



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Supervisión y gerencia de proyectos de  
construcción de túneles de metro y  
estaciones en México**

**TESINA**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Civil**

**P R E S E N T A**

Mario Zárate Martínez

**DIRECTOR DE TESINA**

M. en I. Sergio Macuil Robles



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023**

## **Agradecimientos**

A mis padres y hermana, que siempre han estado apoyándome en cada una de las etapas de mi vida.

A Janette, gracias por el apoyo que me brindas cada día.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme un segundo hogar y permitirme desarrollarme con el apoyo y uso de todos sus recursos, desde sus bibliotecas, aulas, institutos, divisiones, auditorios y servicios deportivos, hasta sus áreas verdes, museos e historia que me alimentaron el alma para ser mejor persona.

A todos y a cada uno de los profesores en la facultad de ingeniería que me regalaron su tiempo y conocimiento durante mis estudios de preparatoria y universidad.

A mis sinodales por su tiempo y atención en el proceso.

Quiero extender mi agradecimiento a Sergio Macuil Robles por siempre brindarme su amistad, apoyo y guía durante mi carrera profesional.

# Supervisión y gerencia de proyectos de construcción de túneles de metro y estaciones en México

Contenido	
<b>Introducción</b> .....	3
<b>Transporte público en México</b> .....	3
<b>Sistema de transporte colectivo Metro</b> .....	5
<b>Supervisión y gerencia de proyectos en México</b> .....	8
<b>I.-Procesos constructivos para supervisar en la Obra Civil</b> .....	9
<b>1.1-Construcción de Lumbreras.</b> .....	9
<b>1.2-Construcción de Túneles de Intertramo.</b> .....	11
<b>1.3-Construcción de Túneles de Estación y túneles secundarios.</b> .....	13
<b>1.4-Sistemas de impermeabilización.</b> .....	15
<b>1.5-Nichos, cárcamos y túneles de conexión.</b> .....	16
<b>1.5.1-Nichos:</b> .....	16
<b>1.5.2-Cárcamos:</b> .....	16
<b>1.5.3-Túneles de conexión:</b> .....	16
<b>1.6-Preparaciones electromecánicas.</b> .....	17
<b>1.7-Obras Inducidas.</b> .....	18
<b>II.-Control de proyecto</b> .....	20
<b>2.1.1-Instrumentación y monitoreo topográfico.</b> .....	20
<b>2.1.2-Caso especial de modelado tridimensional utilizando drones para inspecciones y apoyo a la topografía y supervisión en la construcción:</b> .....	22
<b>2.2-Seguimiento geotécnico.</b> .....	24
<b>2.3-Control de calidad.</b> .....	27
<b>2.3.1-Plan de calidad</b> .....	27
<b>2.3.2-Calidad de materiales en la construcción de un túnel de metro y estaciones:</b> .....	28
<b>2.4-Gestión ambiental.</b> .....	31
<b>2.5-Seguridad e higiene.</b> .....	33
<b>2.6-Estimaciones ordinarias, adicionales y extraordinarias.</b> .....	38
<b>2.6.1-Estimaciones ordinarias:</b> .....	38
<b>2.6.2-Estimaciones adicionales:</b> .....	38
<b>2.6.3-Estimaciones extraordinarias:</b> .....	38
<b>2.6.4-Probleáticas en las estimaciones:</b> .....	39
<b>2.7-Ajustes de costos y Factor de actualización.</b> .....	40

<b>2.8-Gastos no recuperables.....</b>	<b>41</b>
<b>2.9-Gastos financieros.....</b>	<b>42</b>
<b>2.10-Avances físico-financieros-programados.....</b>	<b>43</b>
<b>2.11-Utilización de Excel y Microsoft Project para dar seguimiento al avance físico financiero y programado de un proyecto.....</b>	<b>44</b>
<b>2.12-Utilización de Sistemas BIM.....</b>	<b>46</b>
<b>2.13-Propuesta de personal para la supervisión y gerencia de proyectos.....</b>	<b>48</b>
<b>2.13.1-Personal directo:.....</b>	<b>48</b>
<b>2.13.2-Personal Indirecto:.....</b>	<b>50</b>
<b>III.-Conclusiones.....</b>	<b>51</b>
<b>Anexo A-Lista Imágenes.....</b>	<b>53</b>
<b>Anexo B-Lista de tablas.....</b>	<b>54</b>
<b>Anexo C-Bibliografía.....</b>	<b>55</b>
<b>Anexo D-Glosario.....</b>	<b>58</b>

## Introducción.

### Transporte público en México

La Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) es una de las áreas urbanas más grandes y pobladas del mundo. En esta región, el transporte público es fundamental para garantizar la movilidad de millones de personas que viajan diariamente desde y hacia la Ciudad de México y los municipios circundantes. Los principales sistemas de transporte público en la ZMVM incluyen el Sistema de Transporte Colectivo Metro, el Metrobús, el Tren Suburbano y una amplia red de autobuses, en estos últimos años la renovación de Ecobici, Trolebús y cablebús, y taxis colectivos entre otros.

En México se encuentra una variedad de transporte:

Tabla 1 - Tipos de transporte en México. Elaboración propia.

