante es el subsuelo y sus condiciones específicas. En los económicos están el costo de la mano de obra, materiales, disposición del material producto de excavación, fianzas y seguros.

Conforme el proyecto se desarrolla, se tiene más información y se conocen las restricciones, el programa debe ser reevaluado y actualizado para reflejar esta nueva información.

El tiempo realista necesario para completar todas las actividades del proyecto debe ser reflejado finalmente en la programación. No tiene sentido perjudicar el proceso con expectativas irreales en el programa; este tipo de consideraciones incorrectas crean problemas como retrasos, reclamos y sobrecostos.

Los programas poco realistas, en ocasiones son resultado de condiciones externas, como el deseo de completar el proyecto en una fecha anticipada por un compromiso político. Estas amenazas externas tienen que ser reconocidas y abordadas caso por caso. Desde la perspectiva del programa de obra, se deben de seguir planes realistas bajo las restricciones de costo, tiempo y calidad, y aceptando que la prioridad de alguna actividad repercute en otra.

Los interesados en el proyecto usarán como línea de comparación los costos y fechas de programación que se les presenten inicialmente, y esa será la base para medir el progreso del proyecto. Si estos costos y programaciones son razonables y respaldadas por profesionales con experiencia y datos, facilita el desarrollo del proyecto.

Cada una de las actividades del proyecto en su totalidad son utilizados para calcular el costo total. En las primeras etapas del proyecto, los costos pueden ser basados en datos históricos de proyectos de tipo, tamaño y condiciones geológicas similares. Estas aproximaciones son útiles para obtener un costo inicial, pero no deben ser utilizados como una estimación de costos real.

El programa también es utilizado como base para determinar los costos. La mano de obra representa aproximadamente el 30% del costo total de un túnel, así que una imagen precisa del tiempo que se utilizará es importante para los recursos que el cliente, el contratista y el público tendrán que pagar eventualmente.

Existen diferentes niveles de estimación de costos. En las primeras fases de un proyecto de un túnel, una estimación rápida puede realizarse con métodos de precios unitarios, como una estadística de precio por metro de túnel en condiciones de terreno similares. Sin embargo, no debe olvidarse que una vez que una cantidad es presentada como parte del proyecto, incluso en una fase inicial, establece expectativas. Cuanto antes se involucre en el proyecto un programador y estimador experimentado en construcción de túneles, se tendrán programas y estimaciones de costos más precisas.

7. Ciclo de vida de un túnel

7.1. Estudio de factibilidad

La etapa inicial de un proyecto de un túnel involucra la implementación de un estudio de factibilidad, que se compone de la investigación del sitio, planos preliminares, y una estimación de costos aproximada.

La investigación del sitio es especialmente importante en proyectos de túneles. En esta se realizan análisis geológicos para determinar cuáles son los tipos y características del suelo y la roca del terreno, además de identificar zonas de riesgos como fallas, niveles freáticos, servicios subterráneos existentes; entre otros. Mientras más información se tenga con relación a los aspectos geológicos, mayor será la probabilidad de evitar retrasos y se podrán obtener estimaciones de costos más precisas, ya que los riesgos pueden ser considerados desde el principio. Durante esta etapa un diseño preliminar es utilizado y generalmente es equivalente a un veinte por ciento del proyecto completo. En esta fase también se comienzan a abordar temas de especial atención, como pueden ser zonas puntuales con características geotécnicas distintas, restricciones sociales que limiten los procedimientos constructivos, etcétera; y también permite realizar una estimación aproximada de costos que es de ayuda para planear y asegurar el financiamiento del proyecto.

7.2. Planeación y diseño

Es en este paso que las regulaciones de seguridad, salud y ambientales, los permisos, y los gastos generales comienzan a ser considerados en el diseño y el presupuesto; como se abordó a detalle en los anteriores capítulos 4, 5 y 6.

El diseño avanza de esquemático (50% completado), a un diseño detallado (60-80%) y por último a un diseño final para construcción (100% completado). Dependiendo de la preferencia del cliente y el tipo de contrato, el contratista generalmente se involucrará en el proceso de diseño antes de que los planos estén emitidos para construcción. El propietario del proyecto generalmente prepara la licitación para construcción en la mitad del proceso de diseño, abiertas a todo el público o cerradas a un grupo selecto de empresas contratistas. Estos contratistas tendrán un tiempo estimado para realizar sus ofertas que son en esencia representaciones de cuánto les costará construir el túnel y el tiempo en el que lo terminarán, mostrado en un programa de obra. El proyecto requiere de suficiente detalle para conseguir una planeación exitosa, pero en contra parte si es demasiado específico puede requerir demasiado tiempo en su elaboración y volverse muy costoso.

7.3. Construcción

Cada túnel tendrá diferentes requerimientos de materiales y procesos constructivos dependiendo de su uso final y las características del terreno encontrado en su alineamiento. La construcción requerirá volúmenes de materiales variables que dependen de la longitud y el tamaño de la estructura propuesta. El tipo de terreno influye en el revestimiento y el sostenimiento que el túnel necesitará durante y después de la excavación.

La construcción tradicional de túneles consiste en la de excavación de un portal de acceso, la operación iterativa de excavación de una sección de túnel a una longitud definida, la colocación del sistema de sostenimiento y posteriormente el revestimiento final, la excavación de un portal de salida y la instalación de los sistemas de operación y señalización.

La longitud de excavación posible por avance depende de las características del terreno y principalmente del auto sostenimiento que dará la pauta para la instalación de sistema de sostenimiento. Materiales de mala calidad requieren de la instalación de un sistema de sostenimiento o un mejoramiento del terreno previo a la excavación, y rocas y suelos duros de buena calidad brindan auto sostenimiento suficiente para permitir la excavación de una sección sin sostenimiento previo.

De manera general, existen dos métodos de excavación de túneles; el método convencional, que incluye perforación y voladura y mediante equipos mecánicos convencionales, y el mecanizado con tuneladora.

El método convencional mediante equipos mecánicos de ataque puntual consiste en la excavación por medio de maquinaria como excavadoras, retroexcavadoras, rozadoras o martillos hidráulicos. El método convencional con perforación y voladura consiste en la excavación mediante el uso de explosivos. Y el método mecanizado es el que utiliza maquinas tuneladoras llamadas TBM por las siglas en inglés (tunnel boring machine).

Tres métodos adicionales de construcción de túneles son los de túneles falsos, túneles sumergidos y los túneles flotantes, cuyo método constructivo es muy distinto al método convencional y al mecanizado. En los túneles falsos, puede haber dos casos, que se realice una excavación a cielo abierto o que se construya el túnel sobre un área a cielo abierto que no requiere excavación. En ambos casos se construye el túnel y posteriormente se rellena. Para los túneles flotantes, se excava el lecho marino para posteriormente colocar y ensamblar las piezas prefabricadas, y se finaliza con el relleno en la parte superior. Los túneles flotantes son estructuras que se colocan en un cuerpo de agua aprovechando el efecto de la flotación y se anclan a la superficie en los extremos en tierra firme.

La elección de algún método de construcción de un túnel depende del principalmente del tipo y calidad de terreno a excavar o en el que se colocará la

estructura, y de su longitud. El método convencional con equipo mecánico deja de ser conveniente en terrenos con rocas abrasivas y duras, que desgastan las herramientas de corte a cambio de poco avance en la excavación. En esos casos el método convencional de perforación y voladura es una mejor opción. Las voladuras deben de ser diseñadas para las características de la roca para evitar sobre excavaciones que encarezcan la construcción del túnel. Para que la opción de excavación con tuneladora sea viable se requiere de una longitud de túnel superior a un kilómetro, para que sea posible amortizar el costo de una tuneladora.

Cada método tiene ventajas y desventajas, por lo que es necesario realizar un análisis para valorar la mejor opción para cada proyecto en particular.

7.3.1. Método convencional.

7.3.1.1. Perforación y voladura

El sistema de perforación y voladura es una técnica que cada vez se utiliza con mayor regularidad debido a las ventajas que presentan sus rendimientos altos.

Dentro de los inconvenientes de excavar con explosivos es que los perfiles de excavación resultantes son irregulares y si no se diseñan y controlan adecuadamente las voladuras, se pueden producir sobre excavaciones considerables que repercuten directamente en el costo de la obra.

Las fases del ciclo de trabajo de las excavaciones con explosivos son las siguientes:

1. Replanteo en el frente del esquema de tiro
2. Perforación de barrenos
3. Carga de barrenos con explosivos
4. Voladura y ventilación
5. Retiro del escombros o rezaga y saneo del frente de excavación.

El esquema de tiro es la distribución en el frente del túnel de los taladros que se van a perforar, la carga de explosivo que se va a colocar en cada uno y el orden en que se va a hacer detonar cada barreno, diseñándose al principio de la obra con base a la experiencia y a reglas empíricas. Posteriormente, conforme avanza la excavación del túnel, se va ajustando en función de los resultados obtenidos en las voladuras previas.

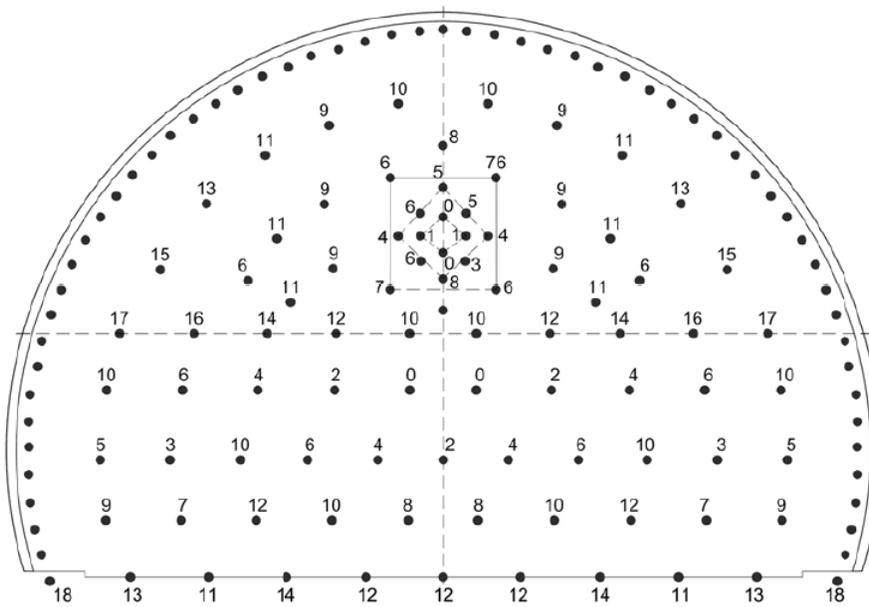


Ilustración 3. Esquema de tiro para voladura. Imagen: Manual de diseño y construcción de túneles de carretera, SCT, 2016.

Los barrenos deben de tener una longitud entre un 5 y 10 % superior a la distancia que se quiera avanzar con la explosión, ya que siempre se producen perdidas que impiden el aprovechamiento de su longitud total. Las longitudes típicas están comprendidas entre 1 y 4 m, y se fijan en función de la calidad de la roca. Entre mejor es la roca, mayor podrá ser el avance.

Para la perforación y la voladura, se divide la sección del túnel en zonas en las que la densidad de perforación, las cargas de explosivo y la secuencia de encendido son distintas.

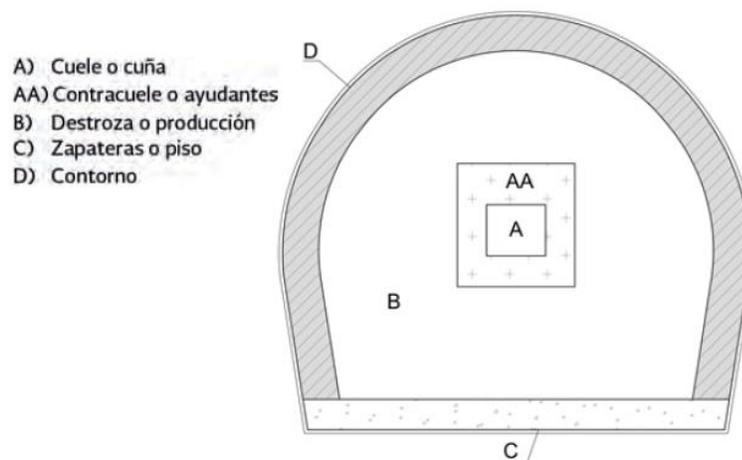


Ilustración 4. Zonas de una sección de voladura. Imagen: Manual de diseño y construcción de túneles de carretera, SCT, 2016.

- *Cuña.* Fase de la voladura que se dispara primero. Su finalidad es crear una primera abertura en la roca que ofrezca al resto de las fases una superficie libre hacia la que pueda escapar la roca con lo cual se hace posible y facilita su arranque. La cuña es la parte más importante de la voladura en relación con el avance.
- *Destroza.* La destroza es la parte central y más amplia de la voladura cuya eficacia depende fundamentalmente del éxito de la zona de la cuña que es la zona crítica de la voladura.
- *Zapateras.* La zapatera es la zona de la voladura situada en la base del frente, a ras del suelo. Comúnmente los barrenos de las zapateras son los que más carga explosiva contienen ya que aparte de romper la roca deben de levantarla hacia arriba.
- *Contorno.* Los taladros perimetrales o de contorno son importantes porque de ellos dependerá la forma de la excavación resultante. Lo ideal es que la forma real del perímetro del túnel sea lo más parecida posible a la teórica.

La voladura de un túnel es una de las actividades más difíciles debido a que la única cara libre es la cara transversal del túnel. Debido al gran confinamiento del frente, los bordos y espaciamientos entre los barrenos requieren factores explosivos más altos que van del orden de 1.2 a 3.5 kg/m³ en la zona de la cuña.

Si se realiza la perforación con un jumbo, esta actividad puede estar apoyada utilizando brocas de mayor diámetro, con el objetivo de crear un área de mayor alivio al momento del disparo, que permita un desalojo eficaz y rápido del material quebrado producto de los barrenos cargados y no cargados que forman la cuña, y puede lograr una eficiencia del orden de 95 % de avance.

Para la cuña se debe de considerar que su ubicación será en un lugar plano del frente y evitar perforarla en la misma área donde se ubicó en la voladura anterior. Después de perforar la cuña, se perforan los barrenos de producción, paredes, clave y piso considerando las siguientes reglas básicas:

- Paralelismo en la barrenación.
- Formación de un plano vertical imaginario al fondo de la barrenación.
- Un orden de encendido de los barrenos que vaya agrandando secuencialmente la apertura del frente.

Los barrenos de producción se irán perforando de manera rotativa y secuencial, aumentando su bordo según se vaya diseñando el número de cuadros calculados para completar la plantilla de todo el frente.

Lo siguiente es perforar los barrenos perimetrales o de contorno, ubicándolos en los límites de la excavación del túnel y se detonan después de los barrenos de producción. En esta sección, los barrenos se perforan más cerca unos de otros y

se cargan más ligeros para minimizar el sobre rompimiento o daños a la roca restante del perímetro de la obra.

Normalmente los últimos barrenos en ser detonados son los del piso, con el objetivo de retirar la rezaga del frente del túnel.

Después de que se perforan todos los barrenos, deberá limpiarse cada uno de ellos con agua y aire antes de cargarlos.

Es indispensable apoyarse de un atacador o un fainero para proceder a realizar la actividad de carga de los barrenos, este deberá ser lo suficientemente largo para poder alcanzar el fondo de los barrenos, siendo este de madera o en su caso con la misma manguera antiestática de la olla de presión que se utilizara para inyectar el ANFO a los barrenos, esto también nos indicará que el barreno está libre de obstáculos antes de empezar a cargar.

Siempre se introducirá en el barreno primeramente el cartucho cebo con la punta el iniciador apuntando hacia la boca del barreno, debiendo empujarse hasta el fondo del barreno, nunca se debe atacar el cartucho cebado.

Durante el cargado de barrenos, el tubo de choque deberá sujetarse de forma tirante para evitar daños provocados por el atacador o la manguera de inyección del ANFO.

Es importante aplicar una presión de aire de entre 70 y 100 libras para que el ANFO quede lo suficientemente confinado dentro del barreno, que de lo contrario no realizará su función de poder generar los suficientes gases para romper y desplazar la roca.

Terminado el procedimiento de cargado de los barrenos, se procederá al amarre o conexión a la línea troncal del cordón detonante o eléctrico a una distancia más corta posible de la boca del barreno. De esta manera se obtendrá un ángulo de 90° recomendado entre el tubo de choque del iniciador y la línea troncal.

Es importante formar un círculo cerrado con la línea troncal al utilizar los iniciadores no eléctricos. Esto es para obtener mayor seguridad en su encendido, ya que así se proveen dos rutas de iniciación para cada iniciador.

Habiendo realizado las conexiones, se procederá a aplicar el protocolo de seguridad para el disparo de la voladura, iniciando con esto, una última revisión de la conexión para asegurar que todo está listo para su disparo. Se procede al disparo.

Ya ejecutado el disparo se procede a la inspección del resultado de la voladura, con el objetivo de ubicar la presencia de material explosivo “no detonado”. Concluido esto se procede a realizar el rezagado o desalojo del material excavado.

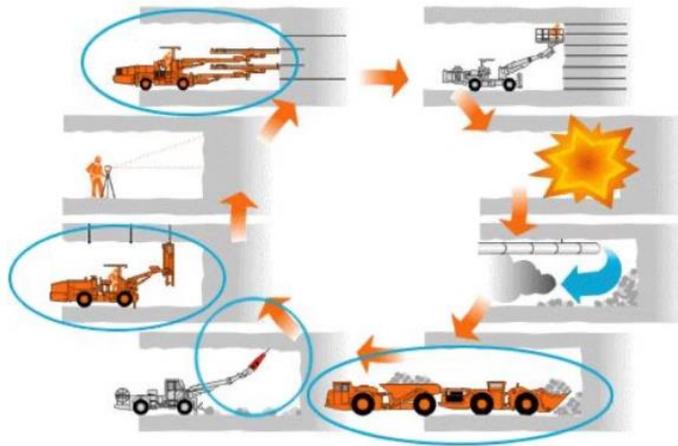


Ilustración 5. Ciclo de trabajo de excavación por voladura. Imagen: <https://blog.structuralia.com/metodos-de-excavacion-de-tuneles-perforacion-y-voladura>

7.3.1.2. Excavación mecánica mediante máquinas de ataque puntual.

La excavación convencional mecánica se refiere al uso de equipos de perforación como excavadoras y retroexcavadoras, martillos hidráulicos, rozadoras, máquinas de precorte y equipo de rezaga con cargadores frontales y camiones de volteo. Estas herramientas son una opción amplia y eficiente, empleada cuando no se requiere o se tiene una limitante para el uso de explosivos. En las situaciones en las que se esperen diferentes tipos de suelo o rocas con diferentes resistencias, se tiene la posibilidad de utilizar equipos de diferentes características a costo relativamente bajo, a diferencia de una tuneladora diseñada para características particulares o de la voladura que se limitará para el uso en rocas. La opción de excavación por este método puede ser más económica que la de voladura y la mecanizada, cuando las condiciones del sitio permiten que sea viable.



Ilustración 6. Excavación empleando equipo mecánico. Imagen: Adif finaliza la excavación de los 2.468 metros del túnel de Requejo, Tribuna Zamora, <https://www.tribunazamora.com/noticias/adif-finaliza-la-excavacion-de-los-2-dot-468-metros-del-tunel-de-requejo.html>

El método no es recomendado para rocas de alta dureza y abrasividad, en donde los martillos neumáticos y rozadoras logran rendimientos bajos e incluso nulos. De igual forma en zonas de materiales blandos que no tengan autosoporte, como arenas, se requiere utilizar otro método.

Algunos equipos para realizar excavación convencional son los siguientes:

- **Martillos hidráulicos pesados.**

Los martillos hidráulicos son herramientas de amplio uso en diferentes ramas de la construcción, siendo su función principal la de demolición y excavación. Los martillos hidráulicos se adaptan a los brazos de retroexcavadoras y excavadoras, que por medio del sistema hidráulico de la maquina se transmite energía de impacto hacia la punta. En excavaciones en roca, los martillos golpean puntualmente la roca generando su fractura y el desprendimiento de bloques.

Los martillos suelen usarse en las excavaciones de macizos rocosos con alta dureza y que presentan fracturas.



<https://procedimientosconstruccion.blogs.upv.es/2013/07/17/excavacion-de-tuneles-con-excavadoras-y-martillos-hidraulicos-pesados/>

- **Rozadoras.**

Las rozadoras son equipos similares a las excavadoras, se desplazan por medio de orugas y tienen un brazo mecánico que tiene en la punta una o un par cabezas giratorias. La cabeza giratoria tiene distribuidos en toda su área herramientas de corte conocidos como dientes que ejercen fricción sobre el terreno y al momento de que la cabeza gira cortan la superficie de contacto. El brazo mueve la cabeza sobre el frente de excavación para realizar el corte en toda la superficie.

Las rozadoras son útiles para suelos de dureza media y alta y rocas con dureza media.

Las rozadoras tienen dos sistemas de corte: el milling y el ripping. En el sistema milling el corte se realiza girando la cabeza del brazo mecánico en sentido paralelo al frente del túnel. Los dientes en la punta estas cabezas de corte son más numerosos que en el resto de la cabeza para lograr la penetración sobre el terreno ejerciendo más fricción y aprovechando la rotación. La ilustración 9 muestra un ejemplo de cabeza tipo milling. El sistema ripping consiste en un brazo con dos cabezas que giran respecto a un eje paralelo al alineamiento del túnel.



Cabeza de corte tipo milling.

Cabeza de corte tipo ripping.

Ilustración 8. Manual de diseño y construcción de túneles de carretera, SCT, 2016

Ambos sistemas proporcionan resultados similares por lo que no se puede considerar que uno es mejor que otro.

La excavación con rozadoras ofrece varias ventajas entre las que destacan:

- Las secciones de excavación pueden subdividirse y trabajarse en fases.
- Permite un perfilado de la sección prácticamente sin sobre excavación y trabajo con un frente limpio y accesible.
- No genera vibraciones mayores.
- El empleo de las rozadoras puede ser en lo general en terrenos de resistencia media blanda y en rocas fracturadas de calidad media a baja.



Ilustración 9. Cabeza de rozadora utilizada en las obras de ampliación de la línea 12 del metro CDMX.



Ilustración 10. Máquinas de precorte. Imagen: Lunardi, 2008.

- **Máquinas de *precorte*.**

El precorte mecánico es un método en el que se realiza la estabilización del terreno previo a su excavación. Comenzó a utilizarse en Europa en 1970. Consiste en realizar un corte en perímetro del túnel al frente de la excavación, generando una abertura que después es rellena con una mezcla cementicia. El corte se efectúa con una máquina que cuenta con una sierra como la mostrada en la ilustración 11. La ranura que se genera con el corte tiene un espesor de entre 18 y 25 cm y una profundidad de alrededor de 3.5 m. Posterior al corte se rellena la abertura con concreto o mortero alta resistencia y fraguado rápido en todo el perímetro, obteniendo así una bóveda estable. Lo siguiente es completar el resto de la excavación del material que queda por debajo la bóveda. En caso de ser necesario se refuerza el sistema con marcos metálicos o anclajes. Esto funciona como un sistema de sostenimiento previo a la excavación de la sección del túnel. Este método es recomendado para rocas blandas y suelos.

Se ha empleado en la ejecución de túneles en entornos urbanos o semiurbanos, en los que se tengan restricciones de deformaciones en la superficie. Con este procedimiento se produce un confinamiento previo del frente de excavación, con ventajas importantes para la estabilización del frente.

7.3.2. Excavación mecanizada con TBM

Las máquinas tuneladoras o TBM por sus siglas en inglés (Tunnel Boring Machine), son máquinas integrales de construcción de túneles. Son capaces de excavar roca o suelos, retirar el escombros y aplicar el revestimiento del túnel. Las tuneladoras cuentan con las herramientas de corte al frente de la máquina, distribuidas sobre un escudo que hace presión sobre la superficie y después gira, logrando el corte del material. El producto de la excavación o rezaga es transportado desde el frente hasta la zona trasera de la tuneladora, desde donde es transportada hacia la superficie con otras maquinarias. Posterior a la excavación de una sección longitudinal predefinida en el proyecto, se procede a la instalación del sistema de sostenimiento y revestimiento del túnel. Este puede ser con concreto lanzado, marcos metálicos, dovelas prefabricadas. Generalmente para tuneladoras modernas el sistema que se utiliza es el de dovelas. Las dovelas se colocan en todo el diámetro del túnel y posteriormente se sella el espacio que queda entre la dovela y el terreno con un material cementicio fluido. Los ciclos de avances se repiten dejando un túnel terminado con sostenimiento y revestimiento definitivo mientras avanza.

Las tuneladoras son máquinas que se construyen para condiciones geotécnicas específicas. Las campañas de exploración y los estudios previos sirven para conocer las características del terreno por excavar y con esa información se elige el tipo de tuneladora y se le instalan las herramientas para condiciones particulares, como pueden ser herramientas de corte para un terreno plástico, un escudo que pueda contrarrestar la presión del nivel freático, por mencionar algunos ejemplos.

El costo de las máquinas tuneladoras es una de limitante para la aplicación de este método. Para justificar su adquisición se requieren de túneles mayores a un kilómetro. Otro punto en contra es que las tuneladoras únicamente excavan secciones circulares. La exploración del sitio y el estudio geotécnico será necesario para poder construir la tuneladora, de estos estudios dependerá los aditamentos con los que contará la máquina. Un estudio no representativo de las condiciones complicará la excavación. Las tuneladoras no son máquinas que excavan todos los terrenos, son diseñadas para características particulares.

Para que la construcción con este método sea viable:

1. El túnel debe contar con la longitud suficiente para que sea posible amortizar el costo de la tuneladora y los indirectos que se requieren para su operación;
2. La exploración de sitio y el diseño geotécnico deber ser suficientemente exhaustivo para proveer de la información necesaria para la fabricación de la tuneladora.