Tipo de Transporte Público	Descripción	Ejemplos en México
<b>Metro</b>	Sistema de trenes subterráneos que funcionan en áreas urbanas densas	Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara
<b>Tren Ligero</b>	Sistema de trenes eléctricos que circulan en superficie o elevados en áreas urbanas	Ciudad de México, Guadalajara
<b>Metrobús</b>	Sistema de autobuses de tránsito rápido (BRT) que circulan en carriles exclusivos	Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Puebla, León, Mérida, entre otros
<b>Trolebús</b>	Autobuses eléctricos alimentados por cables aéreos	Ciudad de México
<b>Autobús</b>	Autobuses convencionales que circulan en rutas fijas y paradas establecidas	Presente en todas las ciudades del país
<b>Colectivo / Ruta / Combi</b>	Vehículos más pequeños que los autobuses convencionales que circulan en rutas fijas y paradas informales	Presente en muchas ciudades y áreas rurales
<b>Tren Suburbano</b>	Sistema de trenes que conectan áreas urbanas con suburbios y localidades cercanas	Ciudad de México (Valle de México)
<b>Tranvía</b>	Sistema de trenes eléctricos que circulan en vías fijas en áreas urbanas	(En el pasado: Ciudad de México, Guadalajara, Monterrey)
<b>Bicicleta Pública</b>	Sistema de alquiler de bicicletas para uso en áreas urbanas	Ciudad de México, Guadalajara, Puebla, Monterrey, entre otros
<b>Taxi</b>	Servicio de transporte público individualizado	Presente en todas las ciudades del país
<b>Taxi Colectivo / Pesero</b>	Servicio de transporte compartido en rutas fijas y paradas establecidas e informales	Presente en algunas ciudades del país

En la ZMVM, el transporte público enfrenta desafíos importantes, como la saturación de las redes, la falta de mantenimiento y modernización, la inseguridad y la contaminación del aire. Para enfrentar estos retos, las autoridades están trabajando en la expansión y modernización

de la infraestructura de transporte público, la implementación de sistemas de transporte integrados y la promoción de soluciones de movilidad más sostenibles y amigables con el medio ambiente.

La Ciudad de México, anteriormente conocida como el Distrito Federal, es la capital del país y el núcleo urbano más importante de la Zona Metropolitana del Valle de México. En esta metrópoli, el transporte público es esencial para satisfacer las necesidades de movilidad de una población creciente y diversa.



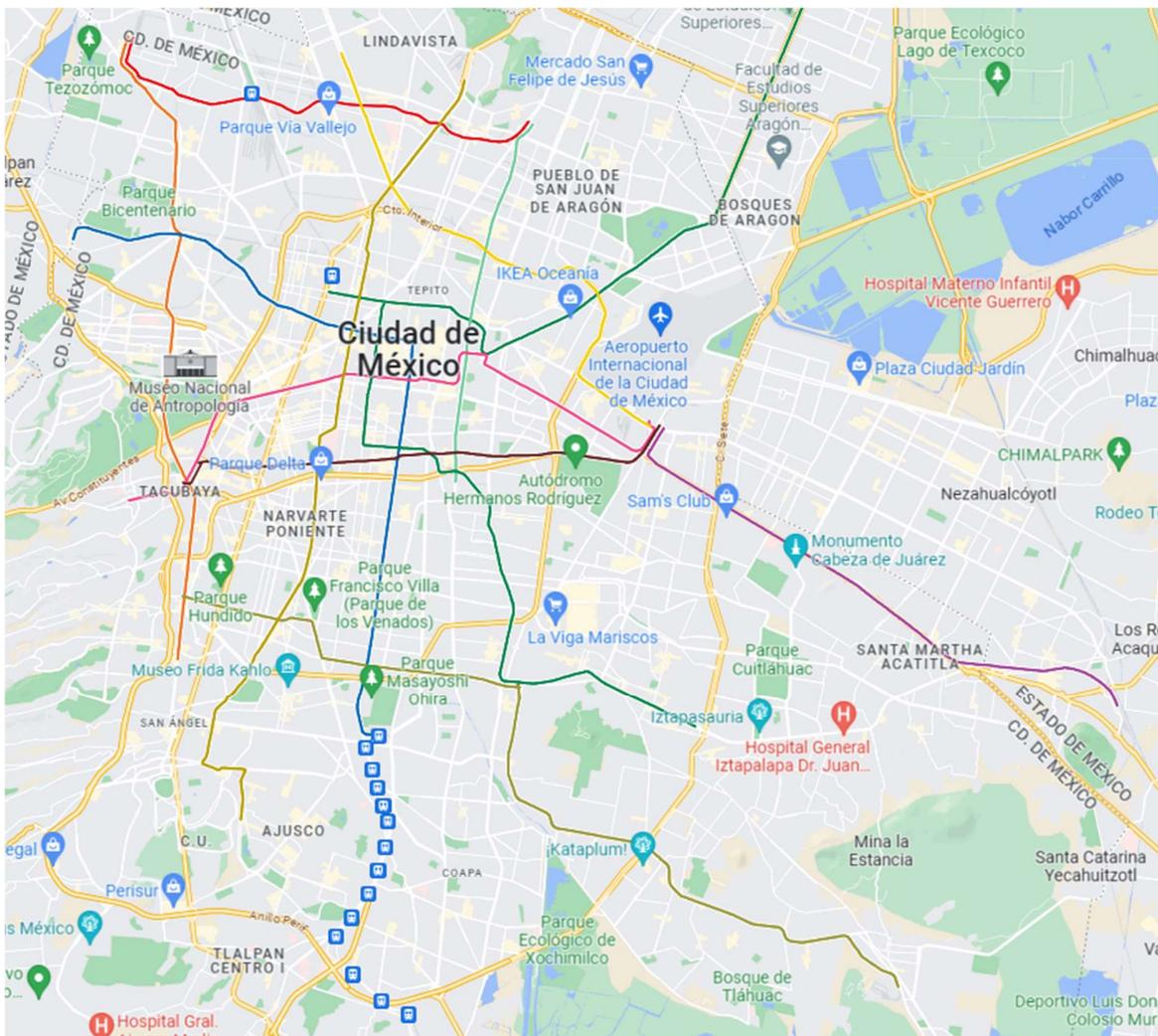
Ilustración 1 - Imagen de los municipios de la zona metropolitana del Valle de México. INEGI-CONACYT 2017.

A pesar de la amplitud del sistema de transporte público en la Ciudad de México, aún persisten desafíos en términos de capacidad, eficiencia, accesibilidad y sostenibilidad. Las autoridades de la ciudad están trabajando en la implementación de estrategias para mejorar el transporte público, como la expansión de las líneas de metro y Metrobús, y las nuevas

líneas de Cablebús y Trolebús, la promoción de soluciones de movilidad compartida y la integración de tecnologías más limpias y sostenibles en el transporte público.

### **Sistema de transporte colectivo Metro**

El Sistema de Transporte Colectivo Metro de la Ciudad de México fue inaugurado el 4 de septiembre de 1969, con la apertura de la primera línea que iba de Zaragoza a Chapultepec. Este proyecto fue impulsado por el entonces Regente del Distrito Federal, Alfonso Corona del Rosal, como respuesta al rápido crecimiento poblacional de la ciudad y a la necesidad de contar con un medio de transporte público masivo y eficiente. A lo largo de los años, el Metro ha experimentado una serie de expansiones y mejoras, convirtiéndose en uno de los sistemas de transporte más importantes de América Latina.



*Ilustración 2 - Mapa de la Ciudad de México y las líneas actuales de metro y tren ligero. Google Maps 2023.*

La última adición a la red del STC Metro es la ampliación de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México es un proyecto en desarrollo que busca extender el servicio de esta línea hacia el sur de la capital mexicana. El objetivo de esta expansión en la alcaldía Álvaro Obregón es mejorar la conectividad en la zona y ofrecer una opción de transporte público rápido y eficiente a los habitantes de las áreas que se beneficiarán con la nueva infraestructura. La ampliación contempla la construcción de aproximadamente 4.6

kilómetros de vía y la adición de tres nuevas estaciones, lo que permitirá atender a una mayor cantidad de usuarios y aliviar la congestión vehicular en las áreas circundantes.

El Metro de la Ciudad de México actualmente cuenta con 12 líneas en operación, las cuales abarcan una longitud total de aproximadamente 226 kilómetros. El sistema está compuesto por 195 estaciones, de las cuales 115 son subterráneas, 54 son de superficie y 26 son elevadas. Estas líneas y estaciones cubren gran parte de la ciudad y conectan a diferentes áreas metropolitanas, facilitando el desplazamiento de los habitantes y visitantes de la capital mexicana.



Ilustración 3 - Mapa de la red del STC Metro de la CDMX.

[https://metro.cdmx.gob.mx/storage/app/media/red/plano\\_red19.pdf](https://metro.cdmx.gob.mx/storage/app/media/red/plano_red19.pdf)

El Metro de la Ciudad de México es utilizado diariamente por alrededor de 4.4 millones de personas, convirtiéndose en uno de los sistemas de transporte público más concurridos del mundo. Esta gran afluencia de usuarios representa un reto para el mantenimiento, la operación y la seguridad del sistema. No obstante, el Metro sigue siendo un medio de transporte fundamental para la ciudad, ya que permite a los ciudadanos acceder a empleos, servicios y actividades de manera rápida y económica.

Tabla resumen de estaciones y líneas del STC Metro de la CDMX:

*Tabla 2 - Estaciones y líneas de Metro en la CDMX. Elaboración propia.*

Número de línea	Color	Cantidad de estaciones	Año de construcción
<b>1</b>	Rosa	20	1969
<b>2</b>	Azul	24	1970
<b>3</b>	Verde Olivo	21	1970
<b>4</b>	Cian	10	1981
<b>5</b>	Amarillo	13	1982
<b>6</b>	Rojo	11	1983
<b>7</b>	Naranja	14	1984
<b>8</b>	Verde	19	1994
<b>9</b>	Café	12	1987
<b>A (10)</b>	Morado	10	1991
<b>B (11)</b>	Verde Lima	21	1999
<b>12</b>	Oro	20	2012
<b>A12</b>	Oro	3	2024
<b>Total</b>	-	198	-

A través del tiempo la utilización del sistema de transporte colectivo metro requerirá que se amplíen las líneas existentes en la ciudad de México y que inclusive existan líneas de metro en el estado de México para poder abarcar la cantidad de personas que lo utilizan debido a que un transporte masivo como el metro es una solución muy útil en grandes ciudades.