- ***TBM abierta para roca dura.***

La tuneladora para roca dura, conocida como Topo, es una máquina abierta (no protegida totalmente) formada por una viga principal y zapatas de apoyo laterales. Logra su avance al excavar la roca del frente por medio de sus herramientas de corte mecánico, con las que se aplican los esfuerzos combinados del par de giro de su cabeza y del empuje longitudinal conseguido por reacción contra la roca de unas zapatas extensibles, también llamados “grippers”, con las que se fija la parte estática de la máquina. La roca triturada por los discos de corte en el frente se transporta hacia la parte trasera de la tuneladora por medio de una banda transportadora integrada en la viga principal. Los sistemas de sostenimiento necesarios como concreto lanzado, anclas o marcos metálicos se instalan posterior al corte en la parte trasera de la cabeza, de fácil acceso debido al diseño abierto. Este tipo de tuneladoras es especialmente útil para terrenos competentes hasta ligeramente fracturados⁴.



Ilustración 11. Excavación con tuneladora abierta. Foto: The Robbins Company.

<https://www.therobbinscompany.com/es/neustros-productos/tunnel-boring-machines/main-beam/>

⁴ Robbins, Main beam TBM (<https://www.robbinstbm.com/es/neustros-productos/tunnel-boring-machines/main-beam/>)

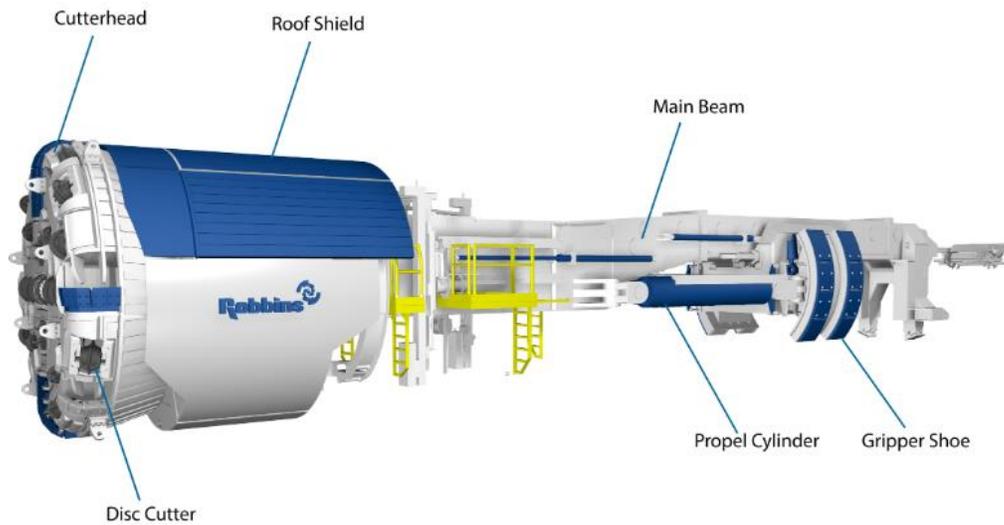


Ilustración 12. Tuneladora abierta. Imagen: The Robbins Company.

- **TBM escudo simple.**

La tuneladora de escudo simple tiene un escudo de frontal de corte muy similar a la tuneladora abierta, con la misma capacidad de perforación, pero con la diferencia de contar con un escudo de protección diseñado para terrenos con roca fracturada, en donde puede haber desprendimientos. El escudo cuenta con la longitud suficiente para brindar protección en la zona que no cuenta aún con el revestimiento. Al frente del escudo la roca es fracturada y se desprende en forma de lascas. Se transporta desde el frente hacia atrás de la tuneladora por medio de bandas transportadoras. El empuje necesario para lograr el avance se obtiene del empuje que ejercen los cilindros hidráulicos sobre el revestimiento instalado. La tuneladora cuenta con un brazo mecánico de colocación de dovelas, que al terminar un ciclo de excavación entra en operación después de que los cilindros hidráulicos se contraen. Al terminar la instalación del revestimiento, los cilindros hidráulicos ejercen empuje sobre las dovelas y se inicia el ciclo de excavación.

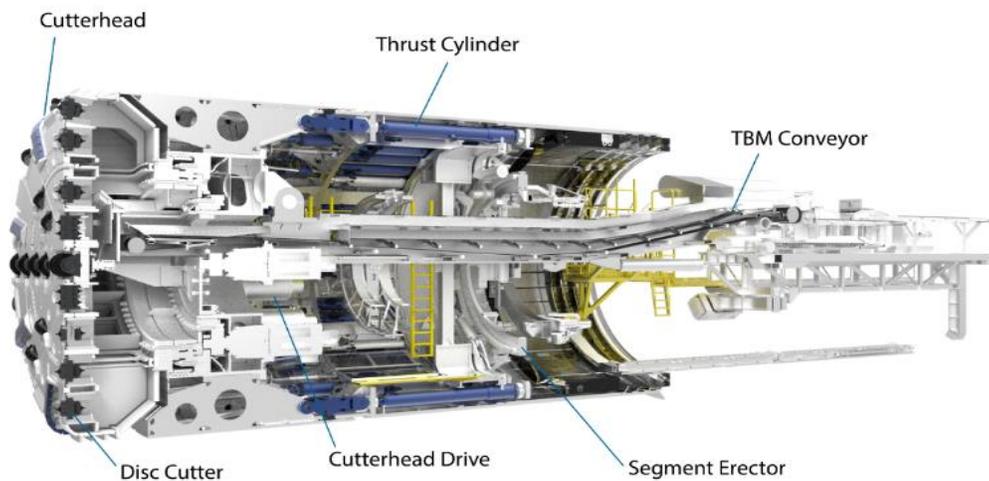


Ilustración 13. Tuneladora escudo sencillo. Imagen: The Robbins Company, <https://www.therobbinscompany.com/products/tunnel-boring-machines/single-shield/single-shield-detail/>

- **TMB Escudo doble.**

Las tuneladoras de escudo doble son utilizadas para túneles de grandes longitudes en zonas de roca fracturada. Tienen la ventaja de poder excavar el frente y colocar revestimiento al mismo tiempo. La máquina cuenta realmente con 3 escudos, el escudo frontal, un escudo telescópico de diámetro menor que sirve para proteger el interior de la tuneladora durante el avance, y el escudo trasero. Tiene dos modos de operación, el primero en la que se apoya sobre el terreno con las zapatas integradas al escudo como soporte para el empuje y el segundo en el que se utiliza el sistema de cilindros hidráulicos sobre las dovelas instaladas. La ventaja de primer modo de operación es que se puede avanzar y colocar revestimiento al mismo tiempo. En zonas del túnel donde no sea posible aplicar el empuje sobre el terreno se utiliza el empuje sobre dovelas.

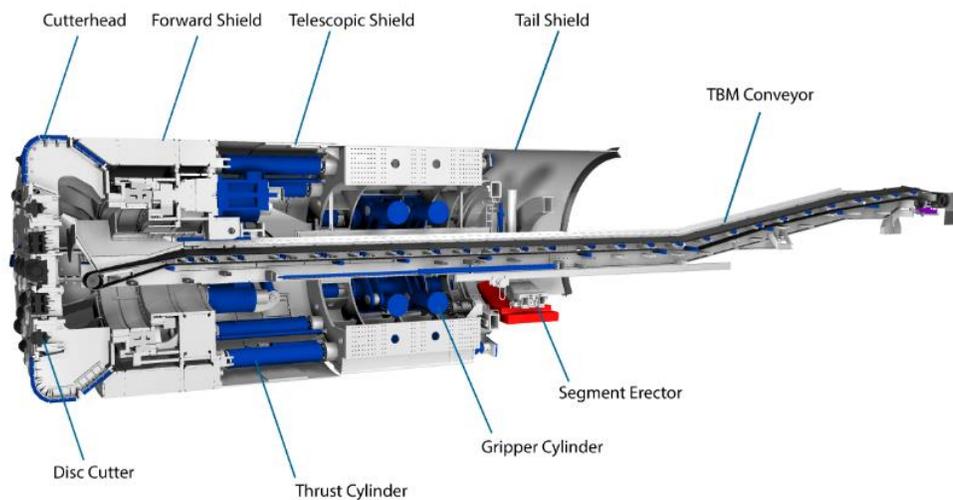


Ilustración 14. Tuneladora de escudo doble. Foto: The Robbins company.
<https://www.therobbinscompany.com/products/tunnel-boring-machines/double-shield/double-shield-detail/>

- **EPB para suelos blandos.**

Las tuneladoras de equilibrio de la presión de terreno o EPB por sus siglas en inglés, son usadas en terrenos de suelos blandos, suelos con boleos o con rocas meteorizadas. Siendo especialmente útiles en terrenos con suelo blandos por debajo del nivel freático y para zonas urbanas donde se deban evitar los asentamientos en superficie.

El escudo al frente está equipado con picas y rascadores para suelos, además se pueden equipar con discos de corte para boleos y rocas cuando se prevé que se encontrarán. Dependiendo de las condiciones del terreno, se pueden agregar aditivos al frente, para mejorar la estabilidad y disminuir la probabilidad de un colapso. Los aditivos pueden ser polímeros, bentonita o espumas.

Durante la excavación material de rezaga ingresa del frente del escudo de excavación al interior, a una cámara de mezclado. Dentro de la cámara el material producto de excavación se presuriza para sostener el frente de excavación. La máquina cuenta con un tornillo transportador que sirve para equilibrar la presión y transportar la rezaga hacia adentro de la tuneladora. La estabilidad del frente del túnel y los asentamientos en superficie se controlan mediante el seguimiento y ajuste de la presión en el interior de la cabeza de corte hasta lograr el equilibrio con la presión a la que está sometida.

La profundidad del túnel, las características del suelo y nivel freático encima del túnel determinan la presión del terreno. Para excavaciones en zonas de presión alta se pueden instalar dos tornillos transportadores en las tuneladoras, para disipar la presión de manera suave. La diferencia de presión entre la cámara mezcladora y el tornillo transportador, dirige la rezaga hacia el tornillo, reduciendo paulatinamente la presión de la rezaga hasta alcanzar la presión atmosférica a medida que avanza por el tornillo transportador.

El operador de la tuneladora puede controlar la presión del frente. Para aumentar la presión, se puede incrementar el ritmo de avance o reducir la rotación del tornillo transportador, y para disminuir la presión se hace lo opuesto, se reduce la velocidad de avance o se aumenta la rotación del tornillo transportador.

La zona de trabajo al interior de la tuneladora queda completamente aislada de la presión hidrostática, debido a que cuenta con un escudo articulado, con resistencia de hasta 10 bares.

Durante la excavación, cilindros hidráulicos ejercen presión sobre las dovelas previamente instaladas para empujar la máquina hacia delante. Después de cada avance los cilindros se retraen y se instala otro segmento de túnel de dovelas prefabricadas. Posterior a la instalación de las dovelas, se inicia el ciclo de excavación.

Los anillos de dovelas tienen una separación con respecto al escudo del túnel. Para asegurar la estabilidad del suelo y evitar asentamiento, esta separación es rellenada por medio de líquidos que se inyectan en varios puntos del perímetro del túnel y que endurecen rápidamente. Para la inyección se utilizan bombas de baja presión para evitar perturbaciones al terreno.

Cuando se necesita entrar a la cabeza de corte para inspeccionar o cambiar herramientas se utiliza un sistema de esclusas y el frente se estabiliza con aire comprimido.

En la Ciudad de México para la construcción del túnel emisor oriente o TEO se utilizaron 6 máquinas tuneladoras tipo EPB para excavar un total de 62 kilómetros. El TEO el túnel de drenaje más largo del mundo.

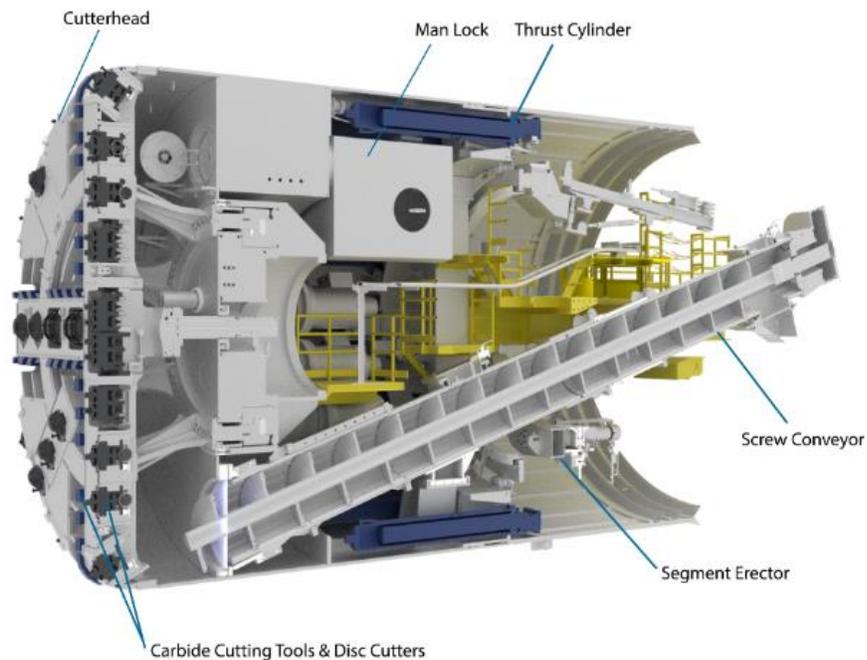


Ilustración 15. Tuneladora EPB. Imagen: The Robbins company. <https://www.therobbinscompany.com/products/tunnel-boring-machines/earth-pressure-balance/epb-tbm-detail/>

7.3.3. Túneles Inmersos

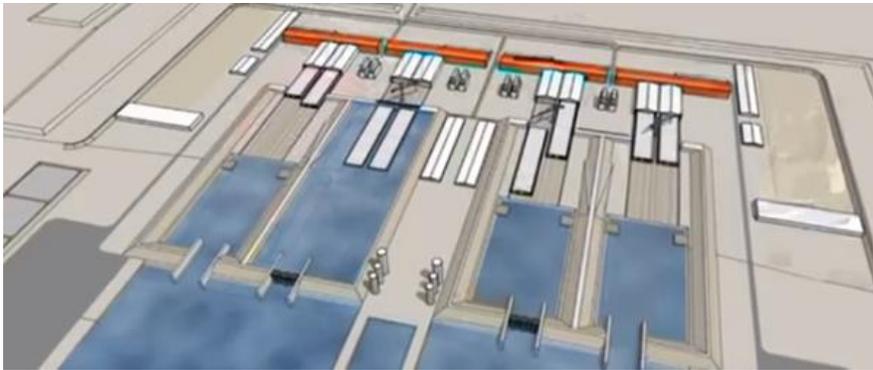
Las rutas internacionales de transporte en ocasiones tienen la limitante de cruces de estrechos marinos, estuarios y ríos navegables. Las opciones de infraestructura más usadas para conectar estos cuerpos de agua son puentes y túneles excavados. Una opción diferente que puede ser más económica y competitiva es el túnel inmerso, especialmente útil cuando hay que atravesar una ruta navegable en un ambiente urbano o cuando el tránsito de las embarcaciones en puertos exige un gran galibo.⁵ Los túneles inmersos, también llamados sumergidos, consisten en largos elementos de concreto o elementos de acero, fabricados en superficie y posteriormente remolcados y sumergidos a su posición final. Se han construido más de 150 túneles sumergidos en el mundo, en su mayoría para uso de carreteras y de ferrocarril.

La construcción de un túnel sumergido comienza con la excavación del lecho marino. La excavación se realiza mediante maquinaria de dragado a lo largo del alineamiento. La zanja por excavar dependerá de las dimensiones de las piezas del túnel y del relleno diseñado. En el fondo de la excavación se colocan una cama de grava o arena, que hace las funciones de plantilla para recibir las piezas del túnel. El material producto de la excavación puede ser utilizado como material

⁵ U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2009).

para la construcción de superficies artificiales. En este tipo de proyectos la excavación del fondo del cuerpo de agua es un tema sensible. Se requiere un estudio detallado de las afectaciones al ecosistema marino, minimizar los daños y reestablecer las condiciones del entorno al terminar la construcción.

La fabricación de los elementos de concreto es el paso siguiente. Son construidos en plataformas o diques secos, con salida al mar, para facilitar su posterior transporte dentro del cuerpo de agua. Los elementos son fabricados de tamaño y peso estándar, según el diseño del proyecto, tomando las consideraciones para poder transportar y hundir las piezas en su posición final bajo el lecho marino. Al terminar el proceso de colado de un elemento, se le instalan sellos impermeables, elementos de unión y mamparos en sus extremos, que servirán para mantener el interior de la pieza seca durante su traslado.



*Ilustración 16. Zona de fabricación de piezas de concreto para un túnel sumergido.
Fehmarnbelt fixed link, youtube.com/watch?v=9f25lzsqa6I*

Los elementos prefabricados se transportan flotando en el cuerpo de agua con ayuda de barcos que remolcan la pieza por medio de cables. Al llegar al punto de localización de la pieza, se procede a hundirla bajo el mar llenado de agua los tanques lastres en su interior. El elemento prefabricado se coloca sobre la zanja, y se une a la pieza anterior previamente instalada. Cuando las piezas continas del túnel han sido colocadas y unidas, se procede a retirar los mamparos y a rellenar con material la zanja para cubrir la estructura.

Deben considerarse también la construcción de los portales en los extremos de túnel, y asegurar una suave transición entre la superficie y el fondo marino.



Ilustración 17. Transporte de elementos prefabricados; de Trelleborg - How to build an immersed tunnel

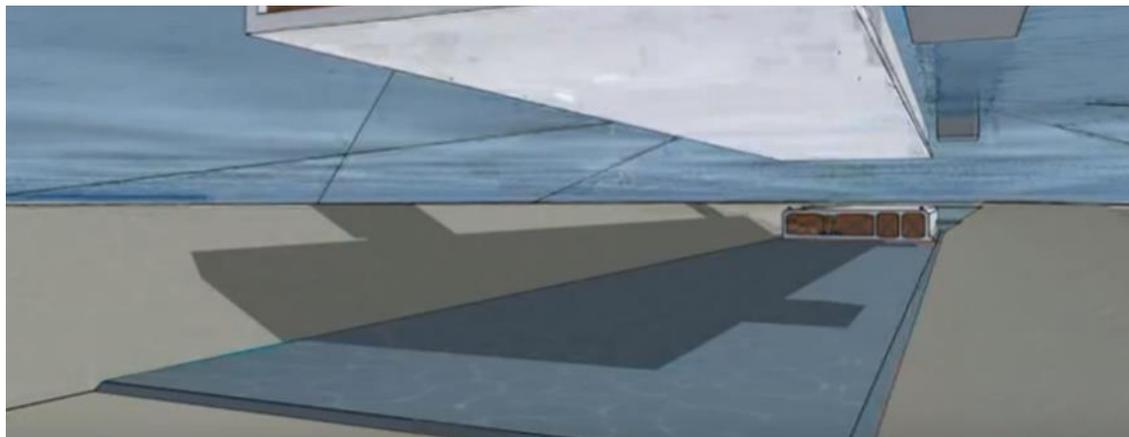


Ilustración 18. Cama de grava o arena previamente colocada para recibir la sección. Fehmarnbelt fixed link, [youtube.com/watch?v=9f25lzsqa6I](https://www.youtube.com/watch?v=9f25lzsqa6I)



Ilustración 19. Relleno de la zanja. Fehmarnbelt fixed link, [youtube.com/watch?v=9f25lzsqa6I](https://www.youtube.com/watch?v=9f25lzsqa6I)

El túnel del estrecho de Fehmarn, que será el túnel será el túnel sumergido más grande del mundo, se encuentra en construcción desde 2021 y se estima que estará listo para 2029⁶. El túnel unirá acortará las distancias entre las ciudades de Hamburgo y Copenhague. Será un túnel de 18.2 km de largo, con cuatro carriles para vehículos y dos vías de ferrocarril.

Para su construcción se planteó la posibilidad de un túnel excavado, pero las condiciones del suelo en el estrecho lo volvieron inviable. Por lo que se decidió que la mejor opción era el túnel sumergido.

Actualmente se encuentran en construcción la zanja en donde serán colocadas las piezas del túnel. 19 millones de metros cúbicos de material serán extraídas del fondo marino, y será utilizado para la creación de 2,850,000 m² de áreas de recreación en las costas danesas.

En total serán 89 piezas de concreto. Cada una tendrá una longitud total de 217 m y un peso de 73,000 toneladas.

El túnel permitirá unir Europa central con Escandinavia, reduciendo los tiempos para cruzar el estrecho de Fehmarn de 50 minutos en ferry, a 10 minutos en vehículo y a 7 minutos en tren.

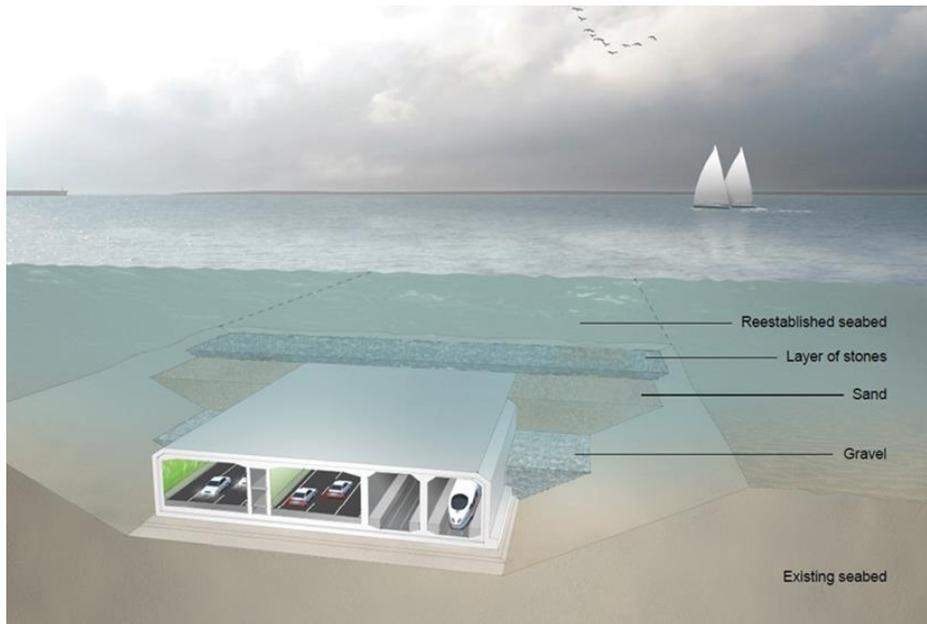


Ilustración 20. Zanja de excavación, elemento prefabricado del túnel y las distintas capas de relleno de un túnel sumergido. Sección del túnel Fehmarnbelt. Imagen: Arup.com

El primer túnel sumergido de México y Latinoamérica es el túnel Coatzacoalcos, en Veracruz, inaugurado en 2017 y con una longitud total de 1.1 Km, conecta los municipios de villa de Allende y Coatzacoalcos.

⁶ Femern, Construction phases. <https://femern.com/the-construction/construction-phases/>

7.3.4. Túneles Falsos

Los túneles falsos son estructuras construidas a cielo abierto y después cubiertas en sus costados y parte superior para funcionar como un túnel tradicional. Son una opción constructiva en zonas de laderas inestables, terrenos con poca cobertura, o en los que resulta más económico realizar una construcción a cielo abierto y después rellenar la estructura. También son utilizados en carreteras como elementos de transición entre el portal y el túnel excavado.

Algunos proyectos recientes de túneles falsos ejecutado en México son los túneles Agua de obispo de la carretera Cuernavaca Acapulco, que fueron construidos después de un deslizamiento causado por intensas lluvias; los túneles falsos en la carretera Durango – Mazatlán (Santa Lucía I, Guamúchil, el Carrizo II y las Palomas); los túneles en los portales del túnel acapulco y en el túnel Las cascadas del libramiento poniente de Morelia. En México los túneles falsos han sido construidos principalmente en carreteras, aunque se puede aplicar a otro tipo de proyectos.

El primer paso para la construcción de un túnel falso es la excavación. Se retira suelo hasta la profundidad de desplante a lo largo del alineamiento del túnel construyendo taludes provisionales o utilizando soportes para contener la excavación.



Ilustración 21. Zapatas prefabricadas para túnel falso durante la construcción en los Túneles “Obispo de Agua” de la Autopista Acapulco – Cuernavaca (Ing. F. Antonio Huelsz Noriega, 2015)

Lo siguiente es continuar con la cimentación del túnel, que puede ser por elementos colados en sitio o por zapatas prefabricadas unidas mediante colados de liga. Al finalizar la cimentación de una sección del túnel se puede proceder con la estructura.

Para colados en sitio de la estructura del túnel falso se utiliza una cimbra deslizante. La cimbra es colocada en la posición para el colado del tramo en cuestión. Los colados se realizan de la sección completa del túnel y a una longitud definida por la cimbra. Al terminar un colado, la cimbra se desprende y se reubica en la sección siguiente para el nuevo colado desplazada sobre rieles.

Otro método de construcción de la estructura de un túnel falso es mediante dovelas prefabricadas; éstas se colocan por medio de grúas y se unen mediante elementos de liga que pueden ser placas de acero o pernos.

Terminando la construcción de la estructura se continúa con el relleno el cual se realiza por capas con una secuencia equilibrada en ambos lados del hastial del túnel para evitar esfuerzos asimétricos y adicionales que dañen la estructura del túnel falso.



Ilustración 22. Cimbra deslizante para el colado del túnel durante la construcción del túnel falso "Prolongación de los ferrocarriles" en Terrassa, España. (Ulma Construction)

7.3.5. Túneles Flotantes

Los túneles flotantes o SFT por sus siglas en inglés (submerged floating tunnels), son un tipo de infraestructura innovadora que se utiliza para el cruce de lagos, ríos y estrechos. Consiste en un tubo suspendido en el agua, cables de fijación impiden el desplazamiento del túnel, cimentaciones subacuáticas y portales de conexión con la superficie en los extremos. Son un tipo de túnel que nunca se ha construido, pero que se encuentra en fase de diseño para algunos proyectos y se ha propuesto como alternativa en otros.

El concepto principal para el diseño y construcción de este tipo de estructura es su trabajo por flotación. Su procedimiento constructivo es similar a los túneles inmersos y se puede resumir en los siguientes puntos.