La expansión del sistema de metro en la Ciudad de México es de vital importancia para abordar el crecimiento de la población y la creciente demanda de transporte público eficiente y accesible. El metro es un medio de transporte rápido, económico y ecológico que permite a millones de personas viajar diariamente a sus lugares de trabajo, estudios y actividades recreativas.

Al contar con más líneas de metro (STC Metro), se logra una mayor cobertura geográfica y una mejora en la conectividad de la ciudad, reduciendo los tiempos de traslado y descongestionando el tráfico vehicular en superficie. Además, un sistema de metro ampliado y bien planificado también contribuye a la reducción de emisiones contaminantes, lo que

mejora la calidad del aire y mitiga el efecto nocivo de la contaminación en la salud de la población.

La proyección del crecimiento de estaciones y pasajeros se mostrará en la siguiente tabla:

Tabla 3 - Pasajeros, líneas y número de estaciones por lustro. Elaboración propia.

<b>Año</b>	<b>Pasajeros diarios (millones)</b>	<b>Número de líneas</b>	<b>Número de estaciones</b>
1969	0.2	1	16
1974	1.2	3	48
1979	2.1	5	82
1984	3.0	7	105
1989	3.7	9	128
1994	3.8	11	164
1999	4.2	11	175
2004	4.5	11	175
2009	4.7	12	195
2014	5.1	12	195
2024	5.4*Esperado	12	198

### **Supervisión y gerencia de proyectos en México**

La supervisión de obra es un proceso esencial en cualquier proyecto de construcción, ya que garantiza el cumplimiento de las especificaciones técnicas, normas y estándares de calidad. La empresa de supervisión de obra debe contar con profesionales capacitados y experimentados, capaces de identificar y resolver problemas, así como de coordinar y comunicarse eficazmente con los diferentes actores involucrados en el proyecto, como contratistas, ingenieros y arquitectos.

La función principal de la supervisión de obra consiste en monitorear constantemente la ejecución del proyecto, asegurando que se cumplan los plazos y se ajusten a los costos presupuestados. Además, la supervisión de obra debe garantizar la seguridad y bienestar de los trabajadores, promoviendo un entorno laboral saludable y libre de riesgos. La correcta supervisión de obra es un factor clave para el éxito del proyecto y la satisfacción del cliente.

La implementación de tecnologías y herramientas modernas es fundamental en la supervisión de obra, permitiendo un seguimiento más preciso y eficiente del progreso del proyecto. El uso de sistemas de información geográfica (GIS), drones y sistemas de monitoreo en tiempo real facilita la toma de decisiones y permite anticipar y abordar posibles contingencias en el desarrollo de la construcción.

La gerencia de proyectos es una disciplina que abarca la planificación, organización, dirección y control de los recursos para alcanzar los objetivos específicos de un proyecto de construcción. Un gerente de proyectos efectivo debe poseer habilidades técnicas, de liderazgo

y de comunicación, siendo capaz de coordinar y gestionar los diferentes aspectos del proyecto, desde su concepción hasta su entrega.

Un aspecto clave en la gerencia de proyectos es la gestión de riesgos, que implica la identificación, evaluación y tratamiento de los posibles eventos adversos que podrían afectar el desarrollo del proyecto. El gerente de proyectos debe contar con estrategias y herramientas adecuadas para minimizar los impactos negativos de los riesgos y aprovechar las oportunidades que surjan durante la ejecución de la obra.

La implementación de metodologías y marcos de trabajo, como el *Project Management Institute (PMI)* y sus estándares, es esencial para asegurar la eficiencia y efectividad en la gerencia de proyectos. Estos enfoques proporcionan una estructura y un conjunto de mejores prácticas que ayudan al gerente de proyectos a alcanzar los objetivos de manera ordenada y sistemática, optimizando el uso de recursos y maximizando la satisfacción del cliente.

## **I.-Procesos constructivos para supervisar en la Obra Civil**

### **1.1-Construcción de Lumbreras.**

Una lumbrera es una estructura vertical que se construye para facilitar la excavación y construcción de túneles de intertramo y estaciones de metro. El proceso de construcción de una lumbrera comienza con la limpieza del área de trabajo, eliminando árboles, vegetación y cualquier instalación que pueda interferir con la obra, como cables eléctricos o fibra óptica. Una vez protegida la periferia con tapiales, se procede a nivelar y preparar el terreno con la ayuda de brigadas de topografía.

Posteriormente, se excava y estructura el primer anillo o brocal, que iniciará la construcción de la lumbrera. A medida que se completa la excavación del primer anillo, se continúa excavando desde la superficie hacia abajo en capas, revistiendo con concreto lanzado para proporcionar resistencia a la excavación. Dependiendo del proyecto, la profundidad de la lumbrera puede variar entre 10 y 60 metros.