- 1) Prefabricado de piezas.
- 2) Traslado hasta posición.
- 3) Fijación de piezas a puntos fijos y unión con otros tramos de túnel.
- 4) Puesta en operación.

Sin importar el método de instalación utilizado para los segmentos de túnel, lo más importante es que sean anclados oportunamente para asegurar su permanencia en posición y evitar que sea afectado por condiciones adversas. Se pueden utilizar cables temporales, cables permanentes, o boyas de flotación para mantener la estabilidad.

En cuestiones ambientales, los túneles flotantes tienen la ventaja sobre los túneles sumergidos de no requerir de una excavación a lo largo de todo el alineamiento del lecho marino. Aún con esta ventaja en comparación con otros métodos submarinos, queda el cuestionamiento del impacto al ecosistema causado por la presencia del túnel.

En el proyecto de la construcción de la carretera E39 en Noruega, se plantea el escenario más cercano para un proyecto de túnel sumergido en la actualidad. El proyecto pretende unir la costa oeste de Noruega con una carretera que cruce de norte a sur. El ambicioso proyecto incluye la construcción de puentes, dos túneles subacuáticos, y los primeros túneles flotantes del mundo.

Los túneles subacuáticos inmersos y de excavación debajo del lecho marino, son bien conocidos en Noruega, donde se han construido un total de 35. Los primeros fueron construidos en la década de 1980⁷. Los dos nuevos túneles subacuáticos tendrán longitudes de 15.5 km y de 27 km, lo que convertirá al túnel de 27 km en el más largo del mundo para túneles submarinos.

⁷ Coastal highway route E39 extreme crossings, Statens vegvesen.

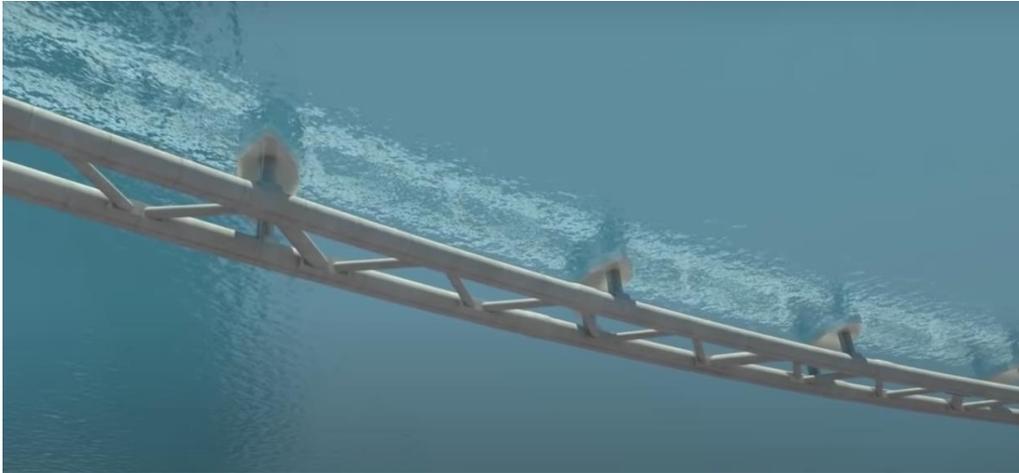


Ilustración 23. Túnel flotante propuesto para el fiordo de Sony, Statens vegvesen (2013).

Algunas de las ventajas de los túneles flotantes son:

- Son apropiados tanto en aguas muy profundas como en fondos poco resistentes, debido a que no necesitan apoyarse en el terreno.
- Adecuados en ríos con regímenes variables o que sufran socavaciones durante sus crecidas.
- En zonas de cuerpos de agua profundos, resultan económicos en comparación con otras soluciones como islas artificiales.
- Desde el punto de vista ambiental, no interrumpen el curso de corrientes ni el flujo migratorio de peces y tampoco se afecta el fondo marino.

Algunos riesgos identificados de la construcción de estructuras flotantes son:

- La precisión de las conexiones de los segmentos de túnel es compleja de conseguir bajo el agua.
- Las piezas del túnel son vulnerables durante el proceso de construcción.
- Las vibraciones inducidas por el medio ambiente perturbarán el monitoreo.
- No existe ninguna experiencia previa para este tipo de túneles.

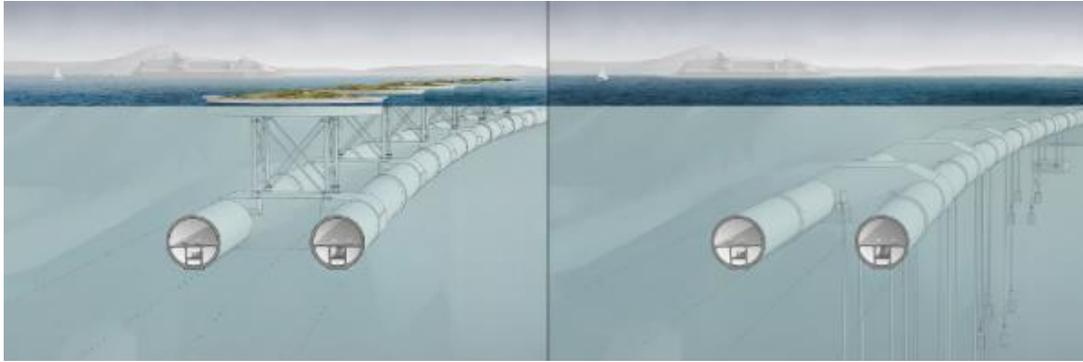


Ilustración 24. Sección transversal de SFTB con pontones (izquierda) y correas verticales (derecha). (Snøhetta)

7.4. Operación

Una vez que concluye la construcción del túnel, todos los elementos individuales deben ser probados. A menudo se realiza una prueba de extracción para probar la resistencia de los soportes, además de verificaciones del espesor del revestimiento y se comprueba el funcionamiento de la membrana impermeable; entre otras revisiones y pruebas. Esta serie de pruebas confirma que el túnel es seguro de comenzar a funcionar y también se evalúan todos los equipos de operación, eléctricos y mecánicos en la estructura completa. Cada pieza del túnel y las diversas pruebas deben ser aprobadas por el contratista, el propietario y las autoridades reguladoras. Después de concluir la construcción, habrá costos de operación y mantenimiento, por lo que importante definir y dimensionar los recursos necesarios para esto previo a la puesta en servicio.

7.4.1. Plan general de operación.

El plan general de operación tiene el objetivo de ofrecer condiciones óptimas de operación de instalaciones, equipamiento y servicios, que proporcionen una calidad de servicios elevada y prolonguen la vida útil de la estructura e instalaciones, mediante el uso eficiente de los recursos asignados. La optimización de los costos de operación debe lograrse sin afectar el nivel de servicio, seguridad y comodidad de los usuarios.

La seguridad es un tema prioritario durante la operación. Se deben establecer inspecciones periódicas del túnel con el objetivo de verificar las condiciones de seguridad. En general en la práctica se considera que los túneles ofrecen niveles de seguridad mayores que los de una carretera a cielo abierto⁸. Sin embargo, las consecuencias de incidentes como averías, accidentes o incendios pueden ser mucho más graves dentro de los túneles.

⁸ Tareas de explotación de túneles, PIARC. tunnelsmanual.piarc.org/es/explotacion-y-mantenimiento-explotacion/tareas-de-explotacion

La operación de un túnel tiene dos vertientes, la de recuperación de la inversión y la de atención al usuario. Para recuperar la inversión se requiere de un cobro por los servicios del túnel, como el cobro de peajes en el caso de los túneles de carreteras. En otros casos la inversión es pagada por el gobierno con recursos públicos, que se debe traducir en beneficios económicos y sociales. La recuperación de la inversión y el servicio al o a los usuarios del túnel deben de lograrse en conjunto.

7.4.2. Plan de mantenimiento.

Contempla los medios y procedimientos para mantener en las mejores condiciones de servicios las instalaciones. Los objetivos son:

- Minimizar los problemas en la infraestructura, como averías o desperfectos.
- Asegurar la disponibilidad de las instalaciones en el momento que éstas se requieren.
- Optimizar la vida útil de la infraestructura, instalaciones y equipos.

Existen dos tipos de mantenimiento, el preventivo y el correctivo. El mantenimiento preventivo es el que se realiza de manera repetitiva y programada para asegurarse de mantener las instalaciones en buenas condiciones de operación. El mantenimiento correctivo es el que requiere una intervención especial en una zona que está dañada y requiere ser reparada. El plan debe priorizar el mantenimiento preventivo y evitar el correctivo.

Los túneles son a menudo puntos de paso obligatorios, el cierre total o parcial puede producir grandes alteraciones de tráfico y obligar a los usuarios a recorrer grandes distancias por rutas alternativas.

El detener un túnel de una red de tren o metro, afecta a los usuarios y provocará un aumento en la demanda del transporte por otras vías que probablemente no tengan la capacidad.

Los túneles son construidos para cubrir necesidades vitales, representan una gran inversión de recursos, y en la mayoría de los casos, no se puede permitir cerrarlos, y de hacerlo provocará por lo menos pérdidas económicas y materiales. Por esto, las actividades de operación y mantenimiento son vitales para mantener en funcionamiento el túnel en cuestión.

7.4.3. Reducción de los costos de operación de túneles.

Durante el congreso de 1987 de la asociación mundial de carreteras PIARC⁹, un grupo de trabajo dedicado a la operación tuvo como un tema de su agenda los costos de la operación de túneles. Se planteó el objetivo de identificar los principales costos operacionales y plantear como pueden ser reducidos, considerando que no se debe comprometer la seguridad.

⁹ PIARC por sus siglas en inglés Permanent International Association of Road Congresses

El grupo se concentró en la reducción de costos de los siguientes elementos:

1. Costo de energía.
2. Costo de personal.
3. Costo de mantenimiento.

Los costos de operación tienen tres componentes: operación, mantenimiento y reinversión.

- Operación: Los costos de operación se refieren a las erogaciones anuales de supervisión, administración y los costos del día a día (cuarto de control del túnel, control del tráfico, personal de casetas, etcétera). Los gastos en la energía eléctrica para la ventilación y alumbrado, entre otros, son factores de costos de gran impacto. Para túneles carreteros, PIARC menciona que la energía eléctrica representa un 25% del gasto de operación anual. El cambio a tecnologías nuevas permite reducir los costos de operación y al mismo tiempo requieren de mantenimiento especializado. Los costos del personal para túneles nuevos muestran tendencia a disminuir debido también a nuevas tecnologías que requieren de menos personas para su operación.
- Costos de mantenimiento: Son los costos anuales necesarios del mantenimiento de rutina para mantener al túnel en condiciones de operación. Los costos de limpieza, remplazo de consumibles, luminarias, filtros y baterías. Las decisiones en la fase de diseño como la forma del túnel, accesos para mantenimiento y la configuración de operación, tienen un impacto significativo en el costo general de mantenimiento. Los ahorros en la fase de mantenimiento son mayoritariamente cuestión de mejorar el diseño. La tendencia general es que los costos de mantenimiento se incrementan debido a la mano de obra especializada que se requiere al usar nueva tecnología.
- Costos de reinversión: Se refiere a los costos anuales del remplazo total de elementos que alcanzarán el final de su vida útil en repetidas ocasiones durante los 120 años de vida útil contemplados para un túnel (según el estudio del PIARC).

En estudios previos se buscó una correlación entre los costos globales de operación, la longitud del túnel y el flujo vehicular. Los resultados mostraron que los costos de operación no se correlacionan a la longitud del túnel, por las razones siguientes:

- El registro de los costos se realiza de diferentes formas, lo que dificulta compararlos.

- Para los costos de operación y mantenimiento, los resultados del PIARC mencionan que no existe una relación clara entre longitud y costos de operación.
- En ciertos casos, existen túneles que tienen altos costos de mantenimiento debido a problemas particulares como filtraciones, deficiencias constructivas, desastres naturales, etc., que influyen en la ya complicada suma de variables para comparar los costos.

Para lograr una comparativa ilustrativa de los costos de operación y mantenimiento, es necesario llevar un registro de los costos de operación, mantenimiento y reinversión, que permitirá en un futuro contar con información útil para los proyectos en México, tanto para los que están en operación como para los que están en fase de diseño.

Dentro de las investigaciones existentes destaca el llamado modelo de costos de operación del Reino Unido, descrito en la investigación del PIARC, se basan en elementos de costos claves, y utilizan costos promedio en lugar de estimaciones de costos reportadas.

Las diferentes de secciones de los túneles, las condiciones de operación, y los requerimientos de funcionamiento significan que los costos pueden variar de una manera amplia. El modelo se conceptualizó flexible desde sus inicios para considerar las diferencias que existen entre cada túnel.

El modelo utiliza los siguientes factores:

Tipo de túnel.

- Un túnel, de un carril y de doble sentido.
- Bitúnel, de dos carriles, de un sentido.

Longitud.

- Cortos (150, 300 y 500 m)
- Medios y largos (de 1 a 1.5 km y de 1.5 a 4 Km)

Ventilación.

- Túneles cortos normalmente ventilados
- Ventilados mecánicamente

Tráfico.

- Urbano; con tráfico alto y frecuentemente congestionado.
- Suburbano; con tráfico moderado y con flujo continuo.

La ilustración siguiente muestra los resultados del análisis con el método del Reino Unido. En este caso los resultados muestran que la longitud del túnel es un factor de importancia para la comparativa de los costos de operación y se observan

correlaciones que permiten ponderar los costos de operación esperados para un túnel carretero.

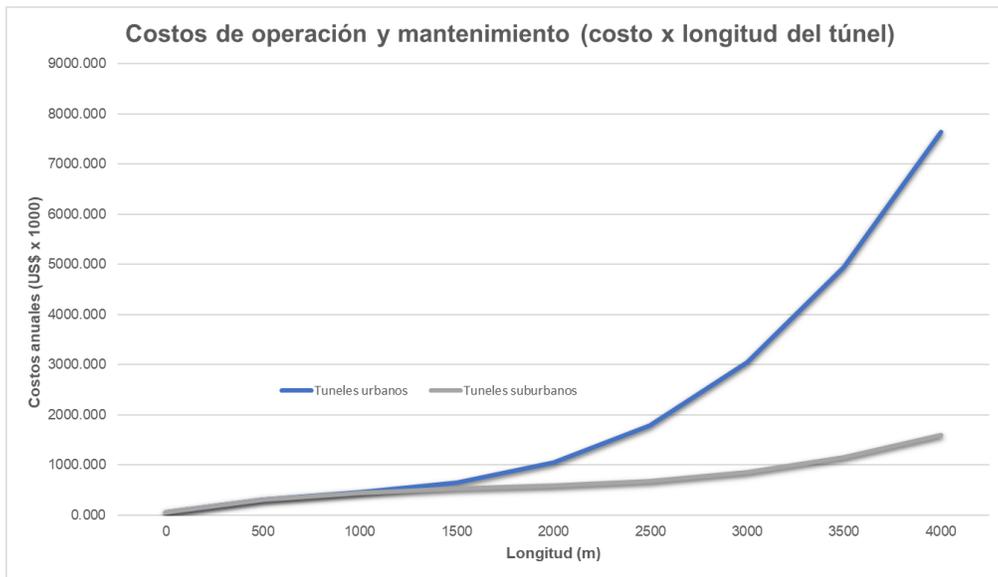


Ilustración 25. Costo anual de mantenimiento - longitud del túnel, (basada en PIARC 2009).

Se puede observar la relación entre costo anual de operación en miles de dólares, contra la longitud del túnel en metros. Con el comportamiento de la curva, se identifican tres casos para los túneles urbanos. Para túneles de 500 a 1500 m, se tiene costos menores al millón de dólares, con poca variación entre las diferentes longitudes de ese rango. El siguiente caso es para túneles de 1500 a 3000 m, donde puede verse un incremento significativo en el costo conforme aumenta de la longitud. El último caso es para las longitudes de 3000 a 4000 m, en donde el incremento va de 3 a 8 millones, siendo este el rango de mayor aumento por metro.

Los túneles urbanos tienen un costo de operación más alto que los suburbanos volviéndose significativa la diferencia a partir de túneles mayores a 1.5 km.

En este capítulo se aborda en mayor medida casos de los túneles carreteros por ser los que implicar un mayor número de factores para su operación y mantenimiento, además ser los más estudiados y de los que más información existe al respecto.

Los túneles de tren o sistemas de metro requieren de mantenimiento particular para las vías y el sistema de alimentación eléctrica y de operación. Para este caso la iluminación y la ventilación serán menores, mientras que los gastos por el personal de operación serán mucho mayores. En este caso la operación de los túneles va en conjunto con la operación de todo el sistema de transporte, ya sea de metro o tren.

Los túneles servicios de drenaje y agua potable tendrán costos de operación marginales, en comparación con los túneles para transporte. Los costos de energía son únicamente los del sistema de auscultación y lo necesario para el mantenimiento.

Una comparativa entre los costos de mantenimiento para los diferentes tipos de túneles, sería valiosa para abordar el tema.

La etapa de diseño es determinante para los costos de operación. Un túnel en el que se realizan suficientes estudios detallados, con planes de operación y mantenimiento claros ligados a las fases constructivas y al ciclo de vida, se traduce en gastos de operación controlados, lo que permite destinar recursos a la optimización. Contrario a tener que destinar recursos para atender mantenimientos costosos derivados de una mala construcción o consideraciones de diseño alejadas de la realidad.

Los proyectos nuevos deben considerar el uso de las tecnologías más novedosas para su operación, con el objetivo de brindar altos niveles de seguridad y beneficiar a los procesos de operación.

Es necesario optimizar los costos durante el ciclo vida de los elementos del túnel, reducir los consumos de energía y disminuir el personal necesario para la operación. Las elecciones durante desde el inicio del proyecto deben contemplar los costos para el ciclo de vida y no solo la inversión inmediata para alguna etapa.

La participación los encargados de la operación de túneles en la recopilación de información para una base de datos y en los estudios al respecto, servirá para mejorar los análisis y poder encontrar mejoras y oportunidades de ahorros.

La operación es un procedimiento de mejora continua, que se retroalimenta de las lecciones aprendidas con el paso del tiempo y de las mejores prácticas.

La operación y mantenimiento de un túnel son la parte más importante del túnel, es en estas etapas donde se dará el servicio para el que fue concebido. Es importante no olvidar considerar la operación del túnel en la toma de decisiones y ejecuciones durante todas las etapas previas. Un proyecto con suficientes estudios y una construcción apegada a las especificaciones con altos estándares de calidad culminará en beneficio de la operación y en menos gastos, que de otro modo incrementarían los costos de mantenimiento y comprometerían el servicio del túnel.

8. Costos en proyectos de túneles

Como señala la ITA-AITES (International Tunneling and Underground Space Association), los aspectos económicos continúan siendo, erróneamente, una barrera importante para el desarrollo del uso del espacio subterráneo. Dado que el costo de construcción inicial de las estructuras subterráneas es generalmente más alto que el de la construcción al aire libre, las estructuras subterráneas son en cierto sentido “penalizadas” en comparación con la construcción al aire libre sobre esta comparativa restringida. Por lo tanto, los beneficios económicos de una instalación subterránea deben ser calculados estimando los impactos del costo de vida en los beneficios proporcionados por dicha instalación. Además, la evaluación de las estructuras subterráneas debe tener en cuenta las diversas ventajas indirectas que ofrecen.

A nivel conceptual, los análisis de costos son normalmente basados en costos por unidad de medida para una sección típica de túnel. Los registros históricos de costos actualizados con inflación y ubicación geográfica son comúnmente usados como revisión rápida. Sin embargo, esos registros deben de ser usados con extrema precaución ya que, en la mayoría de los casos, el contenido exacto de esos registros y sus circunstancias particulares no son conocidos. Además, la construcción de túneles es un trabajo especializado e involucra un significativo componente laboral. La experiencia de la mano de obra y la productividad son factores fundamentales para una correcta estimación del costo de la construcción de un túnel. El túnel siendo una estructura lineal, su costo es muy dependiente de la tasa de avance de construcción, que a su vez depende de la mano de obra, las condiciones geológicas, la idoneidad del equipo, los medios y métodos del contratista, y la experiencia de los trabajadores. Es además dependiente del programa de obra, número de turnos, requisitos sindicales, regulaciones locales como tiempo de trabajo permitido, factores ambientales como ruido y vibraciones, y similares deben ser considerados cuando se realicen las estimaciones de costos. Es recomendable, incluso en la etapa de planeación, preparar una estimación ascendente de costos de construcción utilizando materiales estimados, mano de obra, y equipo. El uso de experiencia de otros proyectos similares en el área es usualmente utilizado para estimar la mano de obra y las tasas de avance. A nivel conceptual, medidas para contingencias sustanciales pueden ser necesarias en las primeras etapas del proyecto. A medida que el diseño avanza y los riesgos son identificados y tratados, las contingencias se reducirán gradualmente conforme el nivel de detalle y de diseño incrementa. Los costos indirectos como ingeniería, planeación y gerencia de obra, seguros, costos del propietario, costos de terceros, costos de derecho de vía, y similares deben de ser considerados. La estimación de costos debería ser progresivamente más detallada a medida que avanza el diseño.

Para realizar un análisis de los costos para la construcción de un túnel, hay que identificar los principales elementos de costos. Identificar y cuantificar las

numerosas variables que tienen influencia en el costo de los túneles, podría potencialmente resultar en la reducción del costo de realización del túnel y la carga fiscal para la población, que es normalmente quien paga por el proyecto.

8.1. Estado del arte

Dentro de los estudios previos relacionados a costos en proyectos y construcción de túneles, destaca uno realizado por el gobierno británico en el 2010 titulado *Infrastructure cost review*. En este, se analizaron los costos de la infraestructura en distintas ramas buscando reducir costos en las obras futuras. En estudio incluye un apartado en el que se analizan los costos de 14 túneles construidos en Reino Unido y 21 túneles de otros países de Europa. El uso de los túneles que se analizaron fue: de ferrocarril, carretera, agua y del sector energético, y de ubicación en Noruega, España, Holanda, Austria, Portugal, Alemania, Suiza, Francia, Grecia y Luxemburgo.

De los datos analizados se obtuvo el costo total de cada túnel y se dividió entre su longitud total en kilómetros. La grafica siguiente es la mostrada en el estudio original. En ella se ve la relación de costo en millones de euros por kilómetro contra el diámetro de cada túnel.

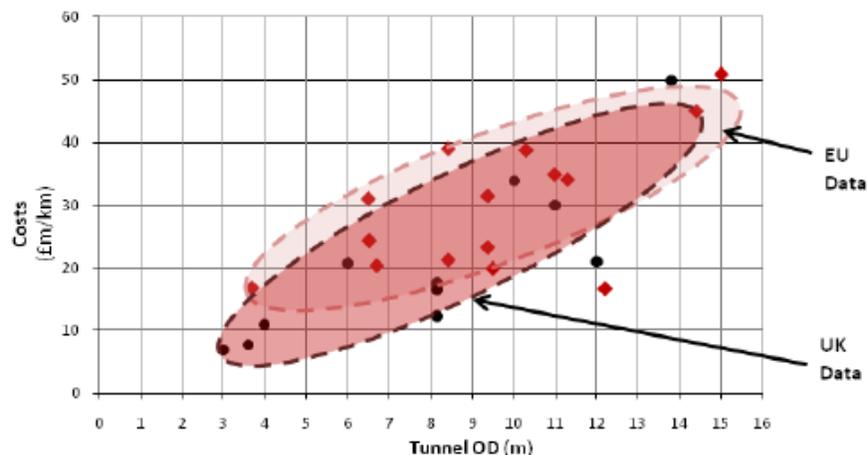


Ilustración 26. El efecto del diámetro exterior en el costo de los túneles. *Infrastructure UK (2010)*

La elipse con el tono rosa suave envuelve todos los túneles europeos (diamantes rojos) con la excepción de uno. La elipse con tono más oscuro contiene todos los túneles del Reino Unido (círculos negros), nuevamente con la excepción de un valor fuera.

Existe una dispersión similar de los resultados de los 15 proyectos europeos comparados con los 12 resultados del Reino Unido. Sin embargo, los datos son insuficientes para permitir establecer otras tendencias relacionadas con los países, ya que los 15 proyectos de la Unión Europea están distribuidos entre los países

miembros. Existen una serie de razones por las que existe un rango amplio, incluyendo las condiciones del terreno, el método de excavación y el método de sostenimiento. La tasa total de los túneles también depende de la longitud del túnel.

La variación del costo de los túneles con la longitud total fue investigada en el estudio de la BTS (British tunneling Society), publicado en el capítulo de costos de túneles de *Infrastructure cost review*. En ilustración 28 se observa una gran dispersión en los resultados, con una ligera tendencia de reducir el costo unitario con la longitud del túnel.

En el reporte se destaca también que la evaluación de proyectos de ferrocarril que involucran una cantidad significativa de túneles muestra un costo significativamente más elevado en el Reino Unido que en otros países europeos.

El costo promedio para túneles de 3 metros de diámetro o mayores es principalmente dependiente de su diámetro. Otros factores que tienen menor influencia en el costo son longitud total, condiciones del terreno, método de excavación y tipo de sostenimiento. La tasa promedio para construcción de túneles en Reino Unido no son significativamente diferentes a las de Europa.

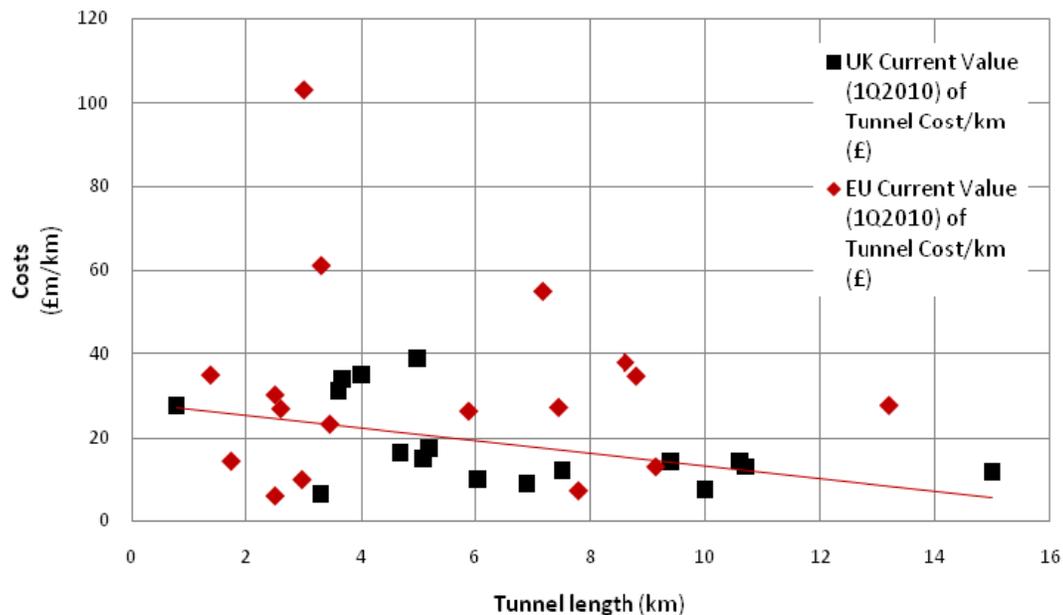


Ilustración 27. Efecto de la longitud de un túnel en su precio unitario. Infrastructure UK (2010)

Otras conclusiones notables y de importancia para la investigación mencionadas en el estudio son:

- Las restricciones impuestas en el proceso de planeación pueden causar la pérdida de oportunidades por innovaciones del contratista, por ejemplo, mediante una innovación en diseño o en el uso de componentes

prefabricados. Estas restricciones también pueden propiciar la pérdida de oportunidades de beneficiarse de un proceso posterior de ingeniería de valor, debido a que cualquier cambio que genere ahorros debe pasar por un proceso de aprobación, incluyendo la planeación, lo que puede anular cualquier beneficio potencial.

- Con relación al tema del financiamiento e inversión la investigación señala que existe una creencia en el sector de que la falta de una fuente continua de trabajo en el Reino Unido genera costos más altos en infraestructura. Se menciona que un horizonte de planeación de 5 a 8 años permitirá a las empresas de la industria mejorar y disminuir los costos globales.
- Se señala que la evidencia indica que una causa importante de sobrecostos es provocada por la falta de claridad y de dirección en decisiones clave al inicio y en los subsecuentes cambios en el proyecto, particularmente en el sector público.
- Se asegura que mejorar la calidad, el entendimiento y la transparencia del análisis de costos y de datos de referencia es un prerrequisito esencial para el uso alternativo de enfoques de contratación alternativos.
- Existe una percepción generalizada de que existe la necesidad de incrementar las habilidades de los supervisores de primera línea para mejorar la gestión de la seguridad, calidad y productividad.
- Las especificaciones están hechas por personas que no pagaran los costos de ellas. Se requiere tener un equipo que tome en cuenta los aspectos económicos en los proyectos al momento de definir las especificaciones del proyecto.

Otra investigación de importancia relacionada al tema es la que realizaron Nathaniel Efron y Megan Read en 2012, titulada *Analyzing International Tunnel Costs*. En el estudio se señala que la investigación previa sobre el tema (costo en proyectos de túneles) es escasa y lo existente generalmente carece de datos de soporte. A continuación, se mencionan las ideas principales y conclusiones del estudio.

Respecto a la recolección de información y análisis, comparando seis túneles urbanos para ferrocarril recientes, excavados con TBM, se encontró que el costo por metro cubico de estos túneles es muy similar y difiere por \$70/m³ (dólares australianos, aproximadamente igual a \$1100 Pesos Mx). Tomando en cuenta que el tipo de excavación y el uso del túnel son constantes en este análisis y resultaron costos globales similares, es posible que estos sean los factores de costos clave para túneles.

Para análisis futuros se recomienda que los proyectos de túneles se dividan en grupos por uso final del túnel, y después analizar la información con la ubicación geográfica siendo la variable independiente. Una clasificación posterior por tipo de excavación sería ideal para grandes registros de información. Es importante también integrar información de varias fuentes para contrarrestar la baja confiabilidad de algunos datos.

Relacionado a entrevistas y encuestas realizadas en el estudio. Los factores de costo claves mencionados en las entrevistas y encuestas fueron: geología, mano de obra, materiales, seguridad y regulaciones ambientales, apoyo gubernamental y del público, estructura de mercado, costo de licitaciones, tipos de contrato y conocimiento del cliente. Se recomiendan investigaciones futuras enfocadas a fondo en áreas clave para el ahorro de costos. Estas investigaciones deben buscar casos significativos de reducción de costos en el mercado global.

Respecto a los costos y la reducción de costos, los siguientes factores de costo fueron investigados:

- Geología
- Mano de obra
- Materiales
- Seguridad y medidas ambientales
- Estructura del mercado
- Apoyo del gobierno y público
- Conocimiento del cliente
- Método de ejecución del proyecto

Se descubrió que la etapa de diseño tiene un alto potencial para reducción de costos en estas categorías, debido a que en este punto el alcance del proyecto no está completamente establecido. Adicionalmente, decisiones importantes durante esta etapa como seleccionar el alineamiento, dimensiones, y tipo de sostenimiento, pueden resultar en una variación significativa de costo durante la construcción.

La geología es la causa más citada para la mayoría de los sobrecostos en la construcción de túneles. Las condiciones del terreno varían a través del mundo, con los problemas principales causados por filtraciones de agua, fallas geológicas, materiales muy suaves que no tendrán autosoporte, y la variación de materiales de arena suave o grava a rocas muy duras. Se propone que, en las primeras etapas de la fase de factibilidad, los clientes aumenten significativamente el monto de investigación del sitio. Se reconoce la dificultad de convencer a los clientes de gastar más dinero en las etapas tempranas del proyecto, cuando la viabilidad global, la constructibilidad y el financiamiento son aún desconocidos, pero todos los temas de investigación describen directa correlación entre el monto de la investigación del sitio y los ahorros en costos. Para lograr esto, recomendamos

proveer de preparación especializada en la materia a los clientes que están considerando cualquier tipo de trabajos subterráneos. Es un área que ha demostrado tener mucho potencial para reducir riesgos y costos.

Típicamente la **mano de obra** representa entre el 30-40% del costo total de un proyecto de túnel. Países con salarios altos como Europa y Estados Unidos frecuentemente importan mano de obra de Asia para reducir costos. Una reducción en la cantidad de mano de obra requerida para ejecutar un proyecto de túnel resultará en ahorros en costos. Tomando en cuenta que la mayoría de los costos de mano de obra son atribuidos a los trabajadores de construcción en lugar que, a profesionales de la ingeniería, optimización de plantas de prefabricados, incremento en eficiencia tecnológica y una mejor gerencia, son importantes para la reducción de costos. También se recomienda recopilar información de la tasa de avance del túnel por unidad de área, realizar entrevistas con gerentes de construcción para buscar ineficiencias en los procesos y buscar reducir la mano de obra.

Los costos de **materiales e instalaciones** son usualmente muy similares entre todas las regiones. Únicamente existen unas pocas empresas fabricantes que proveen a la mayoría de la industria internacional de túneles. Una opción para reducir costos en materiales e instalaciones que está siendo investigada en Asia, es avanzar hacia la estandarización en lugar de la optimización. Actualmente existen enormes ineficiencias en tener que adecuar una planta para cada trabajo para fabricar anillos prefabricados que sean únicos a un túnel específico. Adicionalmente, maquinaria como las TBM son típicamente utilizadas una vez y posteriormente vendidas a los fabricantes por un 5-15% del costo de compra, cuando puede ser mucho más barato simplemente restaurar el equipo para otros trabajos. Estos cambios podrían potencialmente reducir costos a mediano y largo plazo, después del aumento inicial necesario para el diseño de los túneles que sean basados en estos componentes predeterminados.

Las regulaciones ambientales y de seguridad son muy similares en todo el mundo, con Europa siendo la primera en implementar nuevos estándares y luego son adaptados por los Estados Unidos, Australia, Nueva Zelanda, y eventualmente en el resto del mundo. Existen ligeras diferencias en las regulaciones basadas en la localización del proyecto en áreas rurales o urbanas, pero las regulaciones de seguridad y ambientales son relativamente estandarizadas en todo el mundo y entonces no existe mucho potencial para la reducción de costos en esta categoría. Algunos túneles australianos han sido señalados como “sobre diseñados” y “sobre especificados” con relación a temas de seguridad, y el remover el exceso de sistemas puede ayudar a reducir costos adicionales.

Otro aspecto identificado como principal es la **estructura del mercado**. En la mayoría de los países, los proyectos de túneles tienen ofertas de alrededor de 10 o más contratistas, mientras que en Australia pocas veces exceden cuatro.

Intervención internacional en el mercado puede incrementar el nivel de competencia y llevar a una reducción de costos. Una opción que puede ser realizada por los clientes puede ser fomentar la licitación de contratistas extranjeros lo que podría ayudar a estimular la innovación y desencadenar la reducción de costos innecesarios. Otra alternativa sería analizar los efectos de dividir los contratos de gran escala en múltiples contratos más pequeños. Un análisis completo será necesario para determinar si la reducción del costo por el aumento de competencia excede el incremento del costo de las ofertas adicionales.

Un aspecto decisivo es el **apoyo del gobierno y del público**. El apoyo del gobierno ayuda a acelerar la fase de diseño y avanzar el proyecto a la excavación. Si este apoyo está en duda o cambia durante el proyecto, puede llevar a cambios en los alcances y a contratiempos que ocasionan sobrecostos. Algunos proyectos pueden ser incluso abandonados si no existe apoyo por parte del gobierno. Es muy importante asegurar el apoyo del gobierno y del público durante las etapas tempranas de un proyecto de un túnel, con el fin de evitar aumentos de costos.

En Australia el **conocimiento del cliente** es generalmente considerado como un área de amplia mejora. Muchos clientes no saben cómo crear especificaciones para túneles que optimicen los potenciales ahorros de costos debido a la relativa escases de túneles comparados con otro tipo de infraestructura. Como resultado los clientes no entienden los desafíos únicos relacionados a los túneles, y los alcances de los proyectos generalmente incluyen elementos que no son necesarios. Algunos clientes son poco claros acerca de lo que quieren, lo que puede generar problemas al elaborar las ofertas. Similar a otros problemas de los clientes, la solución parece ser incrementar la educación. Incrementar la educación ayudará significativamente a reducir las ineficiencias causadas por especificaciones incorrectas y también reducirá el número de clientes que innecesariamente gastan dinero en contratar consultores en las etapas tempranas en el proceso de planeación cuando no se conoce suficiente información respecto al proyecto.

Un aspecto clave es el **método de contratación de proyectos**. Los tipos de contrato en Australia han comenzado a moverse hacia Asociaciones Público Privadas (APP) en los últimos quince años, lo que contrasta con los tipos de contratos en otras naciones. En Australia estos contratos requieren que el sector privado tome todo el riesgo y provea todo el financiamiento para el proyecto en lugar del gobierno. Esto puede ocasionar un incremento de costos debido a que el sector privado debe considerar un alto monto de contingencia, además de no poder asegurar bonos y financiamiento a las tarifas bajas disponibles para el gobierno. El modelo APP ha tenido éxitos y fracasos. La ventaja clave de los APP es que brinda un comienzo acelerado del proyecto, donde existen menos posibilidades de que los proyectos sean atrasados después de cambios políticos,

pero recientes proyectos APP han resultado en que la empresa privada encargada se declare en bancarrota.

8.2. Encuesta a expertos

La opinión de los expertos es un método prácticamente obligado al realizar análisis de costo o riesgo en la gerencia de proyectos. La experiencia de los expertos ayuda a identificar los elementos clave para realizar las evaluaciones desde sus etapas iniciales, evitando invertir tiempo y recursos en elementos irrelevantes para los objetivos del proyecto.

Buscando recabar información valiosa relativa a los costos de los túneles en México promoviendo la participación de expertos en el tema de una manera sencilla y accesible, se elaboró una encuesta dirigida a profesionales mexicanos dedicados a los túneles. El objetivo de la encuesta es identificar los elementos claves en los costos de los proyectos y construcción de túneles en México. La encuesta consiste en cinco preguntas, tres abiertas, una de opción múltiple y una que consiste en calificar los factores de costos de acuerdo con su impacto en el costo final. A continuación, se presentan las preguntas realizadas en la encuesta y el resumen de las respuestas recibidas.

La encuesta se realizó en línea por medio de la plataforma de formularios de Google y se recibieron respuestas de 18 personas.

Pregunta 1. Para usted, ¿cuál es el factor que más impacta en el costo de los túneles?

Esta fue una pregunta abierta y se recibieron 17 diferentes respuestas (solo dos encuestados respondieron lo mismo). En algunas de las respuestas recibidas mencionan más de un factor, por lo que la suma total de las respuestas en la recopilación de datos mostrada es de 21. Se consideró la respuesta “equipo de excavación” dentro del grupo de “método constructivo”. Las respuestas se agruparon para su análisis considerando el número de menciones de cada factor y se obtuvieron los siguientes resultados:

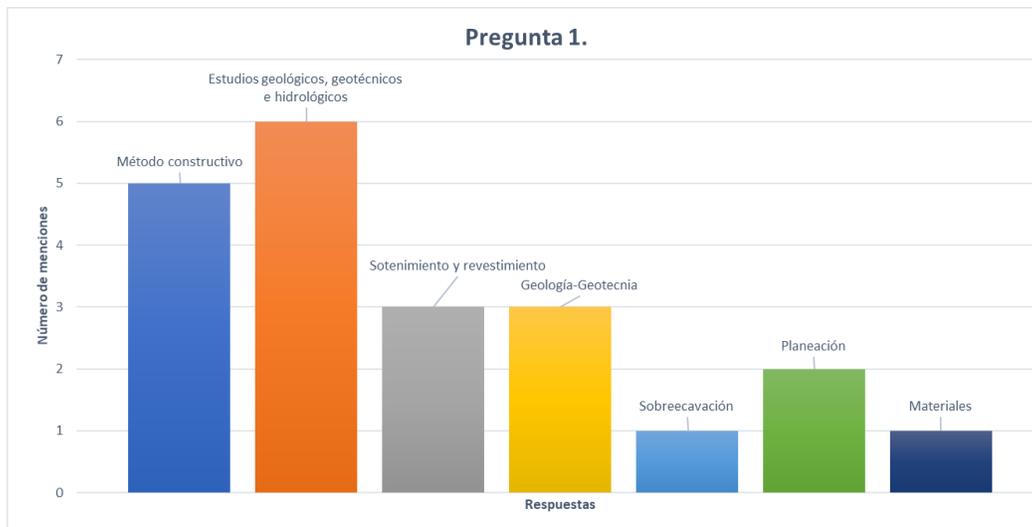


Ilustración 28. Numero de menciones de diferentes factores de las respuestas de la pregunta 1.

Según los resultados el factor que más impacta en el costo de los túneles son los estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos, con seis menciones. A una mención de diferencia está el método constructivo. Después tenemos con tres menciones cada uno al sostenimiento y revestimiento, y la geología y geotecnia. Con dos menciones tenemos a la planeación. Por último, tenemos los materiales y la sobre excavación con una mención.

Por los resultados de esta pregunta se puede identificar que los profesionales de los túneles en México consideran que los estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos son el factor que más impacta al costo final en una obra de túneles. Dentro de las respuestas recibidas se menciona textualmente que los “estudios deficientes” e “insuficientes” son el factor principal. Por lo que además de considerarse el elemento de mayor importancia, también existe una opinión generalizada entre los encuestados de que estudios inadecuados provocan gran impacto en los costos de los túneles.

Pregunta 2. Según su experiencia, en qué fase del proyecto se podrían reducir riesgos y costos

Esta fue una pregunta opción múltiple, se daban las siguientes opciones:

- Diseño
- Investigación del sitio e investigación geotécnica
- Métodos constructivos
- Mano de obra
- Materiales
- Método de contratación de proyectos
- Tecnologías
- Otro:

Los resultados se muestran en la siguiente gráfica:

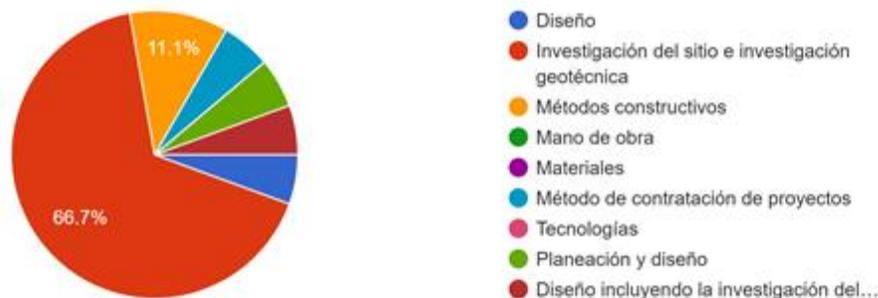


Ilustración 29. Porcentaje de resultados de la pregunta 2.

Doce de los encuestados señalaron a la investigación del sitio e investigación geotécnica como la fase del proyecto en la que se pueden reducir costos. Esto representa a la opinión de más de la mitad de los encuestados. Se recibieron dos respuestas en la opción de “otros” que fueron: “planeación y diseño”, y “diseño incluyendo investigación del sitio e investigación geotécnica”. El resto de las respuestas fueron: dos para la opción “métodos constructivos”, una para “diseño” y una para “método de contratación de proyectos”.

Pregunta 3. ¿Cuál es el costo promedio por km de túnel construido?

En esta pregunta se recibieron únicamente catorce respuestas, lo que quiere decir que cuatro de los encuestados no respondieron a esta pregunta. En general en esta pregunta se recibieron tres tipos de respuesta, las que dieron un costo, las que mencionan la dependencia del costo con las condiciones y características del túnel, y en las que se dice no tener la respuesta a la pregunta.

En dos respuestas se dijo que el costo promedio es de 500 millones. En una respuesta se dice que el costo promedio es de 300 mil. En ambas, al no especificarse, se supone que se refieren a pesos mexicanos. En ocho respuestas se dice de manera similar que el costo por Km de túnel depende de las condiciones y características particulares del túnel en cuestión, y por lo tanto no es posible establecer un valor único promedio. Además, en una de estas respuestas se señaló como ejemplo que en suelos blandos el precio por metro lineal es de 400 mil pesos. Las tres respuestas restantes corresponden a las que se dijo no tener la respuesta adecuada.

Es evidente que los expertos de inmediato piensan en la gran cantidad de variables que se pueden presentar en un proyecto de un túnel, y la respuesta rápida ante el cuestionamiento sobre un costo promedio es que este dependerá de las condiciones específicas. No existe un valor único o les parece inadecuado manejar uno.

Pregunta 4. ¿Qué porcentaje del costo de la obra de un túnel, se invierte en estudios para efectuar el proyecto?

Las respuestas en esta pregunta fueron muy variadas, como se puede apreciar en la siguiente grafica. Se señalan rangos desde menos del 2% hasta el 18%. Cinco de los encuestados no dieron un valor en sus respuestas, pero algunos aportaron comentarios relevantes que más adelante se mencionan.

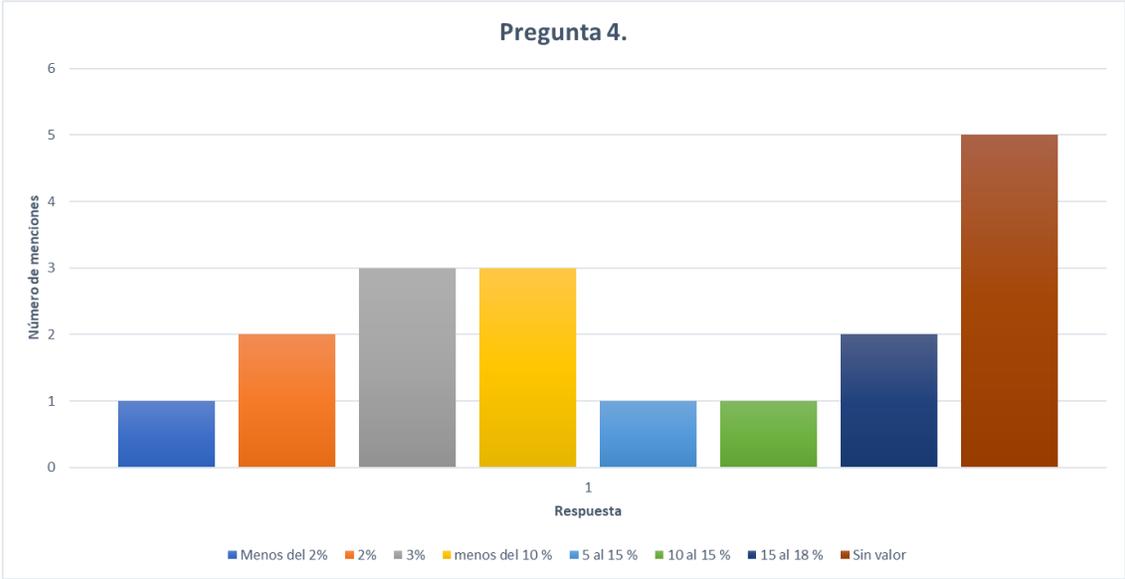


Ilustración 30. Menciones por cada respuesta, pregunta 4.

El resumen de todas las respuestas en la gráfica anterior permite observar que tres encuestados consideran que el porcentaje de una obra que se invierte en estudios es de 3%, y de igual forma tres encuestados dicen que es menor del 10%. Otro encuestado señala que el valor es entre el 10 y 15%, y dos más respondieron que el porcentaje esta entre el 15 y 18%. No existe una tendencia clara hacia algún valor en general, se tienen respuestas muy diversas. No se pueden sacar muchas conclusiones con los resultados mostrados de esta forma.

Para una mejor comprensión de los resultados de esta pregunta, se decidió agruparlo como se muestra en la gráfica siguiente.

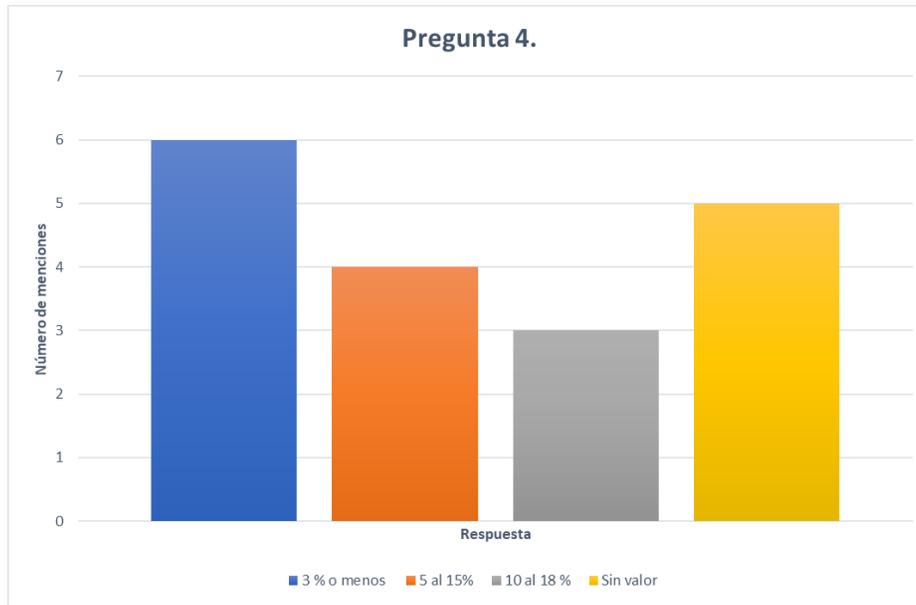


Ilustración 31. Resumen de respuestas pregunta 4.

Con esta agrupación de las respuestas se puede ver de manera más clara la opinión de los encuestados. Seis expertos opinan que el porcentaje para estudios es del 3% o menos, cuatro que es entre el 5-15%, y tres que es del 10-18%.

En algunas de las respuestas, los encuestados dieron opiniones adicionales con relación al tema. Estas son algunas:

- Dependiendo el tipo de proyecto se tendría que poner en balance el aumento de este porcentaje para caracterizar de mejor manera el terreno.
- Este es un aspecto que se debe mejorar para desarrollar mejor las obras.
- En nuestro país desafortunadamente se invierte muy poco en estudios, la experiencia ha indicado que un buen estudio redundará en menos reclamos del contratista de obra.
- El porcentaje invertido no es un valor constante, depende de muchas variables incluyendo el país donde se construirá el túnel.

Pregunta 5. Califique cada uno de los siguientes factores de acuerdo con su influencia en el costo final de un túnel (1-10).

En esta pregunta se pidió calificar la influencia de cada uno de los factores mencionados. Para las respuestas de cada factor se elaboraron graficas circulares como la siguiente para el análisis de los resultados.

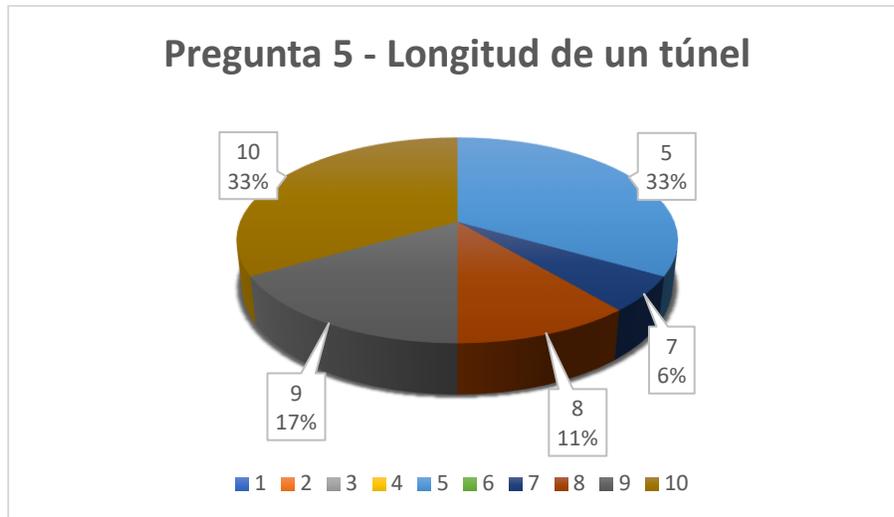


Ilustración 32. Porcentaje de votaciones recibidas para longitud del túnel, pregunta 5.