*Ilustración 4 - Excavación y habilitado de acero de refuerzo para el Brocal de la lumbrera. SOBSE 2018.*

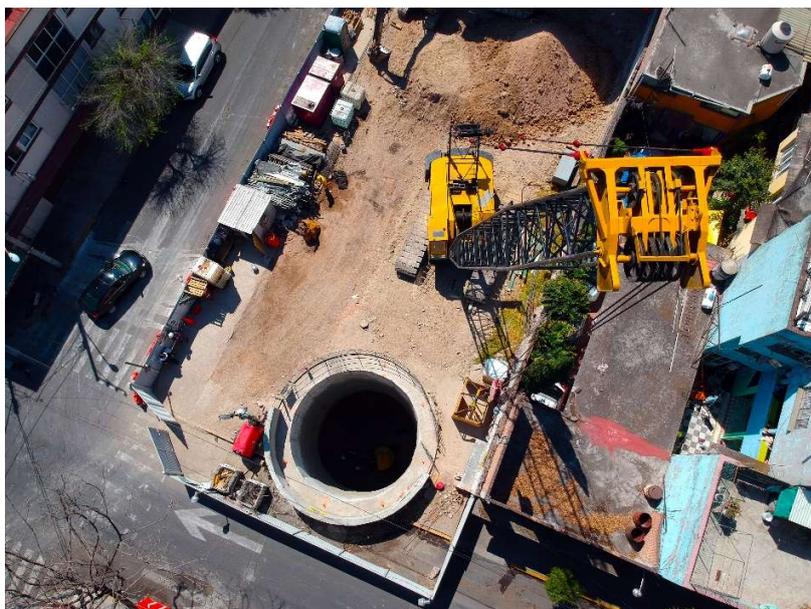
Una vez terminada la excavación, se procede al armado o habilitado de acero de refuerzo en toda la periferia de la lumbrera. A continuación, se utiliza una cimbra metálica deslizable

para colar concreto hidráulico de alta resistencia en la estructura. El uso de aditivos acelerantes en el concreto permite que el fraguado se realice de manera más rápida, permitiendo finalizar la estructuración de la lumbrera en menos tiempo.

Durante la construcción de la lumbrera, es fundamental llevar a cabo estudios de nivelación y verticalidad en la excavación, la estructuración y el colado del concreto. Tras el fraguado, se realiza un seguimiento mediante monitoreo topográfico para verificar desplazamientos o deformaciones en la lumbrera. Este monitoreo se lleva a cabo en puntos específicos en la superficie, el primer anillo estructurado y en varios sectores a lo largo de la profundidad de la lumbrera.



*Ilustración 5 - Fotografía aérea de lumbrera. SOBSE 2018.*



*Ilustración 6 - Fotografía aérea de lumbrera. SOBSE 2019.*

## 1.2-Construcción de Túneles de Intertramo.

El proceso constructivo de un túnel de intertramo comienza a partir de la última excavación y estructuración de nuestras lumbreras. La excavación se llevará a cabo seleccionando la parte superior, la parte inferior lateral y la parte inferior central. De esta forma, podremos proteger a nuestros trabajadores y maquinaria en caso de que los suelos sean muy sensibles, como arenas, arenas limosas, gravas y rellenos antrópicos, asegurando la estabilidad adecuada del túnel. Después de cada etapa de excavación, se aplicará concreto lanzado con fibras de acero para brindar soporte inicial al túnel, con resistencias promedio de 250 kg/cm<sup>2</sup>.



*Ilustración 7 - Excavación de la sección superior de túnel. SOBSE 2021.*

Todo el material excavado será trasladado a la lumbrera, donde, mediante grúas, se llevará a la superficie para su posterior retiro a un sitio de disposición. A continuación, se procederá con la estructuración del túnel, comenzando con el habilitado de acero de refuerzo para los muros hastiales. Después, se deberá cimbrar cada uno de estos muros, cuidando mucho la alineación con brigadas topográficas y verificando la calidad del concreto hidráulico, que se verterá en la cimbra con un espesor promedio de 40 cm.



*Ilustración 8 - Movimiento de material de rezaga producto de la excavación a la lumbrera y su posterior retiro a superficie. SOBSE 2021.*

Posterior al cimbrado y fraguado, se continuará con el habilitado de acero de refuerzo para la bóveda y la losa de fondo. Para la bóveda, se necesitará maquinaria que apoye al personal en el armado de la doble parrilla de acero de refuerzo, mientras que, para la losa de fondo, el armado podrá ser realizado únicamente con personal a pie y sobre el nivel de la losa. La bóveda será revestida con concreto lanzado de mayor resistencia y con aditivos de fraguado rápido, mientras que la losa de fondo se construirá con concreto hidráulico, con un espesor promedio de 60 a 80 cm. El revestimiento definitivo o secundario de la bóveda del túnel tendrá un espesor de 40 a 60 cm, de acuerdo con el proyecto ejecutivo ( $f'c > 350 \text{ kg/cm}^2$ ).



*Ilustración 9 - Habilidad de acero de refuerzo. SOBSE 2020.*

Durante todo el proceso de excavación, revestimiento primario, estructuración y revestimiento secundario del túnel de intertramo, se deben tener brigadas de topografía para verificar la sección del túnel, asegurándose de que no tenga mayor o menor espesor y se ajuste al eje construido del proyecto. Es fundamental respetar la sección debido a los espacios reducidos para colocar, en una etapa futura, todas las instalaciones electromecánicas propias de un metro.

Además, durante todo el proceso de construcción del túnel, se debe verificar constantemente la nivelación para mantener la pendiente del proyecto ejecutivo, ya que existirán zonas con pendiente neutra, positiva o negativa que afectarán directamente al sistema de drenaje del túnel. Para la unión entre una lumbrera y un túnel de intertramo, tras la estructuración del túnel y de la lumbrera, se realizará un armado o habilitado de acero de refuerzo especial en la conexión, seguido de un lanzamiento de concreto para reforzarla.

Es importante tener en cuenta que durante la construcción de túneles de intertramo, la seguridad y la calidad deben ser prioritarias en todo momento. La colaboración entre los diferentes equipos de trabajo, como las brigadas topográficas, los ingenieros y el personal de

construcción, es fundamental para garantizar que el proyecto se desarrolle de manera eficiente y conforme a las especificaciones técnicas.

La construcción de túneles de intertramo es un proceso complejo que requiere una planificación cuidadosa, una ejecución precisa y un seguimiento riguroso para garantizar que el proyecto se complete con éxito y cumpla con los estándares de seguridad y calidad. Al abordar estos desafíos de manera efectiva, se podrá asegurar una infraestructura de transporte subterráneo sólida y duradera que beneficie a la población y mejore la movilidad en la ciudad.

### **1.3-Construcción de Túneles de Estación y túneles secundarios.**

La construcción de túneles de estación y túneles secundarios sigue un proceso similar al de los túneles de intertramo. La excavación y el revestimiento primario se realizan de la misma manera. La diferencia radica en la estructuración del muro central de la estación, que se llevará a cabo una vez que se haya completado y fraguado el concreto de los muros hastial y losa de fondo (aunque hay casos que la losa de fondo puede realizarse después pero no antes del colado de la bóveda). Posteriormente, se empleará una cimbra móvil para inyectar concreto hidráulico en la bóveda del túnel, avanzando en tramos de 9 metros hasta completar toda la bóveda del túnel en una vía. Una vez finalizada la estructuración del primer túnel, se procederá con la excavación y estructuración de la segunda vía, utilizando también una cimbra deslizable para el revestimiento definitivo de la bóveda con concreto hidráulico.



*Ilustración 10 - Cimbra metálica deslizante para la bóveda del túnel de estación. SOBSE 2020.*



*Ilustración 11 - Estructuración de losa de fondo, muro hastial y muro central de estación. Cimbra deslizante para el colado de bóveda. Estación de 1 vía terminada su estructuración. SOBSE 2020.*

Los túneles secundarios dentro de una estación de metro solo deben excavar después de que se haya completado la estructuración de los túneles principales de la estación. Estos túneles secundarios siguen la misma metodología de excavación y revestimiento primario que los túneles de intertramo y estaciones. Es importante asegurarse de dejar espacio para las instalaciones electromecánicas o cualquier otro elemento necesario en la estación. Al finalizar la construcción de los túneles secundarios, se debe completar la losa y el muro del andén principal peatonal, lo que marca el fin de los trabajos de obra civil de la estación. Después de esto, continuarán los trabajos de preparación e instalaciones electromecánicas, así como la colocación del balasto y vías, para finalmente realizar las pruebas definitivas del material rodante.



*Ilustración 12 – Estructuración de túnel secundario de estación. SOBSE 2021.*

#### 1.4-Sistemas de impermeabilización.

En situaciones particulares que requieren impermeabilización, durante el proceso constructivo de todos los túneles, ya sean de intertramo, estaciones, túneles secundarios o túneles de conexión, es esencial aplicar una combinación de geomembrana y geotextil entre el revestimiento primario y el revestimiento definitivo del túnel. Estos materiales trabajan conjuntamente para retener y canalizar al drenaje el agua en el túnel, evitando que la humedad se infiltre en el área principal donde se ubican las instalaciones electromecánicas, las vías y el material rodante. Así, se logra proteger y extender la vida útil del proyecto.



*Ilustración 13 - Trabajos de impermeabilización en túnel. SOBSE 2020.*



*Ilustración 14 - Trabajos de impermeabilización en túnel. SOBSE 2020.*

## **1.5-Nichos, cárcamos y túneles de conexión.**

### **1.5.1-Nichos:**

Los nichos en túneles son pequeñas cavidades o espacios ubicados a lo largo de las paredes de los túneles, diseñados para albergar equipos, dispositivos de seguridad o instalaciones auxiliares. Estos nichos pueden ser utilizados para alojar sistemas de iluminación, extintores, sistemas de comunicación, sistemas de ventilación y otros dispositivos esenciales para garantizar la seguridad y el buen funcionamiento de los túneles. Además, los nichos también pueden proporcionar espacios de refugio para los trabajadores o usuarios del túnel en caso de emergencias o situaciones peligrosas.