Con las calificaciones de los encuestados se realizó también un promedio de la calificación de cada uno de los factores.

Pregunta 5 - Promedio de calificaciones	
Longitud del túnel	7.78
Tipo de sostenimiento	8.11
Sección transversal del túnel	7.89
Geología	9.39
Profundidad	6.89
Mano de obra	5.72
Método constructivo	8.5
Uso final del túnel	6
Tipo de contrato	5.44

Tabla 1. Promedios de calificaciones por factor, pregunta 5.

Se observa que el factor con el promedio más alto, es decir, el que considera de mayor impacto en el costo de un túnel es la geología. Los siguientes factores que en promedio obtuvieron una calificación alta son el tipo de sostenimiento y el método constructivo. Con una calificación cercana a ocho, están la sección transversal y la longitud del túnel. La apreciación entonces es que en estos factores están los mayores impactos al costo de los túneles, lo que también podría significar un área de oportunidad para el ahorro de costos.

Otro aspecto interesante de las respuestas de esta pregunta, que no es posible apreciar con el promedio, son las preguntas en las que no se observa una clara preferencia por la mayoría de los encuestados. Es decir, donde se observa una mayor dispersión. Profundidad de la excavación, mano de obra, uso final y tipo de

contrato, son los factores en que se pueden ver la mayor diferencia de opiniones. Esto puede ser indicio de que no se tiene una percepción clara de su importancia a nivel general y se requiere más investigación al respecto de estos temas para evaluar su importancia real.

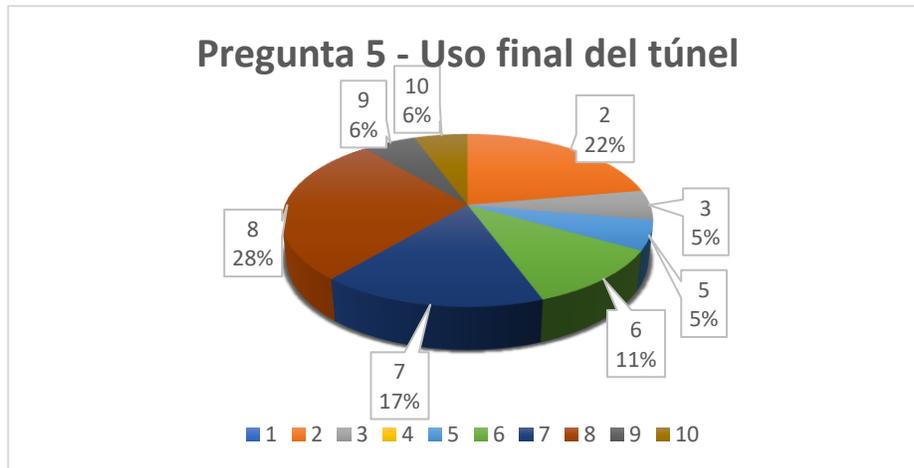


Ilustración 33. Porcentaje de votaciones recibidas para uso final, pregunta 5.

8.3. La exploración y su impacto en el costo

No existe un estándar aceptado para el número de sondeos, su espaciamiento, profundidad, etc. Cada proyecto debe ser evaluado por sus características y necesidades propias. A pesar de esto, existen algunas recomendaciones que a continuación se mencionan.

El comité de tecnología de túneles de Estados Unidos (U.S. National Committee on Tunneling Technology) realizó un estudio en 1984 para estudiar las prácticas de exploración en Estados Unidos para determinar si un mayor nivel de investigación geotécnica podría reducir el costo final de construcción de proyectos de túneles. Dentro de las conclusiones y recomendaciones del estudio para la investigación del sitio, se recomienda que el presupuesto para investigación geotécnica del sitio sea incrementado a un promedio de 3.0 por ciento del costo estimado del proyecto, para obtener mejores resultados. Se recomienda también que se aumenten los sondeos exploratorios a un promedio de 1.5 m lineales de sondeo por cada metro de ruta del alineamiento del túnel. Las conclusiones de este grupo de trabajo se resumen en los siguientes puntos por Parker (2004).

- Los gastos para exploración geotecnia del sitio debería ser incrementados a un promedio del 3% del costo estimado del proyecto, para mejores resultados globales.
- El nivel de sondeos exploratorios debe ser incrementado a un promedio de 1.5 metros lineales de sondeo por metro de ruta del alineamiento del túnel, para mejores resultados globales.

- Es en beneficio del cliente realizar una investigación del sitio eficaz y exhaustiva y después hacer una completa divulgación al licitante.
- Las cláusulas de responsabilidad en documentos contractuales son generalmente inefectivas en cuestión de derecho, además de ser inequitativas e intolerables en la mayoría de las circunstancias.
- El dueño debe hacer que toda su información geotécnica esté disponible a los licitantes, y al mismo tiempo debe eliminar las cláusulas de responsabilidad con relación en la precisión de la información o las interpretaciones.
- Todos los reportes geológicos deben ser incorporados como parte de los documentos contractuales.
- Los diseñadores de túneles convencionales deben de realizar un Geotechnical Design Report, que deberá abordar en las especificaciones y estar disponible para uso de los licitantes, el eventual contratista y el ingeniero residente.
- Monitoreo de las condiciones del entorno antes de la construcción para establecer una línea base de información para comparar durante y después de la construcción.
- Conferencias antes de la licitación y visitas al sitio de obra deberán de realizarse para asegurarse que todos los licitantes tengan acceso a la máxima cantidad de información del proyecto.
- Información geológica de exploraciones previas a la construcción, el mapeo del túnel as built y los procedimientos constructivos deben ser copilados en un reporte detallando la finalización del proyecto.
- Los métodos de investigación y predicciones deben ser mejoradas para tres condiciones específicas: esfuerzos in situ, tiempo de auto sostenimiento, y agua subterránea.
- Se deben desarrollar mejoras a las técnicas de sondeos horizontales que puedan recuperar núcleos de roca y penetrar largas distancias sin desviarse de la línea y la pendiente.

Harvey W. Parker (2004) en su artículo titulado Planning and site investigation in tunnelling, menciona que la cantidad de exploración realizada en cualquier proyecto es determinada por motivos de experiencia y presupuesto. Debido a que no existen estándares sobre la cantidad de investigación que debe realizarse, una aproximación y un curso de acción recomendado por Parker es dado a continuación.

Como los grandes proyectos demandan un mayor nivel del esfuerzo geotécnico, el primer paso es determinar si el proyecto en cuestión es un gran proyecto complejo, o un proyecto convencional. Esto determinará si el proyecto requerirá un alto nivel o un relativamente bajo nivel de esfuerzo geotécnico. Naturalmente algunos aspectos de investigación geotécnica son similares para todos los proyectos sin importar el tamaño de este. A continuación, se mencionan las

recomendaciones que son independientes de las dimensiones del túnel en cuestión.

- Determinar todas las necesidades generales y específicas para la exploración geotécnica, el análisis y el diseño. Determinar los parámetros geotécnicos necesarios y priorizarlos.
- Utilizar la experiencia geológica en la mayor medida posible.
- Realizar la exploración en al menos dos fases. La fase inicial debe contar con buen financiamiento para que se obtenga información geológica suficiente para seleccionar con confianza el alineamiento y para proveer un estimado inicial de los probables métodos constructivos, revestimiento y costos.
- Planear utilizar técnicas no tradicionales si pueden ser utilizadas de forma rentable.
- Tener un presupuesto fijo para cada fase de exploración, así como un fondo de contingencia.
- Tener sondeos de contingencia y otras técnicas de exploración que sean financiadas rápidamente y listas para ser aprobadas según los criterios predeterminados de manera oportuna para responder a preguntas técnicas resultantes del programa de sondeos inicial.
- No utilizar más contingencia de la necesaria.
- Obtener más información de la necesaria para el diseño. Obtener suficientes datos para poder estimar como se comportará el terreno con los métodos constructivos contemplados.
- Obtener suficiente información para minimizar la incertidumbre.
- No realizar ninguna exploración a menos que sea para satisfacer una necesidad genuina. Algunas veces la reducción de la incertidumbre es una necesidad genuina, pero se debe tener cuidado de ser realista sobre los posibles costos y beneficios.
- Realizar una fase de exploración de costos suplementaria después de que el alineamiento esté definido para confirmar el diseño y obtener información que el contratista necesita para estimar los factores como la velocidad de avance, etc. para estimar los costos y para presentar su oferta. El licitante debe sentirse seguro de que puede elegir un método constructivo de manera confiable y estimar los costos adecuadamente.

En la clasificación de los llamados grandes proyectos se incluyen los sistemas de metro, los grandes sistemas de drenaje, acueductos de gran longitud, túneles de gran diámetro, cavernas, etc. Proyectos de 4 metros o de mayor diámetro de excavación, o túneles de más de 300 m de largo se pueden considerar grandes proyectos. Las recomendaciones para determinar el nivel de esfuerzo geotécnico adicional para grandes o complejos proyectos son mencionadas a continuación.

- Desarrollar un programa multifase para cubrir las necesidades.

- Planear utilizar técnicas no tradicionales como geofísica, lumbreras, túneles piloto, pruebas de bombeo, etc. según sea conveniente, siempre que se demuestre que contribuyen significativamente a obtener información y reducir la incertidumbre.
- Para todas las fases de diseño, el presupuesto y alcance entre $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ de las recomendaciones del comité y tecnología de Estados Unidos para investigación del sitio, esto es la longitud de los sondeos de 0.75 a 1.2 veces la longitud del túnel, y el costo geotécnico en un rango de 1.5 a 2.25 por ciento de los costos de construcción.
- Tener un presupuesto de contingencia hasta completar el total invertido de 3% del costo de construcción.
- Considerar sondeos de contingencia y otras técnicas de exploración que sean financiadas rápidamente y listas para ser aprobadas para responder a las preguntas técnicas resultantes del programa inicial de sondeo. Idealmente podrían ser aprobados sondeos, sondeos profundos, u otras pruebas adicionales mientras que el equipo de perforación está aún en sitio para ahorrar el costo de removilización.

López Jimeno (1997) en *Manual de túneles y obras subterráneas*, menciona que resulta muy difícil precisar el número exacto de sondeos necesarios para obtener un grado de definición exigido. Considera que parece razonable realizar por lo menos un sondeo por cada portal de la excavación, y que el número restante de sondeos está en función de la dificultad de la obra. Resalta que resulta más interesante situar los sondeos basándose en criterios geológicos como el reconocimiento de zonas de falla, zonas cársticas etc. La experiencia indica que, para un túnel de dificultad media puede tomarse como criterio de orientación que la longitud acumulada de sondeos supere el 50% de la longitud del túnel.

De Technical manual for design and construction of road tunnels, se presentan las recomendaciones generales de AASHTO (1998) para determinar el espaciamiento de sondeos para proyectos de túnel.

Tipo de tunel	Condiciones	Espaciamiento típico (m)	Espaciamiento típico (ft)
Falsos	-	30 a 90	100 a 300
En roca	Condiciones adversas	15 a 60	50 a 200
	Condiciones favorables	150 a 300	500 a 1000
En Suelo	Condiciones adversas	15 a 30	50 a 100
	Condiciones favorables	90 a 150	300 a 500
Terreno mixto	Condiciones adversas	7 a 15	25 a 50
	Condiciones favorables	90 a 150	300 a 500

Tabla 2. Recomendaciones generales AASHTO AASHTO (1998) para determinar el espaciamiento de sondeos para proyectos de túnel.

Las recomendaciones de la tabla se pueden utilizar como un punto de partida para determinar el número y localización de los sondeos. Sin embargo, para un túnel largo a través de un área montañosa, debajo de un cuerpo de agua profundo, o dentro de un área urbana poblada, puede que no sea económicamente factible o que el tiempo no sea suficiente para realizar las perforaciones acordes a las recomendaciones.

Se señala además que los sondeos deben extenderse al menos a 1.5 veces el diámetro del túnel debajo de su nivel inferior.

8.3.1. Exploración en el TEO

El ejercicio desarrollado en este capítulo es ilustrativo tomando en cuenta los promedios recomendados para exploración. Los siguientes datos sobre este túnel fueron obtenidos de la página de la Conagua y de información proporcionada por ingenieros participantes del proyecto que contribuyeron para esta investigación. La longitud total del TEO es de 61.8 Km. El costo inicial estimado del TEO era de 12,000 millones de pesos y su costo final fue de 30,000 millones de pesos por lo que la obra tuvo un sobre costo respecto a su costo inicial de 18,000 millones de pesos, esto es un 150% de incremento.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los sondeos realizados en cada uno de los tramos de la obra.

Número de Sondeos	Tramo
32	Tramo 1
34	Tramo 2
40	Tramo 3
39	Tramo 4
40	Tramo 5
18	Tramo 6

Tabla 2. Sondeos del TEO por tramos.

En total para toda la obra se realizaron 203 sondeos. Para el análisis se supondrá un costo por sondeo de 2 millones de pesos, lo que resulta en un total de 406 millones de pesos. Considerando el costo final de la obra (30,000 millones de pesos), se obtuvo el porcentaje que significa el gasto en exploración estimado respecto al costo total. El porcentaje resultante de gasto en exploración respecto al costo total de la obra es del 1.35%. El gasto en exploración de este proyecto se resume en la información presentada en la tabla siguiente.

Costo por sondeo (millones de pesos)	\$2.00
Total de sondeos	203
Costo total sondeos (millones de pesos)	\$406.00
Porcentaje respecto al costo final total	1.35%

Tabla 4. Porcentaje de inversión en sondeos supuesto para el TEO.

8.3.2. Tren interurbano México Toluca

No se encontró información disponible sobre el costo final del bitúnel del tren interurbano México – Toluca. En una nota de la revista obras (<https://obras.expansion.mx/construccion/2018/08/16/tren-mexico-toluca-el-lado-oscuro-de-una-obra-necesaria>), se menciona que el presupuesto para el proyecto subió en 2018 a más del 50% inicial. Se considerará para realizar el ejercicio ilustrativo que el incremento en costo del túnel fue del mismo orden de magnitud de 50%.

Las cifras oficiales en la página oficial de la secretaria de comunicaciones y transportes SCT (<http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/transporte-ferroviario-y-multimodal/tren-interurbano-mexico-toluca/>) señalan que el precio original era de 44,559.40 millones de pesos, y que el incremento al 2017 resultaba en un costo total de 51,397 millones de pesos.

En la página T21 en una nota titulada “Tren México-Toluca iniciaría operaciones en 2023” del 22 de octubre del 2020 (<http://t21.com.mx/ferroviario/2020/10/22/tren-mexico-toluca-iniciaria-operaciones-2023>), se menciona que Gómez Parra, director general de Desarrollo Ferroviario y Multimodal, informó que a más de 4 años de haber comenzado su construcción, este proyecto presenta un avance general del 86% y tendrá una inversión aproximada de 90,000 millones de pesos, 52,000 millones de pesos más de lo presupuestado en 2013. Lo que correspondería a un incremento de más del 50%.

Considerando esto, se supondrá un incremento en el costo del bitúnel del mismo orden de magnitud, como ejemplo para el tema tratado en este capítulo.

La longitud total del del bitúnel es de 4.7 km y el costo inicial estimado de la obra fue de 2,855 millones de pesos. Como ya se mencionó, se desconoce el valor real del sobrecosto final, se supondrá para este análisis que este fue de un 50%, que equivale a un sobrecosto de 1,427.50 millones de pesos y a un costo final de 4,282.50 millones de pesos.

“Se ejecutaron 30 sondeos mixtos intercalando la técnica de avance controlado y muestreo continuo alterado mediante sistema Wireline aunado a la instalación posterior de un piezómetro doble tipo Casagrande.”¹⁰

De la tesis de Aarón Romero Pelayo y Francisco Cesáreo Mendoza León (2019), titulada Procedimiento Constructivo de Bitúnel para el Proyecto Tren Interurbano México-Toluca, se obtuvo la información de los sondeos realizados previos a la construcción de esta obra. En la tesis se menciona que se realizaron un total de 30 sondeos mixtos intercalando la técnica de avance controlado y muestreo continuo alterado. La tabla siguiente muestra el resumen de los sondeos realizados.

No.	Ubicación	Longitud sondeo (m)	Observaciones
1	36+200	30	Portal
2	36+200	30	Portal
3	36+200	25	Portal
4	36+400	35	
5	36+700	38	
6	36+860	52	
7	37+100	80	
8	37+200	85	
9	37+550	100	
10	37+840	130	Inclinado
11	38+150	200	Inclinado
12	38+280	170	Inclinado
13	38+440	140	Inclinado
14	38+660	95	
15	38+960	75	
16	39+060	75	
17	39+300	70	
18	39+450	70	
19	39+580	65	
20	39+640	65	
21	39+760	70	
22	39+960	67	
23	40+060	52	
24	40+200	45	
25	40+340	55	
26	40+480	75	
27	40+600	70	
28	40+740	35	Portal
29	40+800	25	Portal
30	40+820	25	Portal

Tabla 5. Sondeos del bitúnel del tren México - Toluca.

¹⁰ 30. Aarón Romero Pelayo y Francisco Cesáreo Mendoza León (2019), Procedimiento Constructivo de Bitúnel para el Proyecto Tren Interurbano México-Toluca, Facultad de Ingeniería UNAM.

Con la información disponible para este proyecto podemos obtener la longitud total de los sondeos que fue de 2149 m. Recordado la recomendación del Comité de tecnología de túneles de Estados Unidos, se propone realizar 1.5 m de exploración por cada metro de túnel. Para este caso si se hubiera decidido seguir esta recomendación se tendrían que haber realizado un total de 7.05 km de exploración, por lo que se hubiera necesitado de 4.9 km de sondeos de exploración adicional.

En total se realizaron 30 sondeos, y en este proyecto se supondrá al igual que en el caso del TEO un costo de 2 millones de pesos por cada sondeo. El porcentaje que representa el costo total en sondeos respecto al costo total del proyecto (4,282.50 millones de pesos) es del 1.4 %. En la siguiente tabla se resume el gasto en exploración supuesto.

Costo por sondeo (millones de pesos)	\$2.00
Total de sondeos	30
Costo total de sondeos (millones de pesos)	\$60.00
Porcentaje respecto al costo final total	1.40%

Tabla 6. Porcentaje de inversión en sondeos supuesto para el bitúnel del tren México – Toluca.

8.4. Comparativa de porcentaje invertido en exploración con porcentaje de sobrecosto.

Para la comparativa de los proyectos se utilizó la información de Clayton (2001) basada en los resultados de 51 casos de estudio en los que se estudió la relación del sobrecosto con el gasto invertido en la investigación del sitio. Clayton señala que en la investigación del sitio generalmente se invierte el 1% o incluso menos del total del costo del proyecto, en sus casos de estudio analizados. Señala que esto genera sobrecostos de más del 77%, y como se muestra en la gráfica siguiente, se considera que el porcentaje de inversión ideal en investigación del sitio esta entre un 5 – 6%, que contribuye a lograr un sobrecosto de menos del 10%.

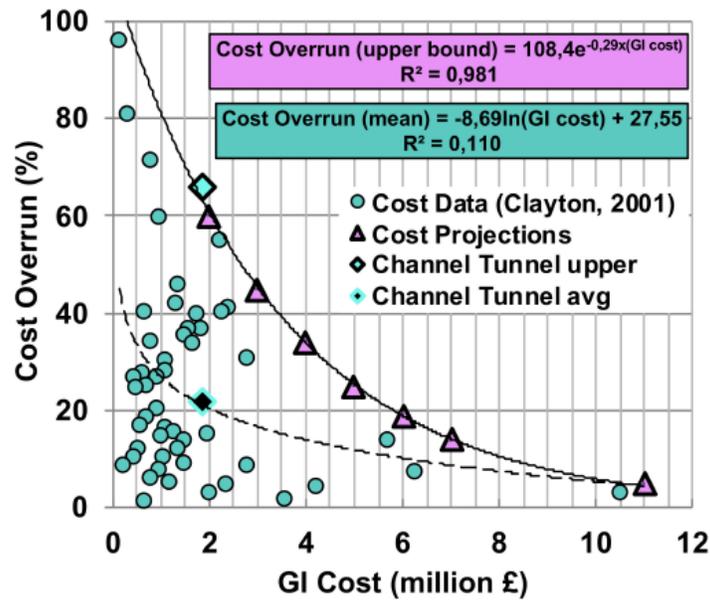


Ilustración 33. Gasto en exploración vs porcentaje de sobre costo, Paraskevopoulou y Boutsis (2020).

En el estudio de Paraskevopoulou y Boutsis (2020), tomaron los datos de Clayton y obtuvieron una ecuación que representa la línea de tendencia para el promedio de los datos, y también para el límite superior. Utilizando como punto de partida dichas ecuaciones, se comparó en una gráfica el sobre costo en los proyectos el TEO, el bitúnel del tren México-Toluca y el Eurotúnel. Se comenzó aplicando las ecuaciones del promedio y del límite superior para diferentes porcentajes de investigación in situ y obteniendo su correspondiente sobre costo. En la siguiente tabla se muestran los sobre costos correspondientes a diferentes porcentajes de gasto en investigación del sitio.

Fórmulas aplicadas;

$$\text{Cost overrun} = -8.69\ln(\text{GI cost}) + 27.55$$

$$\text{Cost overrun} = 108.4e^{-0.29(\text{GI cost})}$$

% Investigación	% Sobrecosto - Promedio	% Sobrecosto - Límite superior
1.00 %	27.6 %	81.11 %
2.00 %	21.5 %	60.69 %
3.00 %	18.0 %	45.41 %
4.00 %	15.5 %	33.98 %
5.00 %	13.6 %	25.43 %
6.00 %	12.0 %	19.03 %
7.00 %	10.6 %	14.24 %
8.00 %	9.5 %	10.65 %
9.00 %	8.5 %	7.97 %
10.00 %	7.5 %	5.96 %
11.00 %	6.7 %	4.46 %
12.00 %	6.0 %	3.34 %

Tabla 7. Resultado de las fórmulas de promedio y límite superior a diferentes valores de porcentaje de investigación.

Con los valores de la tabla anterior se graficaron las líneas de tendencia correspondientes al promedio y al límite superior. Los valores de sobrecostos y porcentaje de investigación del sitio para los proyectos estudiados se agregaron como puntos independientes, como se muestra en la gráfica siguiente.

Proyecto	% I	% Sobrecosto
TEO	1.35 %	150.0 %
Bitúnel tren Mex-Toluca	1.40 %	50.0 %
Eurotúnel	0.74 %	78.6 %

Tabla 3. Sobrecosto de los proyectos de estudio.

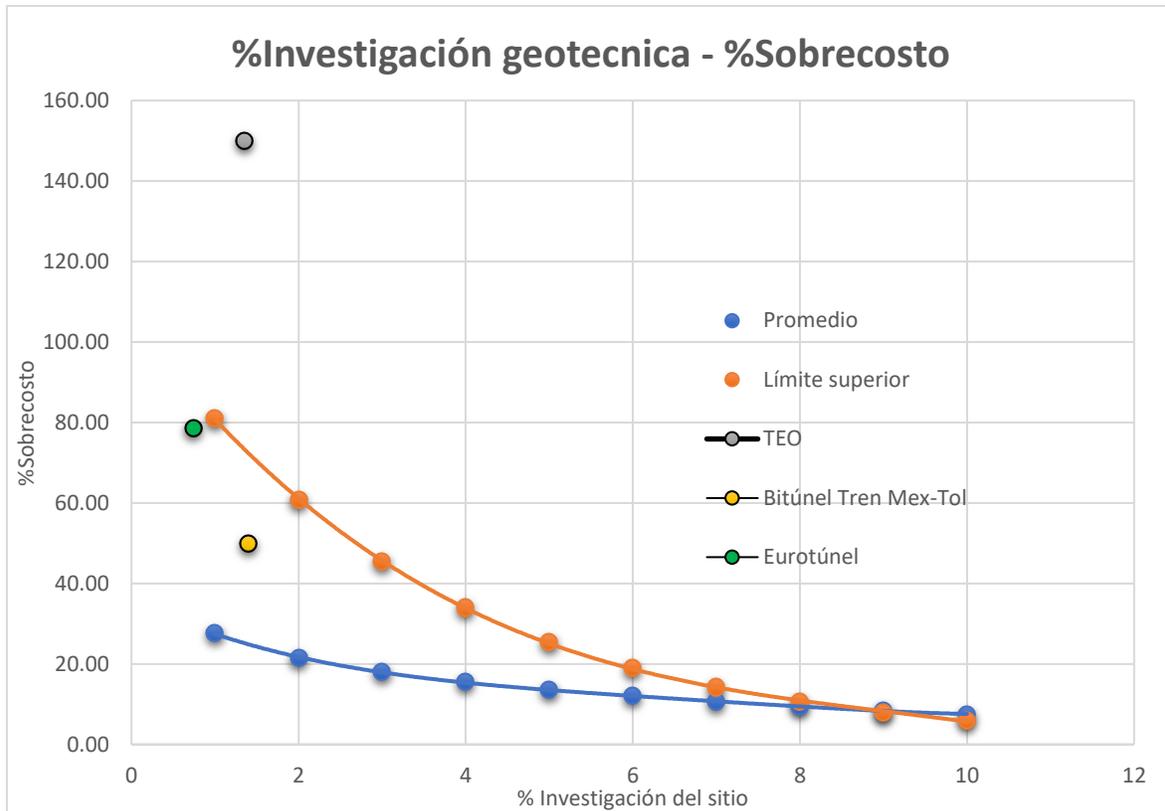


Ilustración 34. Porcentaje de sobrecosto contra porcentaje de investigación en sitio.

Los valores de los proyectos estudiados se encuentran por encima de los valores promedio, y los proyectos del bitúnel del tren México-Toluca y del Eurotúnel se encuentran más cercanos al límite superior. El caso del TEO se aprecia muy lejano al promedio, con un sobrecosto del 150%, muy superior a los casos estudiados por Clayton y posteriormente por Paraskevopoulou y Boutsis. Es probable que se haya tenido un estimado optimista en relación con el porcentaje de gasto supuesto de inversión en la investigación del sitio para los casos del TEO y del bitúnel.