*Ilustración 15 - Nicho para instalaciones electromecánicas. SOBSE 2020.*

### **1.5.2-Cárcamos:**

Los cárcamos en túneles son estructuras de ingeniería diseñadas para recolectar y gestionar el agua que se filtra o acumula en los túneles. Estos sistemas de drenaje son esenciales para mantener el buen funcionamiento y la seguridad de los túneles, especialmente en áreas propensas a inundaciones o con alta presencia de agua subterránea. Los cárcamos suelen estar equipados con bombas y sistemas de control para extraer el agua de manera eficiente y garantizar que no se acumule en niveles peligrosos. Además, pueden incluir sistemas de tratamiento de agua para garantizar que el agua extraída cumpla con los estándares ambientales antes de su descarga.

### **1.5.3-Túneles de conexión:**

Los túneles de conexión son pasajes subterráneos que enlazan diferentes partes de un sistema de túneles o conectan túneles con otras infraestructuras, como estaciones de metro, estacionamientos subterráneos o incluso otros túneles. Estos túneles de conexión pueden tener múltiples propósitos, incluida la facilitación de la circulación de personas, vehículos o materiales, la conexión de sistemas de ventilación, drenaje o suministro eléctrico, y la mejora

de la accesibilidad y seguridad en caso de emergencias. Los túneles de conexión son cruciales para garantizar la eficiencia y la funcionalidad óptima de cualquier sistema de túneles.

Los túneles de conexión también se utilizan durante la construcción de un sistema de túneles para poder llegar a ubicaciones o trazo por el cuál no podría llegarse de forma vertical, por ejemplo, en zonas urbanas donde no pueden hacerse lumbreras sobre el trazo del túnel, de esta forma se buscará hacer la lumbrera en un punto paralelo al eje principal y por medio de un túnel de conexión lograr llegar a él.

### **1.6-Preparaciones electromecánicas.**

Es importante tener en cuenta varias preparaciones electromecánicas al construir y mantener un túnel de metro. Estos sistemas son esenciales para garantizar la seguridad, eficiencia y funcionalidad del transporte subterráneo. Algunas de las preparaciones electromecánicas clave en un túnel de metro incluyen:

**Sistema de tracción eléctrica:** Se debe instalar un sistema de tracción eléctrica eficiente y confiable para suministrar energía a los trenes y garantizar un funcionamiento sin problemas. Esto incluye la instalación de catenarias, rieles conductores, subestaciones eléctricas y sistemas de control y protección.

**Señalización y comunicaciones:** Es fundamental establecer un sistema de señalización y comunicaciones sólido para controlar el movimiento de los trenes y garantizar la seguridad de los pasajeros y el personal. Esto implica la instalación de señales, sistemas de control de tráfico, dispositivos de comunicación entre trenes y estaciones, y sistemas de detección de trenes.

**Ventilación y control del clima:** Los túneles de metro requieren sistemas de ventilación eficientes para garantizar un ambiente cómodo y seguro para los pasajeros y el personal. Esto incluye la instalación de ventiladores, conductos de aire y sistemas de control de temperatura y humedad.

**Iluminación:** Es importante proporcionar una iluminación adecuada en los túneles y estaciones de metro para garantizar la seguridad y la visibilidad. Esto implica la instalación de luminarias, sistemas de control y dispositivos de emergencia.

**Sistemas de seguridad y vigilancia:** Los túneles de metro deben contar con sistemas de seguridad y vigilancia para prevenir y responder a situaciones de emergencia. Esto incluye la instalación de cámaras de seguridad, sistemas de detección de incendios, alarmas y sistemas de evacuación.

**Drenaje y bombeo:** Los túneles de metro deben estar equipados con sistemas de drenaje y bombeo eficientes para gestionar el agua y prevenir inundaciones. Esto implica la instalación de drenajes, cárcamos y bombas para extraer y gestionar el agua acumulada en el túnel.

**Instalaciones auxiliares:** Es posible que se requieran otras instalaciones electromecánicas, como sistemas de energía de respaldo, equipos de mantenimiento y sistemas de control de acceso, para garantizar un funcionamiento eficiente y seguro de los túneles de metro.



*Ilustración 16 - Preparaciones para cableado sobre muro hastial. SOBSE 2021.*

Todas estas preparaciones electromecánicas deben planificarse e implementarse cuidadosamente durante la construcción del túnel de metro y mantenerse a lo largo de la vida útil del sistema de transporte.

### **1.7-Obras Inducidas.**

Las obras inducidas son proyectos adicionales o modificaciones que pueden ser necesarios para facilitar la construcción y operación de un túnel de metro y sus estaciones en una ciudad. Estas obras pueden variar según el contexto y las necesidades específicas del proyecto. Algunas de las obras inducidas comunes incluyen:

**Reubicación de infraestructuras existentes:** La construcción de un túnel de metro y sus estaciones a menudo requiere la reubicación o el refuerzo de infraestructuras existentes, como redes de alcantarillado, suministro de agua, drenaje, gas, electricidad y telecomunicaciones. Esta reubicación es fundamental para evitar interrupciones en los servicios y garantizar la seguridad durante la construcción.

**Mejoras en el transporte y la movilidad:** puede requerir mejoras en el transporte y la movilidad en la zona circundante, como la reconfiguración de calles, la construcción de puentes, pasos elevados y pasos a desnivel, y la implementación de carriles exclusivos para bicicletas y peatones.