¿Cuál hubiera sido el resultado con una investigación geotécnica exhaustiva?

Considerando la fórmula del límite superior del análisis, se muestra en la siguiente tabla cual hubiera sido el sobrecosto del bitúnel para diferentes porcentajes de gasto en exploración. Incluye también cual sería el costo de la investigación para cada porcentaje de gasto en exploración dado, tomándolo como porcentaje del costo total correspondiente. La columna de Ahorro considera cual sería la cantidad de dinero que se hubiera podido ahorrar al invertir más en la investigación del sitio y se calcula con el costo total con un sobrecosto de 50%, que es de 4,283 millones, menos el costo total correspondiente al sobrecosto calculado para cada renglón. En la última columna se agrega la diferencia entre la columna de Ahorro menos el costo por la investigación del sitio, lo que sería el ahorro neto. Se

recuerda que este es un ejemplo ilustrativo para resaltar la importancia de una campaña de investigación exhaustiva y no es posible asegurar que se hubiera logrado un ahorro de recursos en los ejemplos descritos.

% Gastado en Investigación	% Sobrecosto estimado	Costo Total (millones de pesos)	Costo Total de investigación (millones de pesos)	Ahorro (millones de pesos)	Ahorro menos Costo de investigación
1.4 %	50.00 %	\$4,283	\$60	\$0	-\$60
3.0 %	45.41 %	\$4,152	\$125	\$131	\$6
4.0 %	33.98 %	\$3,825	\$153	\$457	\$304
5.0 %	25.43 %	\$3,581	\$179	\$702	\$522
6.0 %	19.03 %	\$3,398	\$204	\$884	\$680
7.0 %	14.24 %	\$3,261	\$228	\$1,021	\$793
8.0 %	10.65 %	\$3,159	\$253	\$1,123	\$871

Tabla 4. Sobrecosto con diferentes porcentajes de gasto en investigación del sitio para el proyecto del bitúnel del tren interurbano México-Toluca.

8.5. Manejo contractual del riesgo en obras subterráneas

8.5.1. Los riesgos en las obras subterráneas

Los proyectos subterráneos son obras que son de larga duración en las que se tiene un programa de obras ajustado y en las que se invierten importantes cantidades de recursos. Generalmente estos proyectos son gubernamentales y se ejecutan con recursos públicos, lo que implica presupuestos limitados. Estas circunstancias lo vuelven blanco de decisiones políticas que pueden comprometer el desarrollo del proyecto. Las implicaciones sociales, no son menores, debido al interés que generan estas obras, la rendición de cuentas que exigen las personas, y la creciente participación de la ciudadanía en la toma de decisiones. A estos aspectos hay que agregarle las dificultades de los métodos constructivos que requieren equipos y personal especializado; los retos que se pueden afrontar en la excavación del terreno por condiciones imprevistas; y la posibilidad de que el proyecto y el diseño y sus consideraciones no sean adecuados.

Una de las implicaciones más importantes al analizar y estudiar las obras subterráneas son los riesgos a los que están expuestas. Al igual que en otras áreas, los proyectos de túneles requieren de un análisis de los riesgos a los que están expuestos, y sus medidas de mitigación y control. Los riesgos son particulares, no comunes en otro tipo de obras construidas en superficie, y que pueden llegar a ocasionar problemas de alto impacto para el proyecto. Algunos de los riesgos a los que están expuestas las obras de túneles son:

- Condiciones diferentes e incertidumbre geológica
- Ingreso de agua subterránea

- Falta de personal calificado
- Tipo de contratación
- Diseños inadecuados
- Procedimientos constructivos inadecuados
- Falta de recursos
- Falta de apoyo político
- Falta de apoyo social

Es necesario comprender las implicaciones de los riesgos y establecer medidas de mitigación y control para evitar, entre otras cosas, disputas entre las partes involucradas que afecten el desarrollo del proyecto. Uno de los medios necesarios para esto es el manejo contractual del riesgo.

8.5.2. Manejo contractual del riesgo

El objetivo del manejo contractual del riesgo es identificar y prevenir incidentes que sean un peligro o amenaza para el proyecto. La gestión del riesgo consiste en el empleo de acciones coordinadas para prevenir eventos no deseados que puedan acarrear consecuencias negativas.

Se busca reducir y mantener en un punto de control los riesgos de que los contratos entre las partes involucradas en el proyecto puedan no cumplirse idealmente, prevenir situaciones negativas y a la vez optimizar contratos con otras entidades, para establecer mecanismos que resulten atractivos para ambas partes y sobre todo en beneficio del proyecto.

En el sistema tradicional que se emplea por los abogados para enfrentar las amenazas de incumplimiento de contratos o controversias ha sido reactivo, enfocado en responder una vez que los sucesos negativos ya han ocurrido. En casos donde se establecen mecanismos de protección en los contratos, estos solo se aplican una vez que se han generado los prejuicios, lo que ya trae problemas que se pueden traducir en retrasos y sobrecostos. En este sistema tradicional no se atiende a los aspectos preventivos.

El enfoque propuesto por Tobias Mahler y Jon Bing en su artículo *Contractual Risk Management*, aborda el tema de otra forma. No se trata solamente de tener mecanismos para solucionar los problemas cuando ya han ocurrido, sino que busca integrar mecanismos de protección dentro de un sistema preventivo. Resaltan la importancia de la participación multidisciplinaria para la elaboración de contratos, en la que los expertos en proyectos de infraestructura y expertos en proyectos de túneles participen resaltando los puntos donde identifiquen probables riesgos de controversias, y compartan sus experiencias previas previendo cualquier problema que pudiera presentarse.

Aunque el uso de proyectos tipo es común para ahorrar tiempo, debe realizarse un análisis detallado de que no se dejen fuera las particularidades específicas requeridas para el proyecto en el contrato. Es necesario un análisis con el

suficiente tiempo para garantizar que no se tengan lagunas legales, aplicando técnicas similares a los análisis de riesgo de ingeniería, pero en este caso desde la perspectiva legal.

Según Mahler y Bing, el manejo contractual del riesgo debe ser considerada como una parte del manejo total del proyecto, esto porque se involucra con todas las áreas. Las herramientas para gestionar los riesgos incluyen en los métodos tradicionales, las siguientes actividades:

- Identificación de riesgos
- Establecimiento de mecanismos de solución según las leyes aplicables

En contraste con la metodología tradicional, se presenta el manejo de riesgos de manera proactiva, constanding de las siguientes actividades:

- Análisis de riesgos comerciales y no solo legales
- Se incorporan los riesgos en la redacción de los contratos
- Reducción o eliminación de los riesgos antes de que se presenten
- Establecer cláusulas en los contratos que prevean situaciones no reguladas legalmente
- Aplicación de modelos preventivos, que busquen evitar situaciones que podrían llevar a conflictos o incumplimientos

Los contratos deben incluir los aspectos que se refieren a lo estrictamente legal, pero también los asuntos no sujetos a una normativa específica, pero que son relevantes para las partes involucradas. Estos aspectos deben cubrir los riesgos no solo con el fin de responder al evento negativo, sino también enfocándose en la mitigación de sus efectos. En las obras subterráneas se incluye el geotecnical baseline report (GBR) como parte del contrato, marcando la línea base para los aspectos geotécnicos esperados en la ejecución de la obra, rendimientos, condiciones geotécnicas y consideraciones conformadas por toda la información geológica y geotécnica disponible, a la que los involucrados tienen acceso total previo al comienzo de los trabajos. Más adelante se abordará en el tema del GBR, debido a la importancia de su aplicación en las obras subterráneas y como herramienta del manejo contractual del riesgo.

▪ **Problemática**

Las disputas son uno de los grandes causantes de retrasos y sobrecostos en las obras subterráneas. Características geológicas y condiciones del terreno no consideradas y no consideradas en el proyecto, vacíos contractuales, malos proyectos, desconocimiento del cliente, entre otros, son el escenario perfecto para que se presenten desacuerdos que perjudican al proyecto.

Tarcisio Celestino, expresidente de ITA-AITES, menciona que a pesar de todos los desarrollos tecnológicos de equipos y técnicas en el campo muchos proyectos de construcción subterránea no tienen éxito debido a disputas contractuales.

Problemas que se presentan en el proyecto y lo afectan por complicaciones contractuales tienen también efecto directo al costo de las obras subterráneas. Existe una relación entre todos los factores de estos complejos proyectos. Cuando se presenta un problema que afecta la construcción en el frente de excavación, se pueden producir retrasos, esto encarecerá la ejecución de los trabajos y provocará cambios en el programa de obra. A su vez producirá reclamos por parte del cliente al contratista por no tener el rendimiento esperado; y viceversa del contratista al cliente por las situaciones inesperadas en las que demandará un pago mayor por las dificultades presentadas. El personal puede quedar detenido unos días hasta que definitivamente se detenga la obra. El problema puede ya en estas instancias puede requerir la solución por parte de organismos gubernamentales. Esto pueden comprometer aún más la estabilidad del proyecto, ya que difícilmente los encargados de dictaminar una solución en ese caso se den el tiempo suficiente para conocer las implicaciones del proyecto, lo que puede provocar decisiones que perjudiquen en lugar de beneficiarlo. El proyecto en el peor de los casos puede terminar cancelado, dejando los trabajos sin terminar y representando un gasto para toda la sociedad, en la que se seguirá pagando por procedimientos legales y litigios que pueden durar por años.

Cuando varias de las situaciones desfavorables se presentan es el escenario perfecto para el fracaso de los proyectos. Prioridades ajenas a los aspectos técnicos, la carencia de conocimiento y capacitación por parte de los equipos técnicos, contratos y convocatorias ajenas a los problemas subterráneos, la falta de estudios necesarios y de mecanismos de solución de controversias se pueden señalar como los aspectos determinantes que favorecen a los problemas contractuales.

Al artículo *Manejo contractual del riesgo en Proyectos Subterráneos en México: Una aproximación Meta-Contractual*, de Roberto Hernández (2016) señala de manera clara algunos de los factores que provocan problemas en el ámbito contractual de las obras subterráneas, se transcriben a continuación:

- a) Los equipos técnicos y legales de los Dueños de las Obras se ven obligados a someterse a las prioridades políticas y administrativas de los proyectos, haciendo a un lado la viabilidad técnica y legal de estos últimos con consecuencias nefastas
- b) En algunos casos, falta de conocimiento y de capacitación de los equipos técnicos de los Dueños de la Obra, por no tener experiencia específica en los proyectos, o por haber sido ubicado en sus posiciones no por sus capacidades técnicas, sino por otros factores
- c) Desarrollo de convocatorias (bases de licitación) y modelos de contrato, aparentemente apegados a las leyes aplicables, pero ajenos a los problemas específicos de los proyectos subterráneos, dejando en manos

del contratista futuro, la resolución de todos los temas que, siendo inclusive previsible, son trasladados al contratista en su mayoría, para evitar responsabilidades administrativas y contractuales

- d) Adjudicaciones a empresas que, aun no teniendo suficiente capacidad y experiencia, son seleccionados por falta de capacidad técnica para evaluar por parte de las dependencias o entidades, o en el peor de los casos, por falta de integridad de las convocantes ante procedimientos de contratación irregulares y poco transparentes
- e) Uso de modelos de contrato estándar que no contienen las mejores prácticas de la industria y por lo tanto no adecuados a la realidad de proyectos subterráneos
- f) Falta de estudios suficientes o no confiables para el desarrollo del proyecto, lo que sumado a los elementos indicados en los incisos c) y e) anteriores, hacen incurrir al contratista en errores problemas que posteriormente son motivo de conflicto e interrupción de los proyectos
- g) Falta de mecanismos efectivos de solución de controversias para este tipo de proyectos

La solución a este tipo de conflictos es la elaboración de contratos con mecanismos sofisticados de solución de problemas, con medidas preventivas ante las distintas circunstancias que se pueden presentar. Se requieren previsiones contractuales adecuadas para que contratante y contratista puedan llegar a un acuerdo en el menor tiempo posible realizando las modificaciones pertinentes a la planeación original de los trabajos.

Es necesario aplicar nuevas metodologías de solución de controversias en los siguientes proyectos de obras subterráneas, y mejorarse en cada proyecto. Así como en áreas de procesos constructivos e instrumentación se presentan innovaciones durante el desarrollo de grandes proyectos, de la misma manera es necesario aprovechar la oportunidad para desarrollar, innovar y mejorar metodologías de solución de controversias y de riesgos contractuales.

La participación ciudadana y la transparencia son cada vez más importantes. Proyectos con total transparencia hacen que las personas estén más cerca de los proyectos, se sientan parte de él y entiendan de cierta forma sus implicaciones. Además, se evita que se realicen prácticas que beneficien a terceros ajenas a los intereses en beneficio del proyecto. En este aspecto también es importante delimitar los alcances de la participación ciudadana, y que no se afecten los objetivos del proyecto.

▪ **Actualidad**

Uno de los esfuerzos más recientes por afrontar el reto contractual de las obras subterráneas es el Libro Esmeralda: Condiciones de contrato para obras subterráneas (Emerald Book), producido por la Federación Internacional de Ingenieros Consultores (FIDIC) y la Asociación internacional de Túneles (ITA). Fue lanzado en el congreso mundial de Túneles de Nápoles en 2019. El libro es resultado del trabajo de un grupo formado por representantes de FIDIC e ITA, que identificaron varios problemas que los contratos deberían abordar para promover la asignación equitativa del riesgo y el tratamiento efectivo de las condiciones típicamente imprevisibles en los proyectos subterráneos.

Áreas que aborda:

- Asignación de riesgos
- Divulgación de toda la información geológica y geotécnica disponible
- Inclusión de una línea de base geotécnica contractual (GBR)
- Inclusión de una cláusula personalizada de “Condiciones físicas imprevistas”
- Implementación de un sistema de clasificación de suelo y de soporte en condiciones particulares que reflejen adecuadamente el esfuerzo de excavación y estabilización
- Resaltar la influencia de las condiciones del terreno en el tiempo de ejecución
- Provisión de un mecanismo flexible para la remuneración de acuerdo con las condiciones del terreno, previsto e imprevisto

Los puntos anteriores son temas obligados a considerar en contratos de para obras subterráneas, de su correcta implementación depende la estabilidad contractual de la obra.

Los riesgos deben ser equitativos entre el cliente y el contratista, generalmente con el cliente asumiendo ciertos riesgos de condiciones no esperadas que se puedan encontrar y el contratista asumiendo los riesgos de producción de obra. Los riesgos en situaciones no esperadas que el cliente tomará se refieren al probable aumento de costos de excavación o sostenimiento por condiciones difíciles que requieran de una mayor inversión. Esta posibilidad debe estar bien definida en contrato, siendo lo más específico posible respecto a las condiciones, el proceso de excavación a seguir, su costo, y el sostenimiento y revestimiento necesario, siempre teniendo como base las implicaciones técnicas del GBR.

Es importante que se tengan medios flexibles que permitan la continuidad de la construcción, y que se realicen las modificaciones necesarias de manera rápida, sin perjudicar el programa de obra. Aun con esto, la experiencia ha demostrado que por más detallados que sean los contratos, para el caso de los que involucran obras complejas y de larga duración, suelen aparecer problemas imprevistos; a

esto los economistas lo llaman “teoría de los contratos incompletos”. De lo anterior se desprende que la elaboración de un contrato detallado nunca es suficiente para mitigar los problemas asociados a este tipo de obras, por lo que se requiere de herramientas adicionales como el arbitraje (Lombardo A. y Pérez J. 2016). Las ventajas de dicha herramienta radican en la capacidad de resolución de controversias contractuales en obras de alta especialidad ya que considera la participación de un experto neutral que dedica el tiempo necesario para la resolución de la disputa, a diferencia de los tribunales que tienen tiempo y capacidades limitadas para conocer las controversias. Cabe mencionar que el derecho arbitral recoge la experiencia de tribunales internacionales que han fomentado la homologación de los procedimientos, lo que permite la implementación de soluciones eficientes y confiables evitando así los voluminosos regímenes procesales y burocráticos. Por tanto, su implementación en la solución de controversias evita engaños y genera confianza en el juzgador.

8.5.3. Geotechnical Baseline Report

- ***Antecedentes***

Durante la época de 1970 y 1980 se continuaba el auge de las viejas prácticas de resolver reclamos y controversias de los proyectos de obras subterráneas por la vía de los juicios, y se comienza a reconocer que se requiere un cambio en los medios y formas de solución.

En 1972 la autoridad del Área Metropolitana de Transito de Washington reconoció la importancia de describir las condiciones del subsuelo que los contratistas deberían considerar al preparar sus ofertas para los contratos de túneles para el metro de Washington D.C. Se decidió plantear esto en un reporte independiente y como parte de los documentos contractuales.

En 1984 el Comité Nacional para la Tecnología de Túneles de Estados Unidos (UNSC TT) publicó un reporte titulado *Investigaciones geotécnicas en sitio para proyectos subterráneos*. En este reporte se presentan una serie de recomendaciones para reportes interpretativos geotécnicos.

Entre 1989 y 1991 el Consejo de Investigación de Tecnología Subterránea (UTRC) publicó dos versiones de un folleto titulado *Evitando y Resolviendo Disputas en Construcción Subterránea*. Ambas ediciones contenían una sección en la que discutían los objetivos y contenido de los reportes interpretativos geotécnicos.

Estas primeras propuestas tienen origen con el objetivo de evitar controversias y mejorar su solución. Se tiene la intención de mejorar las practicas contractuales.

Históricamente algunos profesionales preparaban el geotechnical data report (GDR), que incluye únicamente información factual como la longitud de sondeos y los resultados de las pruebas de campo y de laboratorio. Las interpretaciones y predicciones del comportamiento de los materiales del terreno se dejaban a los

licitantes. Otros profesionales del área incluían sus interpretaciones en documentos contractuales, separado del GDR o en el mismo documento.

En 1990 se sugirió que al reporte interpretativo geotécnico se incluyera en un documento contractual que se llamaría geotechnical baseline report. Como continuación de la publicación de 1991, el Comité Técnico en Reportes Geotécnicos del Consejo de Investigación de Tecnología Subterránea (UTRC), publicó el libro titulado geotechnical baseline reports for underground construction, estableciendo las pautas y prácticas para la preparación de esos reportes.

El propósito inicial del reporte geotécnico interpretativo fue ayudar a los contratistas a desarrollar sus propias interpretaciones de la información. Precisamente el aspecto crítico es como el contratista aborda el tema de las condiciones esperadas del terreno. El geotechnical baseline report (GBR) debe incluir los asuntos constructivos como su enfoque principal, las bases del diseño pueden ser abordadas, pero son secundarias en este documento. Esto establece un enfoque claro del porque es preparado el reporte, como usarse y como debe ser escrito.

- ***Actualidad del baseline report***

Los documentos contractuales tienen la intención de definir y controlar la construcción de la obra. Como se ha mencionado en este capítulo, en las obras subterráneas es necesario que todos los involucrados estén enterados de los riesgos y las incertidumbres propias de estos proyectos, y que comprendan sus implicaciones. Se requiere que toda la información geológica, geotécnica y geohidrológica con la que se cuente sea presentada, con su interpretación y comentarios. El modelo geológico y geotécnico debe ser incluido, además se describen las consideraciones para el diseño de la obra y con propuestas para la metodología constructiva que se considera adecuada para las condiciones, el sostenimiento y revestimiento requerido, y los rendimientos esperados de excavación y de ejecución de obra. Para presentar toda esta información como parte del contrato, se elabora el geotechnical baseline report o GBR.

Los análisis para baseline report, deben considerar la información técnica disponible previa a la construcción y establecer un estudio cuyo objetivo verse en la optimización del diseño de las estructuras, el procedimiento de excavación y, a partir de ello, sentar las bases de la distribución del riesgo financiero de la obra. (Lombardo A. y Pérez J. 2016).

▪ **Objetivos**

El principal objetivo del geotechnical baseline report es establecer en términos claros las líneas base para las condiciones que se anticipa serán encontradas durante la construcción subterránea, y por lo tanto proveer a todos los licitantes una única interpretación contractual en la que pueden confiar para preparar sus ofertas. Otros objetivos del GBR son (ASCE 2007):

- Presentar las consideraciones geotécnicas y de construcción que forman las bases de diseño para los componentes subterráneos y para los requerimientos específicos que puedan ser incluidos en las especificaciones
- Mejorar la comprensión del contratista de las restricciones clave, y los requerimientos importantes en los planes del contrato y las especificaciones que se necesitan identificar y abordar durante la preparación de la licitación y la construcción.
- Asistir al contratista o al equipo Diseño-Construcción en la evaluación de los requerimientos de excavación y soporte del terreno.
- Guiar al contratante en la administración del contrato y monitoreo del desempeño durante la construcción.

La información técnica preliminar de un proyecto y el impacto de ésta sobre su desarrollo se desenvuelve típicamente durante la fase de diseño, sin embargo, poco de ésta se documenta en el contrato lo cual no permite la designación clara de las responsabilidades para cada una de las partes. En dichas condiciones, el contratista no puede identificar las implicaciones técnicas del proyecto, por lo que puede incurrir en interpretaciones muy optimistas que, al no cumplirse, repercuten en reclamos hacia el contratante por circunstancias no previstas. La elaboración oportuna de dicho reporte y su incorporación al contrato representa un elemento adicional para la definición de las responsabilidades de cada parte, lo cual se realiza mediante una aproximación preliminar de la caracterización de los materiales que definen al trazo y, por ende, también al comportamiento de la excavación (Lombardo A. y Pérez J. 2016).

La predicción y confiabilidad del baseline está relacionado con la exhaustividad de la investigación geotécnica, que depende a su vez del tiempo y costo que se invierta. Más tiempo y más dinero brindarán de mayor certeza las interpretaciones de la línea base. Con esto el dueño del proyecto debe reconocer que las líneas base contractuales representan únicamente una interpretación de las condiciones subterráneas, desarrolladas a partir de la información disponible.

▪ **Contenido del documento**

Las condiciones en las que se trabaja en las obras subterráneas implican un alto grado de incertidumbre geológica, que se puede traducir en contratiempos, la necesidad de un replanteo del método constructivo, sobrecostos y disputas. Con el

conocimiento previo y mutuamente aceptado del GBR por parte de los interesados, la conciliación se vuelve más sencilla. La previsión contractual por medio de cláusulas de circunstancias inesperadas, pero en los que es imposible determinar su ocurrencia previa a la excavación, es una medida de control adecuada, e incluso obligada, para el manejo del riesgo.

El contenido del GBR incluye (ASCE, 2007):

- Información general del proyecto: Nombre, dueño, equipo de diseño, propósito, contenido, precedentes contractuales, limitaciones.
- Descripción del proyecto: Localización; tipo de proyecto y propósito; resumen de las características claves del proyecto; referencias a especificaciones y planos (para evitar repetir información de otros documentos contractuales).
- Fuentes de información geológica y geotécnica: Descripción de la configuración geológica y agua subterránea; descripción del sitio y campañas de exploración; condiciones topográficas superficiales y urbanizaciones que afectan el diseño del proyecto; perfil geológico a lo largo del alineamiento del túnel señalando la localización de los sondeos realizados.
- Experiencias constructivas previas: Proyectos cercanos relevantes; características de proyectos anteriores con enfoque en métodos de excavación, comportamiento del terreno, condiciones de agua subterránea y métodos de soporte del terreno; resumen de los problemas durante su construcción y como se superaron.
- Características del terreno: Características físicas y particulares de cada unidad del suelo o roca; condiciones del agua subterránea; resultados de pruebas de campo y de laboratorio; presencia de boleos u otras obstrucciones; valores de permeabilidad del suelo; interpretaciones de las propiedades de macizos rocosos que puedan ser relevantes para la capacidad de excavación.
- Consideraciones de diseño: Descripción de los sistemas de clasificación de suelo utilizado; criterios y metodologías utilizadas; consideraciones de comportamiento del entorno; la forma en que los diferentes requerimientos de soporte se han desarrollado para diferentes tipos de terreno; justificación de la instrumentación necesaria para monitoreo del comportamiento del terreno.
- Consideraciones constructivas: Comportamiento esperado del terreno ante las operaciones de construcción para cada unidad de suelo y roca; secuencias requeridas de construcción; dificultades constructivas específicas esperadas; justificación para los requerimientos en caso de restringir medio y métodos constructivos; justificación detrás de las técnicas de mejoramiento de terreno y métodos de control de agua subterránea;

identificación de fuentes potenciales de retrasos (ingresos de agua subterránea, fracturas o fallas, boleos, obstrucciones, etc.).

El contenido es robusto, cargado de información importante de la que se desprenden las consideraciones tomadas a partir de la interpretación de la información geotécnica y para la aplicación en la construcción del proyecto. Entender las condiciones esperadas del terreno mostradas en los perfiles geológico y geotécnico, y las consideraciones utilizadas para el diseño de los métodos constructivos, permite a los participantes en las licitaciones partir de unas mismas bases para realizar sus propuestas. También, durante la ejecución de la obra relacionar lo observado al frente de excavación con lo esperado en toda la longitud de la obra y tomar las medidas necesarias para la ejecución de cada tramo según sus complicaciones particulares. Además, contiene los aspectos relevantes que han dejado las experiencias previas de construcción.

En la perspectiva de los distintos actores, el GBR permite (Lombardo A. y Pérez J. 2016):

- Al contratista: sentar las bases de diseño para el correcto planteamiento del costo estimado de la construcción, incluyendo la previsión sobre posibles contingencias que determinen costos adicionales al proyecto.
- Al contratante: anticipar los riesgos asociados al proyecto y, sobre estos, administrar el contrato y evaluar el desempeño del contratista durante el desarrollo del proyecto.
- A todos los involucrados: Sentar las bases de diseño asociadas a la construcción subterránea, comprenderlas y definir claramente las restricciones asociadas a los procedimientos.

Por último, es importante aclarar la diferencia entre el proyecto ejecutivo y el GBR. El proyecto ejecutivo de construcción es la solución constructiva del proyecto representada gráficamente con un conjunto de planos y especificaciones, mientras que el GBR es el documento que incluye las interpretaciones geotécnicas de la información disponible y de las que se desprenden las consideraciones para la propuesta de los métodos constructivos necesarios para la ejecución de la obra. Lo mostrado en el proyecto ejecutivo tiene su justificación en las interpretaciones de las líneas base del GBR.

8.5.4. Dispute Boards

Entre las propuestas para la solución de controversias en grandes proyectos de infraestructura están los dispute boards, que ya se han aplicado internacionalmente en proyectos como el Aeropuerto de Hong Kong; el proyecto hidroeléctrico de Ertan en China; el proyecto del Eurotúnel en Reino Unido y Francia; el túnel de Eisenhower en Colorado, Estados Unidos; la autopista de

Mount Baker bridge en Washington; el túnel de Chambers Creek en Washington, el proyecto de la Central Hidroléctrica el Cajón, en Honduras (Figueroa, 2006) .

Un dispute board es un órgano permanente compuesto por una o tres personas normalmente participando en la firma o el comienzo de ejecución de un contrato a mediano o largo plazo para evitar cualquier diferencia o conflicto entre las partes participantes durante el contrato. Comúnmente se usa en proyectos de construcción, en donde son utilizados ampliamente internacionalmente, aunque también son efectivos en otras áreas incluyendo desarrollo, propiedad intelectual, acuerdos de accionistas y de producción compartida.

El grupo del dispute boards está formado expertos encargados de conciliar objetivamente las disputas generadas durante el proyecto, anteponiendo el beneficio del proyecto. El objetivo principal de los Dispute boards es solucionar las controversias que surjan durante la ejecución del proyecto y evitar que escalen a niveles de arbitrajes o juicios. En proyectos de obra subterránea donde el grado de incertidumbre geológica es alto, es especialmente útil, porque es común que se presenten situaciones de conflicto. Desde el principio del proyecto se establece uno o tres expertos en la especialidad. Regularmente pueden ser ingenieros o abogados que tengan experiencia en proyectos de construcción de obras similares.

▪ ***Funciones y atribuciones***

Los dispute boards son un panel permanente que se constituye al inicio del contrato antes de ejecutarse el proyecto. Es necesario que las partes involucradas incluyan una cláusula del dispute boards en su contrato. La ventaja de su constitución temprana es que los miembros del panel se mantienen informados del proyecto y su desarrollo desde su inicio. Así cuando una disputa se produce el panel está operando y conoce la situación del proyecto, lo que le permite resolver el problema oportunamente.

El dispute board debe de conocer el contrato y el proyecto en su totalidad. Debe de estar atento a su ejecución y emitir a solicitud de las partes recomendaciones como tercero neutral para el desarrollo del proyecto siempre privilegiando su ejecución y continuidad como tercero imparcial. Si durante la ejecución del proyecto, una de las partes tiene un conflicto con la otra parte, cualquiera de ellas puede someter el caso al dispute board para que lo resuelva e impedir interrupciones en los flujos de efectivo o de la ejecución oportuna del proyecto (Hernández, 2016).

Dependiendo del tipo de dispute board, las resoluciones del dispute board son obligatorias y vinculantes. Lo importante es que resuelven el tema en forma inmediata y permiten que el proyecto tenga continuidad.

Las reglas de dispute boards de la ICC (International Chamber of Commerce) consisten en un conjunto completo de disposiciones para el establecimiento y funcionamiento de un dispute board. Cubren aspectos tales como la designación del miembro de la junta de diferencias, los servicios que prestan y la compensación que reciben. Desde su introducción en 2004, estas reglas han sido ampliamente utilizadas en todo el mundo. En 2015 las reglas fueron revisadas para sintonizarse a la práctica y las exigencias modernas (International Chamber of Commerce).

Hoy en día, la experiencia internacional nos muestra que los Dispute Boards son el recurso idóneo para enfrentar adecuadamente los proyectos de todo tipo, pero particularmente los subterráneos, que nunca están exentos de problemas.

Existen tres funciones básicas de los dispute boards para enfoques tanto informales como formales de las desavenencias. Al percibir un desacuerdo potencial el dispute board puede:

1. Alentar a las partes involucradas a resolver el problema por sí mismos sin la ayuda del dispute board.
2. Si esto no es posible o el problema permanece, el dispute board puede intervenir con ayuda informal o formal para tratar de ayudar a las partes involucradas por medio de un acuerdo, o
3. resolver una disputa a través de una recomendación o una decisión emitida después de un procedimiento de derivación formal.

Cada una de estas funciones es igual de importante para ayudar a reducir el riesgo y costo de la cancelación del contrato.

La asistencia informal debe realizarse por parte del panel ante toda discrepancia que pueda ocurrir durante la ejecución del contrato. Esta asistencia puede ser una conversación entre el panel y cualquiera de las partes, la expresión informal de los puntos de vista de los miembros del panel, una nota escrita del panel dirigida a las partes, o en general cualquier tipo de asistencia que pueda ayudar a resolver una diferencia y con el objetivo de lograr un acuerdo.

En ausencia de un acuerdo entre las partes, según las reglas de la Cámara Internacional de Comercio (ICC) existe un procedimiento para iniciar un proceso formal. El procedimiento comienza cuando alguna de las partes presenta un requerimiento escrito dirigido a la otra parte y al dispute board, en el que se debe de incluir la descripción clara y concisa de la disputa, una lista de los temas sometidos a la determinación del panel, cualquier prueba que sirva de fundamento y con petitorio que indique que se somete a la determinación del dispute board. La otra parte tiene un plazo de 30 días después de la presentación del reclamo para

presentar una contestación, debe ser clara y concisa, y de igual manera presentar documentos de sustento. Después el dispute board programa una audiencia con las partes en un plazo de 15 días después de recibida la contestación del reclamo. La audiencia oral da oportunidad a las partes de verificar que los miembros del dispute board han comprendido completamente la disputa sometida a determinación, y aclarar o complementar cualquier información necesaria. El procedimiento finaliza cuando el dispute board emite su determinación dentro de un plazo de 90 días contados desde el inicio del procedimiento.

▪ ***Tipos de dispute boards***

Existen tres tipos de dispute boards, que se distinguen por el tipo de conclusión que emiten en una deliberación (International Chamber of Commerce, 2015):

- Dispute adjudication board (DAB) dictan decisiones que deben acatarse de forma inmediata.
- Dispute review boards (DRB) dan recomendaciones que no son vinculantes de inmediato para las partes involucradas, pero que pueden serlo si ninguna de las partes involucradas se opone a ellas en un plazo de 30 días.
- Combined dispute boards (CDB) ofrecen una solución intermediaria entre la recomendación de DRB y la decisión del DAB. Estos comúnmente hacen recomendaciones por si una parte lo solicita y ninguna otra parte se opone, o si el dispute board así lo decide basándose en los criterios establecidos previamente en el reglamento. Hay una obligación contractual para cumplir con las recomendaciones y decisiones cuando se requiere.

▪ ***Uso***

Los dispute boards son un método de solución de controversias que ha demostrado ser muy efectivo para evitar que las obras se detengan o lleguen a los tribunales. De acuerdo con cifras de la Cámara Internacional de Comercio (ICC), 85% de las partes aceptan las decisiones del panel sin recurrir al arbitraje o a un juicio.

Su implementación en México ha sido escasa, mientras que en otros países de Latinoamérica ya se incluye a la figura de los dispute boards en leyes de obras públicas.

El abogado Dante Figueroa señala en su *artículo Dispute Boards for Infrastructure Projects in Latin America: A New Kid on the Block* (2017), que los paneles técnicos "son eficientes pues representan menos de 0.2% del costo total del proyecto".

¿Cuál podría ser el ahorro en un proyecto al invertir el 0,2% en un dispute board? Evidentemente depende de la magnitud de la controversia y sus consecuencias en el tiempo que se detenga la obra, costos derivados etc. En un estudio realizado

por el U.S. National Committee on Tunneling Technology (1984) se señala que los gastos por reclamaciones en obras subterráneas son en promedio del 12%, por lo que valdría la pena invertir un 0.2% en mejorar la solución de controversias y evitar que escalen a costosas consecuencias. La cifra de 12% en gastos por reclamaciones es aún más impactante al compararla con la inversión en estudios de investigación del terreno es en promedio menos del 3%.

Para una correcta aplicación de los dispute boards los expertos en temas contractuales como los abogados citados en el presente artículo, coinciden en que es necesario incluirlos en la ley de obras públicas. En la reforma de la ley de obras públicas de México de 2017 se propuso incluir a las dispute boards, pero al final no fueron incorporados. Está demostrado en proyectos internacionales que el método funciona, su no implementación sorprende analizando los múltiples beneficios que ofrece. Incorporarlo al sistema de construcción en nuestro país es un importante paso hacia un mejor manejo contractual de los grandes proyectos en México.

Los costos promedio en proyectos de obras subterráneas por controversias son del 12% del costo de la obra (U.S. Tunneling Committee). Evitar las controversias en los proyectos significará un ahorro inmenso para el proyecto comparándolo con los gastos en tiempo, abogados y juicios.

La cláusula de condiciones de sitio diferente debe ser siempre incluida como un estándar en las condiciones o previsiones generales de un contrato que envuelve la construcción subterránea. Se deben propiciar los medios para que se puedan realizar los cambios necesarios en el diseño y los métodos constructivos. Se requiere un sistema flexible, que permita la constante retroalimentación con las líneas base GBR y las condiciones encontradas al frente de la excavación.

La línea base muestra la información disponible y las predicciones de las condiciones esperadas. La precisión de la información, su correcta elaboración y contenido, dependen totalmente de la exhaustividad de la campaña exploración y de estudios previos. La interpretación de las líneas base a través de suposiciones realistas resulta en un menor costo global de la obra.

Generalmente se considera que las condiciones anticipadas en las bases de licitación son el riesgo que asumirá el contratista y las que consideraciones que están fuera de las bases serán riesgo del cliente. Se deben manejar condiciones y clausulas para la situación en que las condiciones esperadas del terreno sean diferentes a las estipuladas en las bases, dejando claro y lo más detallado posible, de manera que ambas partes estén conformes y se evite cualquier clase de discusiones y malentendidos al respecto.

8.6. Análisis del costo de túneles

Buscando reducir el riesgo de estimados de costos poco realistas es recomendado investigar los costos globales de proyectos comparables y examinar la composición de costos de esos datos comparables (Wagner Harald, 2006). Estas aproximaciones de costos son útiles para obtener un costo estimado para el trabajo, pero estos costos preliminares no deben ser utilizados para desarrollar una estimación de costos real.

Para realizar un análisis histórico del costo de túneles, se ha recopilado la información de veintidós proyectos realizados en distintos países. Seis de los proyectos corresponden a túneles construidos en México. Los proyectos estudiados son túneles excavados con diferentes métodos y para distintos usos. En general la información que se encuentra disponible es escasa e incompleta.

La información que se buscó de cada uno de los proyectos fue la siguiente:

- Nombre del proyecto,
- Uso final,
- País,
- Geología,
- Método de excavación,
- Sostenimiento utilizado,
- Revestimiento,
- Longitud,
- Costo,
- Fecha de inicio y termino de construcción,
- Área de la sección transversal de excavación,
- Volumen de excavación total,
- Costo por Km,
- Costo por m,
- Y costo por m³.

Las fuentes de información de las que se obtuvieron los datos se mencionan más adelante en la sección de bibliografía. La tabla siguiente muestra los túneles de los que se ha logrado obtener información y con los que se ha trabajado para el análisis.

No.	Proyecto	Uso	País
1	Legacy Way	Carretera	Australia
2	Túnel emisor oriente TEO	Drenaje	México
3	Túnel emisor poniente II TEP II	Drenaje	México
4	Macrotúnel	Carretera	México
5	Túnel Guamuchil	Carretera	México
6	Túnel Paso del Jaguar, Túnel las Truchas y Túnel paso del Puma	Carretera	México
7	Túnel compostela	Carretera	México
8	Túnel El Sinaloense	Carretera	México
9	Túnel de La Línea	Carretera	Colombia
10	Túnel Laerdal	Carretera	Noruega
11	Túnel de Zhongnanshan	Carretera	China
12	Túnel de Oriente	Carretera	Colombia
13	Eurotúnel	Ferrocarril	Francia-Inglaterra
14	Túnel San Gotardo	Ferrocarril	Suiza
15	Túnel Seikan	Ferrocarril	Japón
16	Túnel Yulhyeon	Ferrocarril	Corea
17	Túnel Lötschberg	Ferrocarril	Suiza
18	Túnel Guadarrama	Ferrocarril	España
19	Túnel Lo Prado II	Carretera	Chile
20	Zapata II	Carretera	Chile
21	Gran Túnel Línea Amarilla	Carretera	Perú
22	Conexión entre estaciones de Atocha Y Chamartín	Ferrocarril	España

Tabla 5. Proyectos de la base de datos utilizada para el estudio.

De los datos buscados, en la mayoría de los proyectos no fue posible obtenerlos todos. Debido a esto, el análisis se enfocó en obtener los valores del costo resultante por kilómetro de túnel, por metro de túnel y por metro cúbico de túnel excavado. Los datos clave para esto son el costo del túnel, la longitud y el área de la sección transversal.

Los costos de los proyectos se manejaron en dólares para estandarizar los costos de todos los proyectos. Para obtener el volumen excavado total se utilizó el valor del área de la sección transversal y se multiplicó directamente por la longitud total. Para algunos proyectos se obtuvo la información específica sobre los metros cúbicos totales excavados. Los costos se obtuvieron directamente de la división del costo total de la obra en dólares entre la longitud (por kilómetros y por metros) o entre el volumen excavado (en metros cúbicos).

Primero se analizaron los costos de todos los datos y posteriormente se realizó una evaluación por separado de los túneles carreteros y los de ferrocarril. La ilustración siguiente muestra una relación del costo total de la construcción de los diferentes proyectos analizados.



Ilustración 35. Costo de construcción de los proyectos de la base de datos.

Se observa que existe una diferencia muy grande entre las dimensiones de los proyectos.

Otra comparación importante fue la de longitud total contra costo por Km de túnel. La grafica resultante es la siguiente:

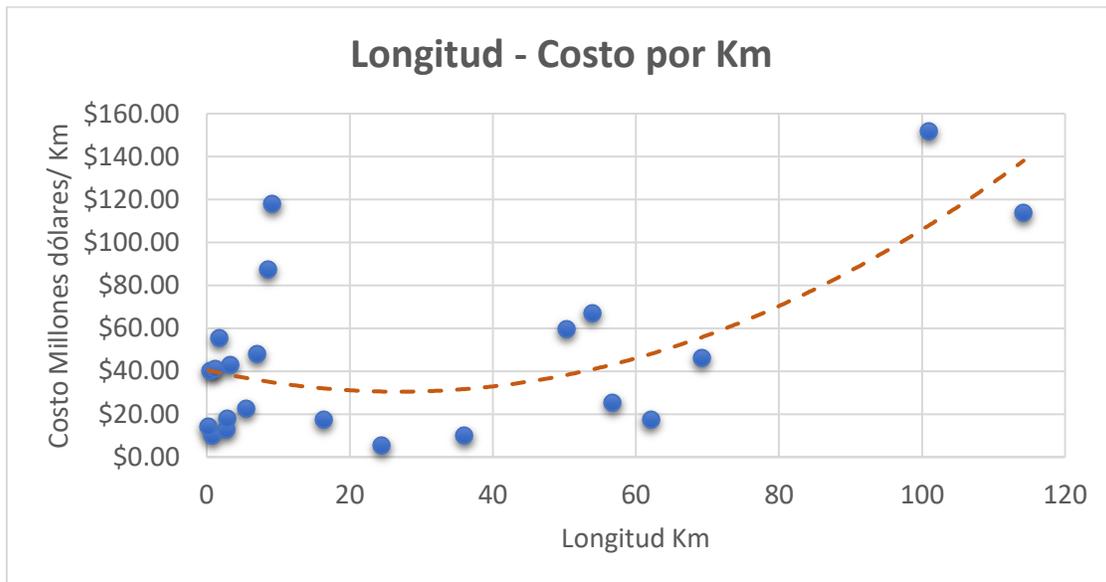


Ilustración 36. Costo en millones de dólares por kilómetro contra longitud en kilómetros, de los proyectos de la base de datos.

Se agregó una línea de tendencia polinómica que nos permite observar con mayor claridad que entre los túneles de 20 a 60 km de longitud disminuye el costo por Km. A medida que el túnel tiene una longitud mayor a 60 km se vuelve más costoso.

Los costos promedios que se obtuvieron con la información de todos los proyectos son los siguientes.

Promedio millones dólares/km	Promedio dólares/m	Promedio dólares/m ³
\$46.52	\$46,522.52	\$447.37

Posteriormente se analizaron por separado los datos de los túneles carreteros y los túneles de ferrocarril.

8.6.1. Túneles carreteros

En los túneles carreteros se obtuvieron los siguientes costos promedio.

Promedio millones dólares/km	Promedio dólares/m	Promedio dólares/m ³
\$36.32	\$36,315.05	\$319.09

Uno de los proyectos de túneles carreteros se destaca por ser particularmente costos en comparación con el resto. Este corresponde al bitúnel del proyecto carretero Legacy Way de Australia. Al dejar este proyecto fuera de los datos para el promedio se obtienen los siguientes resultados.

Promedio millones dólares/km	Promedio dólares/m	Promedio dólares/m ³
\$29.51	\$29,510.73	\$259.29

Los valores obtenidos de este ejercicio nos permiten tener un parámetro inicial para realizar aproximaciones del costo para las primeras fases de concepción de un proyecto de un túnel.

Como ejemplo, se propone la construcción de un túnel carretero de 5 km, con un área de sección transversal de excavación de 70 m² (que correspondería a un túnel de 9.44 m de diámetro).

Multiplicado el costo promedio por Km por la longitud total del túnel obtendríamos un costo de la obra de \$147.55 millones de dólares. Otra opción es considerar el total de volumen que se excavaría y multiplicarlo por el costo promedio por metro cubico. El resultado con esta operación es de \$90.75 millones de dólares. Con

esto tendríamos dos puntos de comparación inicial, uno únicamente considerando los kilómetros totales y uno que parece más completo, considerando el volumen de excavación en toda la longitud del túnel. Si consideramos un cambio en las dimensiones del túnel, y tuviéramos un diámetro de 12 m, equivalente a un área de sección de 113 m² y multiplicada por la longitud total de 5 Km y por el promedio de \$254 dólares/m³, tendríamos un costo de \$146.50 millones de dólares, que es muy cercano al estimado inicial del costo promedio por kilómetro.

Debido los resultados obtenidos con el ejemplo realizado, se considera importante conocer el área transversal promedio. Para este caso en el que se están considerando únicamente los proyectos de carreteras, el promedio se sección transversal de excavación es de 118.85 m². Esto explica porque en el ejemplo anterior se tienen la diferencia considerable entre los cálculos con el promedio por Km y el promedio por m³, cuando se considera la sección transversal de 70 m². Es importante entonces, tener en cuenta el efecto que se tiene al manejar un promedio de precio por volumen excavado, cuando se tienen túneles de diferentes dimensiones en la comparativa.

8.6.2. Túneles ferroviarios

Los túneles de ferrocarril fueron en general los más costosos en la base de datos. Se tienen datos de siete proyectos de túneles para ferrocarril, de los cuales cinco son proyectos que fueron ejecutados en Europa y dos en Asia.

A continuación, se muestran los costos promedios obtenidos.

Promedio millones dólares/km	Promedio dólares/m	Promedio dólares/m ³
\$73.05	\$73,054.51	\$696.35

En este caso también existe un proyecto que se observa tiene una diferencia de costo muy amplia con respecto al resto de los proyectos. Este corresponde al eurotúnel o también llamado túnel del canal de la mancha. Sin considerar este proyecto los costos promedios quedan así:

Promedio millones dólares/km	Promedio dólares/m	Promedio dólares/m ³
\$59.92	\$59,916.73	\$583.05

8.6.3. Costos para túneles con EPB

En 2015 el comité High Speed 2 para la construcción de un proyecto de ferrocarril en Inglaterra, publicó una guía para el cálculo del costo de los que consideran son

los principales elementos para la construcción de túneles mecanizados utilizando EPB o escudo slurry. Se considera para los costos un par de túneles circulares de 8.8 m de diámetro interno, construido con tuneladoras y utilizando dovelas de concreto.

La guía contempla el costo de compra de la TBM, costos de apoyo, la construcción del túnel, la disposición del material excavado, la construcción de portales, la construcción de lumbreras y el equipo e instalaciones mecánicas y eléctricas. Los costos considerados para cada uno de los elementos son los siguientes (costos en libras):

1. Compra de tuneladoras

Tuneladora slurry: £16,000,000 (por cada una)

EPB: £18,000,000 (por cada una)

2. Costos de apoyo

Costos fijos para tuneladora slurry: £ 45,000,000 (por cada una)

Costos fijos para EPB: £35,000,000 (por cada una)

Costos dependientes del tiempo: £ 1,100,000 por semana

3. Costos de construcción

Construcción de túnel con slurry: £ 25,000 por metro de bitúnel

Construcción de túnel con EPB: £ 22,000 por metro de bitúnel

4. Costo de disposición de material excavado

Disposición en un vertedero comercial: £ 4,500 por metro excavado de bitúnel

Uso de material excavado en sitio sustentable: £ 3,500 por metro excavado de bitúnel

5. Portales

Portales (dependiendo de topografía): £ 20,000,000 a £ 65,000,000 cada uno

6. Lumbreras

Lumbreras (dependiendo de localización): £ 10,000,000 a £ 30,000,000 cada uno

7. Equipo e instalaciones mecánicas y eléctricas

Sistemas en el túnel: £ 4,000 por metro de bitúnel

La guía muestra el ejemplo siguiente para un bitúnel de 7 Km de longitud.

This example assumes a 7km tunnel is constructed using slurry machines in a rural location with hilly topography.

Tunnel Duration:	7,000m of tunnelling (productivity 80m/week)	87.5	Weeks
	7,000m of clear out (productivity 400m/week)	17.5	Weeks
	Total Duration	105.0	Weeks

Ref	Item	Description	Quantity	Unit	Rate		Total Cost
					£ 2Q2011	£ 2Q2011	
3.1	Purchase of TBMs	Slurry TBMs	2	Nr	16,000,000		32,000,000
		EPB Machines	0	Nr	18,000,000		0
3.2	Tunnelling Support Costs	Fixed costs (slurry TBM)	1	Sum	45,000,000		45,000,000
		Fixed costs (EPB machine)	0	Sum	35,000,000		0
		Time related costs	105	Week	1,100,000		115,500,000
3.3	Tunnel Construction	Twin tunnels - (slurry TBM)	7,000	Route m	25,000		175,000,000
		Twin tunnels - (EPB machine)	0	Route m	22,000		0
3.4	Disposal of Excavated Materials	Disposal off site to a commercial tip	7,000	Route m	4,500		31,500,000
		Disposal off site to a sustainable placement area	0	Route m	3,000		0
3.5	Tunnel Portals	Tunnel portal (assumed hilly topography)	2	Nr	20,000,000		40,000,000
3.6	Tunnel Shafts	Ventilation shaft (assumed rural location)	2	Nr	12,000,000		24,000,000
3.7	Mechanical and Electrical Systems	Mechanical and electrical systems in tunnels	7,000	Route m	4,000		28,000,000
Total cost for example tunnelled section of the route							491,000,000
Tunnel costs shown in the graph in section 4.2 of the report are per single tunnel km and for civil engineering works only i.e. excluding mechanical & electrical systems							
Therefore Total cost for items 3.1 - 3.6 above							463,000,000
Total length of single tunnel (km)							14
Civil engineering cost per single tunnel km							33,071,429

Ilustración 37. Ejemplo de estimación de costos de un túnel, High Speed 2 (2015).

El costo sin considerar el sistema mecánico y eléctrico es de 33 millones de libras por kilómetro de túnel. Esto sería aproximadamente igual a 45 millones de dólares. Comparando con el promedio obtenido con la base de datos (59.92 millones de dólares / Km), se tiene una diferencia de casi 15 millones de dólares por kilómetro de túnel.

Puntos para considerar del análisis:

- Para la base de datos en algunos casos, los costos que se obtuvieron en las fuentes de información no se especifican si el costo total corresponde al costo de los túneles, al costo de la obra total o al costo de todo el proyecto.
- Los análisis realizados son representativos con sus limitaciones. Es importante señalar que los túneles investigados corresponden a proyectos construidos en diferentes épocas, por lo que existe una importante variación con el valor del dinero en el tiempo, por lo que para una mejor aproximación sería necesario realizar una corrección considerando esto.
- La poca información disponible hace difícil comparar los proyectos a detalle. Se necesita la colaboración de las empresas contratistas y de los clientes para obtener la información de primera mano, lo que permitirá un análisis más detallado, mejores conclusiones, y mayor aprendizaje para los futuros proyectos.
- La tabla de datos debería seguirse complementando en el futuro para análisis posteriores. La recolección de información sobre los proyectos puede ser de mucha ayuda para la industria en los proyectos venideros.

9. Conclusiones

La construcción de túneles en el mundo ha mostrado un crecimiento significativo en los últimos años a nivel mundial. A pesar de esto, en la mayoría de los proyectos nuevos los aspectos económicos continúan siendo una barrera importante para la consideración de su construcción como una opción viable y se da preferencia a otras alternativas. Los túneles son considerados construcciones caras que presentan sobrecostos elevados. Conocer las implicaciones de los proyectos de túneles permite tener una consideración más objetiva al momento de compararlos con otras opciones constructivas, que es mucho más compleja que el costo total de construcción. Impacto social, del medio ambiente, económico, de uso de espacios, entre otros son factores que dan un valor agregado a los túneles y no siempre puede ser medido en términos monetarios directos.

Los sobrecostos son uno de los principales problemas en los proyectos de túneles, y una de las causas principales de rechazo de nuevos proyectos. En este trabajo se han estudiado los aspectos básicos de los túneles, las diferentes etapas de los proyectos, los elementos de costo y algunas causas de los sobrecostos.

La encuesta a expertos fue realizada a miembros de la Asociación mexicana de ingeniería de túneles y obras subterráneas (AMITOS), a miembros del Grupo de ingenieros jóvenes (GIJ) y a estudiantes de la maestría de túneles y obras subterráneas. Esta encuesta permitió asociar las experiencias de profesionales en la ingeniería de túneles respecto a los factores de costos. De las encuestas se derivan las siguientes conclusiones.

- Los elementos que más impactan al costo de los túneles son: los estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos. La mayoría de los expertos coinciden en ello.
- La fase del proyecto que tiene mayor oportunidad de reducir riesgos y costos es la de investigación geotécnica del sitio donde se construirá el túnel, por encima de otras etapas como el diseño, la construcción y los métodos de contratación.
- Con la base de datos recopilada y analizada en esta investigación se obtuvo que el costo promedio por metro de túnel construido es de \$46,000 dólares. Los expertos encuestados precisan en su mayoría que no es posible mencionar una cifra promedio, debido a la gran cantidad de variables que se pueden presentar; por tanto, el costo promedio de túnel es \$46,000 dólares por metro, es válido utilizarlo como parámetro general para una sección de excavación de 120 m² y, considerando que cada túnel tiene variables únicas que modificarán su costo al alza o a la baja cuando se realice un análisis detallado.
- En términos del monto total del proyecto, el porcentaje invertido a los estudios es del menor del 3% a nivel internacional. En México el porcentaje

de inversión en estudios en función del total de la obra es de alrededor del 1%, en el mejor de los casos.

- Sería interesante y se recomienda hacer una encuesta a nivel internacional sobre todo a los países miembros de la ITA, y a profesionales dedicados a la ingeniería de túneles en el mundo, para obtener información ilustrativa de la inversión que se hace en estudios para este tipo de obras y tomarlo como referencia en nuestro país.

Las obras subterráneas están sujetas a incertidumbres inherentes a la naturaleza de la geología. En la medida en que se inviertan más recursos y se intensifiquen las campañas de estudios, se tendrá un modelo geológico más acertado y cercano a la realidad, en el que no se tendría una diferencia significativa entre modelo de proyecto y las condiciones reales en obra. A continuación, se mencionan las conclusiones respecto a los estudios y la exploración.

- Los estudios y la exploración del sitio tienen un alto impacto en el costo final de la obra. Además, se relacionan de manera directa con otros factores que influyen en el costo. El factor más importante para el éxito global de un proyecto de túneles es la exploración y los estudios geológicos, geotécnicos e hidrológicos.
- En proyectos de túneles recientemente construidos en México, se encontró que se invirtió en la investigación del sitio menos del 1.0% del monto total de la obra.
- Está claro que un mayor porcentaje de inversión en la investigación del sitio que alojará el túnel, sin duda repercutirá en un menor porcentaje de incremento final del costo. Esto se cumple para porcentajes de investigación del sitio entre el 0% y el 8% del monto total del proyecto. Porcentajes mayores al 8% no tienen impacto relevante en el costo final del túnel.
- El porcentaje invertido para estudios e investigación del sitio donde se construirá el túnel debería ser mínimo del 3%.
- Una buena práctica en cuanto a sondeos de exploración directa es realizar un metro de exploración directa, por cada metro de longitud de túnel proyectado.

El método de licitación y contratación tradicional para proyecto y obra de un túnel, en el que se premia a la opción más económica está viciada. Ha demostrado ser una estrategia que genera problemas importantes como abandonos del proyecto, retrasos, y la necesidad de contratar una nueva empresa para culminar los trabajos, que terminará por incrementar los costos. Los presupuestos son castigados buscando ser cada vez más baratos, rebasando la línea de la realidad. Empresas que no tienen experiencia terminan ganando, y en un corto plazo se ve reflejado en la obra el incremento en costo y tiempo; en un futuro se ve reflejado

en problemas funcionales y de seguridad durante la operación de la infraestructura. El efecto de estimaciones de costos no realistas será la falta de recursos que la contratista se buscará compensar de alguna forma, afectando la calidad, la seguridad o el programa de obra. Al final todo esto terminará encareciendo el proyecto para el propietario. A continuación, se enlistan algunas recomendaciones con el propósito de mejorar y coadyuvar para que, tanto los proyectos como las obras de un túnel resulten cada vez más atractivas:

- Se recomienda implementar métodos de contratación a libro abierto con incentivos por logros o hitos. Este método favorece a la transparencia del proyecto y se tienen claros los porcentajes de utilidad desde el inicio del proyecto.
- Solicitar que los participantes tengan experiencia en proyectos de obras similares y ponderarlo con mayor valor a del costo final de la propuesta.
- En las dependencias gubernamentales se debe cambiar el enfoque de que la mejor opción es la más económica.
- Mostrar con transparencia las entradas y salidas de recursos, favorece al costo final y evita conflictos entre el cliente y el contratista.
- Un mayor número de contratistas licitando, genera más competencia y mejores precios.
- El uso del GBR debe ser obligado para todos los proyectos de túneles. Es la mejor herramienta que se tiene para el manejo contractual del riesgo en obras subterráneas. El valor del GBR viene dado por la exhaustividad de la campaña de exploración y los estudios.
- El uso de los dispute boards es recomendado para todos los proyectos de túneles. La inversión para un dispute boards en términos del monto total del proyecto es del orden del 0.2%. Considerando que el costo por disputas en los proyectos representa el 12% del monto total, vale la pena la inversión.
- Las cláusulas contractuales deben estar bien definidas respecto a las obligaciones de las partes durante la etapa de construcción. Deben de establecerse todas las condiciones posibles (incluso las fortuitas), y no dejar vacíos que puedan provocar controversias legales, que al final lo único que se consigue es alargar y encarecer más el proyecto.

Las estimaciones de costos, desde sus primeras aproximaciones, deben considerar las condiciones adversas del terreno. En la medida que las campañas de exploración y el análisis geotécnico avancen, las estimaciones se actualizan y se obtiene un costo total más cercano a la realidad. El trabajo coordinado entre el equipo de diseño, construcción y estimación de costos es la clave para lograr el éxito en este proceso. A continuación, se enlistan algunas reflexiones tomadas de experiencias de túneles construidos por algunos especialistas:

- La innovación tecnológica del sector debe encamisarse hacia una estandarización que a largo plazo que permita reducir los costos de construcción. Dovelas prefabricadas de medidas estándar, herramientas de corte, tuneladoras, partes mecánicas de las tuneladoras. Una estandarización global. Evitar crear elementos para casos o usos únicos o específicos, que resultarán muy costosos.
- El uso de las maquinas tuneladoras ha aumentado en los últimos años. Debe considerarse la compra de tuneladoras para que sean usadas en más de un solo proyecto, invirtiendo en los proyectos posteriores únicamente en darles el mantenimiento necesario para seguir operando. Esto permitirá diferir su costo en múltiples proyectos y disminuir el impacto en el costo total de cada proyecto. Para lo anterior, se tienen que planificar obras de infraestructura a corto, mediano y largo plazo, no solo en obras para que se inauguren en un periodo de gobierno estatal o federal.
- Se requiere de una planeación a largo plazo por parte de las dependencias de gobierno. Tener un plan de infraestructura permite que los inversionistas y constructores identifiquen áreas de oportunidad en las que vale la pena invertir recursos y tiempo.

Al momento de realizar los diseños y las especificaciones finales del proyecto, se debe considerar el impacto en el costo y valorar diferentes opciones en beneficio de la economía del proyecto. Incluir en el grupo de trabajo de diseño del túnel, a personal con experiencia en costos, es recomendado para lograr el equilibrio entre diseño y costo. Esto debe hacerse sin caer en el extremo de comprometer la calidad, la estabilidad y la vida útil del túnel. El objetivo es encontrar un diseño óptimo y seguro al mejor precio posible.

La toma de decisiones durante la construcción de un túnel es un elemento que impacta directamente el costo. Por ejemplo, suponiendo que durante la construcción se ha detectado un avance lento en el colado del revestimiento del túnel; se decide subcontratar los servicios de una empresa que se encargue del trabajo. Para esta decisión se requiere evaluar diferentes empresas en experiencia, programa y costo. El tomar la acción para mejorar el avance parece una buena decisión, pero el resultado final se sabrá cuando se contrate y se vea si existe una mejora en la producción. Esta decisión tendrá impacto en el costo y en el tiempo. Como este ejemplo, decisiones así se tienen que tomar a lo largo del tiempo que dure el proyecto. Las decisiones deben de ser tomadas considerando las implicaciones económicas, técnicas y de tiempo en conjunto. No van separadas una de la otra. Especialistas en las obras subterráneas con conocimiento técnicos y de costos deben estar involucrados en esa toma de decisiones. Con base en lo anterior, se debe tomar en cuenta lo siguiente:

- Las experiencias en el país de obras en superficie rebasan por mucho las que se tienen respecto a obras subterráneas. Esto se refleja al momento de ejecutar proyectos de túneles. Los clientes toman consideraciones como si se tratara de una obra estándar en superficie, cuando las implicaciones a considerar para las obras subterráneas difieren ampliamente.
- Es necesario que los encargados de los proyectos de túneles, desde gerentes hasta supervisores, tengan una formación especializada y experiencia en el área. El desconocimiento provoca decisiones inadecuadas que impactan en los tiempos y costos de ejecución. Debe de aumentarse la educación y capacitación de los clientes en los aspectos relacionados a las obras subterráneas.

La base de datos con los registros históricos de los proyectos de túneles en México requiere ampliarse y tener información detallada para sacarle mayor provecho. La información disponible actualmente es limitada, se necesita de la colaboración de las empresas proyectistas, contratistas, supervisoras y de las dependencias de gobierno. El registro de datos históricos se puede usar en beneficio de los proyectos futuros.

Se recomienda que en México se lleve a cabo un control de las inversiones que se destinan a los túneles, mostrando cuál fue el presupuesto inicial del túnel y cual es al final de la obra, y que no se maneje esta información como privada. Es relevante entender cuánto y por qué se incrementó, y usar la información para mejorar en futuros proyectos.

La construcción de los proyectos de túneles es un proceso flexible de mejora continua. Las condiciones encontradas al frente de la excavación deben de servir para comprobar las consideraciones de diseño y modificarlas en caso de ser necesario. De igual forma los métodos de construcción deben de verificarse para identificar potenciales ahorros en los costos.

Al iniciar la etapa de construcción se suelen tener disponibles una gran cantidad de recursos, y cualquier suministro de material, maquinaria, equipo y mano de obra parece mínima en ojos de algunos participantes del proyecto. Un metro cubico de concreto adicional por un error en los volúmenes es poco; dos horas que los trabajadores estén detenidos por falta de frente de trabajo, es poco; detener la tuneladora un día por falta de mantenimiento preventivo, no impacta. Aseveraciones de este tipo son comunes en el día a día de una obra. El control de costos debe de comenzar desde el día uno. Es importante que los gerentes de construcción, el personal de control de obra, superintendentes, supervisores y residentes, tengan la sensibilidad hacia las implicaciones económicas del

proyecto, que permita trabajar con una visión de producción y cuidado de recursos.

Los costos de operación y mantenimiento son dependientes de las etapas previas de diseño y construcción. Un proyecto con suficientes y adecuados estudios, y una construcción apegada a las especificaciones con altos estándares de calidad; culminará sin duda en un beneficio de la operación y en menos gastos de mantenimiento. Además, contribuirá a que se construyan más túneles en nuestro país, retirando los mitos de que es muy costoso y tardado construir este tipo de obras.

10. Bibliografía

1. Nathaniel Efron & Megan Read (2012), Analyzing International Tunnel Costs an Interactive Qualifying Project, Worcester Polytechnic Institute.
2. Gorostieta Luis (1977), Costos y control de costos en excavaciones de túneles, Centro de educación continua división de estudios superiores Facultad de Ingeniería UNAM.
3. High Speed Two A Guide to Tunneling Costs (2015), House of Commons Select Committee for the High Speed 2, UK.
4. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2009), Technical Manual for Design and construction of Road Tunnels – Civil elements.
5. Project Management Institute (2017), A guide to the project management body of knowledge PMBOK GUIDE, Six edition.
6. ITA-AITES, How to go underground - About Tunnelling, <https://tunnel.ita-aites.org/en/how-to-go-underground>.
7. Project Management Institute (2017), A guide to the project management body of knowledge PMBOK GUIDE, Six edition.
8. Yamal Chamoun (2002), Administración Profesional de Proyectos LA GUÍA, Editorial Mc Graw Hill.
9. Manual de diseño y construcción de túneles de carretera, SCT, 2016.
10. Rob Vergoossen, Hans De Wit, Eelco Van Putten (2014). Túneles sumergidos. revista Noticreto # 125, de Julio –agosto 2014. Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
11. Harald Wagner (2006), The governance of cost in tunnel design and construction.
12. Infrastructure UK (2010), Infrastructure cost Review: Technical report.
13. Du Y. Kim, Seung H. Han y Hyoungkwan Kim (2008). Discriminant Analysis for Predicting Ranges of Cost Variance International Construction Projects, Journal of Construction Engineering and Management, ASCE / June 2008.
14. Oswaldo López Ruiz (2009). Variación entre los costos planeados y los costos reales en dos proyectos de construcción de infraestructura carretera en la república mexicana. Monterrey, México.

15. Real Academia española, Túnel, <https://dle.rae.es/t%C3%BAnel>
16. Proyectos de Infraestructuras de Transporte | ACCIONA. (2021). Acciona. <https://www.acciona.com/es/soluciones/transporte/proyectos/>
17. El Metro de Quito, el proyecto de movilidad urbana más emblemático del país. (2021, 27 junio). Mundo Constructor. <https://www.mundoconstructor.com.ec/el-metro-de-quito-el-proyecto-de-movilidad-urbana-mas-emblematico-del-pais/>
18. Brunkebergs tunnel. (2021). Visit Stockholm. <https://www.visitstockholm.com/o/brunkebergs-tunnel/>
19. Wikipedia contributors. (2022, 7 enero). Blue Ridge Parkway. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Blue_Ridge_Parkway_tunnels
20. Mundo, E. L. (2018, 31 agosto). Así será la impresionante autopista que Noruega planea construir para conectar todos sus fiordos. ELMUNDO. <https://www.elmundo.es/internacional/2018/08/31/5b8960fa468aebc6198b46aa.html>
21. Online/Notimex, L. R. (2020, 15 julio). Avance del 98 por ciento en Túnel Emisor Oriente, informa Conagua. La Razón. <https://www.razon.com.mx/mexico/avance-del-98-por-ciento-en-tunel-emisor-oriente-informa-conagua/>
22. La ciudad subterránea de Toronto (2019, 4 abril). <https://www.voyatoronto.com/path-ciudad-subterranea-toronto/>
23. Academia de Ingeniería de México. (2021). ESTABILIDAD DE TÚNELES EXCAVADOS EN SUELOS. Slideshare. <https://es.slideshare.net/AcademiaDeIngenieriaMx/estabilidad-de-tneles-excavados-en-suelos>
24. Wikipedia contributors. (2021, 29 junio). George Wallace Tunnel. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/George_Wallace_Tunnel
25. Wikipedia contributors. (2021b, agosto 19). Kanmon Tunnel. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Kanmon_Tunnel
26. Obras. (2013, 5 agosto). 5 años después anunciarán la inversión definitiva del TEO. <https://obras.expansion.mx/construccion/2013/08/06/5-anos-despues-anunciaran-la-inversion-definitiva-del-teo>
27. Obras. (2018, 20 diciembre). Tren México-Toluca, el lado oscuro de una obra necesaria. <https://obras.expansion.mx/construccion/2018/08/16/tren-mexico-toluca-el-lado-oscuro-de-una-obra-necesaria>

28. Tren México-Toluca iniciaría operaciones en 2023. (2020, 22 octubre). T21. <http://t21.com.mx/ferroviario/2020/10/22/tren-mexico-toluca-iniciaria-operaciones-2023>
29. Secretaria de Comunicaciones y Transportes: Tren Interurbano México-Toluca. (2021). SCT. <http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/transporte-ferroviario-y-multimodal/tren-interurbano-mexico-toluca/>
30. Aarón Romero Pelayo y Francisco Cesáreo Mendoza León (2019), Procedimiento Constructivo de Bitúnel para el Proyecto Tren Interurbano México-Toluca, Facultad de Ingeniería UNAM.
31. Clayton (2001), C.R.I. Managing geotechnical risk: Time for change? Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng. 2001, 149, 3–11.
32. Chrysothemis Paraskevopoulou y Georgios Boutsis (2020), Cost Overruns in Tunnelling Projects: Investigating the Impact of Geological and Geotechnical Uncertainty Using Case Studies, School of Earth and Environment, University of Leeds
33. Harvey W. Parker (2004), Planning and site investigation in tunnelling. 1º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas
34. López Jimeno, C. (Ed.) (1997). Manual de túneles y obras subterráneas, Madrid, España: Editorial Entorno Gráfico.
35. PMI, PMBOOK. Project Management Institute (2017).
36. Hernández R. (2016). Manejo Contractual de Riesgos en Proyectos Subterráneos en México: Una aproximación Meta-contractual. 4to Simposio Internacional Sobre Túneles y Lumbreras en suelos y roca, Ciudad de México.
37. Lombardo A. y Pérez J. (2016). Manejo Contractual del Riesgo. 4to Simposio Internacional Sobre Túneles y Lumbreras en suelos y roca, Ciudad de México.
38. ASCE (2007). Geotechnical Baseline Reports for Construction Suggested Guidelines, The technical Committee on Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council, The American Society of Civil Engineers.
39. Mexico International Chamber of Commerce ICC, Dispute Boards, recuperado de: <https://www.iccmex.mx/productos-y-servicios/arbitraje-y-mediacion/dispute-boards> Visitado el 5 de abril de 2021
40. Amanda Solís Tapia (2018). México detrás de honduras en solución de controversias en obra pública, Revista Obras. Obtenido de:

<https://obras.expansion.mx/construccion/2018/04/11/mexico-detras-de-honduras-en-solucion-de-controversias-en-obra-publica>

41. Frascaroli, B. (2021, 23 noviembre). La gestión del riesgo contractual como herramienta de negocios. Webdox. <https://www.webdoxclm.com/blog/lagestion-del-riesgo-contraccional-como-herramienta-de-negocios>
42. LA INGENIERÍA DE TÚNELES ESTRENA CONTRATO. (2021). Inmoley. <https://www.inmoley.com/NOTICIAS/1912345/2019-1-inmobiliario-urbanismo-vivienda/07-19-inmobiliario-01-20.html>
43. Publishing of 2019 Emerald Book - ITA Activities. (2019, mayo 13). Ita-Aites. <https://about.ita-aites.org/news/1694/publishing-of-2019-emerald-book>
44. The Emerald Book: the new FIDIC Tunnelling Contract. (2019, 9 agosto). Fenwick Elliott. <https://www.fenwickelliott.com/research-insight/newsletters/international-quarterly/emerald-book-new-fidic-tunnelling-contract>
45. Proyectos – Grupo TYPSA. (2021). TYPSA. <https://www.typsa.com/proyectos/>
46. Blog, S. (2021). Se inaugura el túnel Legacy Way en Australia. Structuralia. <https://blog.structuralia.com/se-inaugura-el-tunel-legacy-way-en-australia>
47. Túnel Emisor Poniente II, obra subterránea de vanguardia en México. (2020). Interempresas. <https://www.interempresas.net/ObrasPublicas/Articulos/258156-Tunel-Emisor-Poniente-II-obra-subterranea-de-vanguardia-en-Mexico.html>
48. Obras. (2019, 31 julio). Túnel Emisor Poniente II, finalista Obra del Año 2019. <https://obras.expansion.mx/construccion/2019/07/16/tunel-emisor-poniente-ii-finalista-obra-del-ano-2019>
49. Túnel Emisor Poniente II, finalista Obra del Año 2019. (2019, agosto 29). Aldesa.info. Aldesa Proyectos. <https://aldesa.info/tunel-emisor-poniente-ii-finalista-obra-del-ano-2019/>
50. Peters., C. (2016, 2 marzo). Obra de túnel en Acapulco enfrenta desafíos. Construcción Latinoamericana. <https://www.construccionlatinoamericana.com/4115841.article>
51. Acapulco ya tiene macrotúnel, el más grande del país. (2017, 18 abril). El Universal. <https://www.eluniversal.com.mx/articulo/estados/2017/04/18/acapulco-ya-tiene-macrotunel-el-mas-grande-del-pais>

52. de Oca, M. M. (2018, 23 enero). La nueva carretera Jala-Puerto Vallarta en México. RIVIERA PARTNERS REALTY Punta Mita & Pacific Mexico Real Estate for SALE. <https://rivierapartnersrealty.com/es/la-nueva-carretera-jala-puerto-vallarta-en-mexico/>
53. Obras Subterráneas, S.A. (2021). Autopista Guadalajara-Puerto Vallarta, Tramo Compostela Las Varas. OSSA. <https://ossaint.com/portfolio/c-304-tunel-compostela-2/>
54. Túnel de La Línea: así es el proyecto que atravesó la Cordillera de los Andes. (2020, 5 septiembre). YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=2nz5ZvqMoFk&ab_channel=DiarioLaRep%C3%BAblica
55. BBC News Mundo. (2020, 4 septiembre). Túnel de la Línea: por qué Colombia se demoró 100 años en construir su obra más importante (y qué beneficios traerá su inauguración). <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-54021367>
56. Staff, F. (2020, 4 septiembre). Listo el túnel de La Línea, pero el proyecto completo estará en 2021. Forbes Colombia. <https://forbes.co/2020/09/04/actualidad/listo-el-tunel-de-la-linea-pero-el-proyecto-completo-estara-en-2021/>
57. Ajaib, S. (2020, 12 septiembre). En Noruega, un túnel tres veces más grande que el de La Línea costó cinco veces menos. Corrupción al Día. <https://corrupcionaldia.com/en-noruega-un-tunel-tres-veces-mas-grande-que-el-de-la-linea-costo-cinco-veces-menos/>
58. (2019, enero 29). Laerdal, el túnel más largo del mundo. Carreteras Peligrosas. <https://carreteraspeligrosas.com/laerdal-tunel-mas-largo-del-mundo/>
59. (2018, 1 abril). El túnel de Zhongnanshan – Revista Vector. Vector. <http://www.revistavector.com.mx/2018/04/01/el-tunel-de-zhongnanshan/>
60. (2019, agosto 16). Inauguran en Colombia el túnel vial más largo de América Latina. CNN. <https://cnnespanol.cnn.com/2019/08/16/inauguran-en-colombia-el-tunel-vial-mas-largo-de-america-latina/>
61. Crece incertidumbre por futuro del túnel de Agua Negra: proyecto. (2019, 23 julio). Diario El Día. <http://www.diarioeldia.cl/economia/tunel-agua-negra/crece-incertidumbre-por-futuro-tunel-agua-negra-proyecto-sigue-sin-avances>
62. Crece incertidumbre por futuro del túnel de Agua Negra: proyecto. (2019, 23 julio). Diario El Día. <http://www.diarioeldia.cl/economia/tunel-agua-negra/crece-incertidumbre-por-futuro-tunel-agua-negra-proyecto-sigue-sin-avances>

negra/crece-incertidumbre-por-futuro-tunel-agua-negra-proyecto-sigue-sin-avances.

63. Blog, S. (2020). La impresionante construcción del Eurotúnel. Structuralia. <https://blog.structuralia.com/eurotunel>
64. (2016, 4 noviembre). La epopeya del túnel de San Gotardo, el más largo y profundo del mundo, en 27 imágenes. Magnet. <https://magnet.xataka.com/un-mundo-fascinante/la-epopeya-del-tunel-de-san-gotardo-el-mas-largo-y-profundo-del-mundo-en-27-imagenes>
65. (2020). El túnel de Seikan: el túnel ferroviario más largo del mundo. Strcuturalia. <https://blog.structuralia.com/el-tunel-de-seikan-el-tunel-ferroviario-mas-largo-del-mundo>
66. El túnel de Seikan, el más largo del mundo. (2009, 12 septiembre). treneando. <https://treneando.com/2009/09/08/el-tunel-de-seikan-el-mas-largo-del-mundo/>
67. (2021, octubre 22). Seikan Tunnel. Wikipedia. https://en.wikipedia.org/wiki/Seikan_Tunnel
68. Los 3 túneles ferroviarios más largos del mundo. (2019). Civil Engineering Blog. <http://ycivilengineering.blogspot.com/2013/11/los-3-tuneles-ferroviarios-mas-largos.html>
69. Korea completes record setting rail excavation. (2020). Tunneltalk. <https://www.tunneltalk.com/Korea-14Jul2015-Yulhyeon-Tunnel-final-breakthrough.php>
70. El túnel de Lötschberg – Revista Vector. (2018, 1 abril). Vector. <http://www.revistavector.com.mx/2018/04/01/el-tunel-de-lotschberg/>
71. (2019). Lötschberg Tunnel. PERI. <https://www.peri.es/proyectos/civil-engineering/loetschberg-tunnel.html>
72. Jenny Yan speaks of tunnelling in China. (2019, abril). Tunneltalk. <https://www.tunneltalk.com/Discussion-Forum-Apr2019-Jenny-Yan-of-China-speaks-of-ITA-ambitions-and-tunnelling-in-China.php>
73. (2020). Adif alta velocidad. http://www.adifaltavelocidad.es/es-ES/web/adif-av/infraestructuras/lineas_de_alta_velocidad/madrid_valladolid/tunel_de_guadarrama.shtml
74. (2001, 14 septiembre). Presidente Lagos inauguró Túnel Lo Prado II. Cooperativa.cl. <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/presidente-lagos-inauguro-tunel-lo-prado-ii/2001-09-14/120200.html>

75. Méndez, F. (2020). Túneles de Guanajuato: un laberinto colonial y calles subterráneas. Revista Travesías. <https://www.travesiasdigital.com/destinos/mexico/calles-subterraneas-de-guanajuato/>
76. PIARC Committee on Road Tunnels (1999). Reducción de los costos de operación (Reduction of operational cost of road tunnels, working group 1).
77. Statens vegvesen. (2013). Statens vegvesen - Coastal Highway Route E39 animation (English voice). <https://www.youtube.com/watch?v=L7en6etg2Mk>
78. Ángel Carlos Aparicio Bengoechea (2007), Puentes flotantes.
79. Ulma (2022). Tuneles Falso Prolongación de los ferrocarriles, Terrassa, España. <https://www.ulmaconstruction.com.mx/es-mx/proyectos/tuneles/falso-tunel-terrasa-espana>