**Obras de mitigación ambiental:** se pueden generar impactos ambientales que requieren obras de mitigación, como la instalación de barreras acústicas para reducir el ruido, la creación de áreas verdes y la implementación de sistemas de gestión de residuos y contaminación del aire.

**Desvío y mejora de tráfico:** Durante la construcción de un túnel de metro, es posible que sea necesario desviar el tráfico y mejorar la circulación en las áreas circundantes para minimizar las interrupciones y garantizar la seguridad. Esto puede incluir la instalación de señalización temporal, la creación de rutas alternativas y la implementación de medidas para mejorar la fluidez del tráfico.

**Reubicación y compensación a residentes y comerciantes:** durante el desarrollo del proyecto se puede requerir la adquisición de propiedades y la reubicación de residentes y comerciantes afectados. Las obras inducidas en este caso pueden incluir el desarrollo de planes de compensación, la construcción de viviendas y espacios comerciales temporales o permanentes y la implementación de programas de apoyo a las comunidades afectadas.

**Integración con otros modos de transporte:** parte de la planeación es la integración con otros modos de transporte, como autobuses y trolebuses de apoyo. Las obras inducidas en este caso pueden incluir la construcción de intercambiadores de transporte, estaciones multimodales y la implementación de sistemas de información y señalización integrados.

**Obras de urbanismo y paisajismo:** La construcción de un túnel de metro y sus estaciones puede generar oportunidades para mejorar el entorno urbano y el paisaje de la zona. Las obras inducidas en este caso pueden incluir la creación de plazas públicas, parques, áreas peatonales y de esparcimiento, y la mejora del mobiliario urbano y la iluminación.

Estas obras inducidas son fundamentales para garantizar que la construcción y operación de un túnel de metro y sus estaciones se integren de manera efectiva en la ciudad y contribuyan al desarrollo sostenible y la mejora de la calidad de vida de sus habitantes. La planificación y ejecución de estas obras requieren una estrecha coordinación entre las autoridades de transporte, los organismos gubernamentales, las empresas constructoras y las comunidades locales. Además, es importante llevar a cabo un seguimiento y evaluación de las obras inducidas para garantizar que cumplan con sus objetivos y no generen impactos negativos no previstos. Las obras inducidas son componentes clave en la realización de un proyecto de túnel de metro y estaciones en una ciudad, y su correcta implementación es crucial para el éxito a largo plazo del sistema de transporte público.



*Ilustración 17 - Trabajos previos para Obras Hidráulicas Inducidas para cambiar la traza de tuberías de agua potable. SOBSE 2021.*

## II.-Control de proyecto

### 2.1.1-Instrumentación y monitoreo topográfico.

La topografía es una disciplina fundamental en la construcción y supervisión de túneles de metro y estaciones. Es la ciencia que se encarga de la descripción y representación detallada de la superficie terrestre, tanto en planta como en altura. En el contexto de la construcción de túneles y estaciones de metro, la topografía es esencial para el diseño, trazado, control y seguimiento del avance de las obras, garantizando que se ejecuten de acuerdo con las especificaciones del proyecto.



*Ilustración 18 - Trabajos de revisión topográfica en túnel. SOBSE 2021.*

Para llevar a cabo un seguimiento topográfico adecuado, se utilizan diferentes técnicas y equipos, como estaciones totales, GPS, sistemas de medición láser y sistemas de escaneo 3D. Estos instrumentos permiten medir con precisión las coordenadas, distancias, ángulos y elevaciones de los puntos de interés en el terreno, así como en la estructura en construcción, para asegurar que las obras se realicen de acuerdo con los planos y especificaciones del proyecto.

Un aspecto crucial en la construcción de túneles y estaciones de metro es el monitoreo geodésico, que consiste en la medición de movimientos y deformaciones del terreno y de las estructuras adyacentes a lo largo del tiempo. Este monitoreo permite detectar cambios en las condiciones del terreno y en la estabilidad de las estructuras, lo que puede ser indicativo de posibles problemas o riesgos que requieran intervención.

Los sistemas de monitoreo automático, como el monitoreo de inclinación, deformación y desplazamiento son fundamentales para garantizar la seguridad y eficiencia de las obras. Estos sistemas permiten realizar mediciones en tiempo real y de forma continua, lo que facilita la toma de decisiones rápidas y efectivas ante cualquier situación que ponga en riesgo la integridad de la obra o la seguridad de los trabajadores.



*Ilustración 19 - Equipos que pueden ser utilizados por las brigadas topográficas, niveles, estaciones totales, tripies, prismas, y sistemas GPS.*

Además de la topografía y el monitoreo geodésico, es crucial contar con un equipo multidisciplinario de especialistas en geotecnia, estructuras y sistemas de transporte para asegurar la correcta ejecución de las obras y la eficiente operación del STC Metro. Estos profesionales trabajarán de manera coordinada para analizar los datos recopilados, identificar problemas potenciales y diseñar soluciones apropiadas para cada situación.

La topografía y los sistemas de monitoreo juegan un papel fundamental en la construcción y supervisión de túneles de metro y estaciones. Estas herramientas y técnicas permiten asegurar el cumplimiento de las especificaciones del proyecto, garantizar la seguridad de las obras y minimizar los riesgos asociados a la construcción de infraestructuras subterráneas en entornos urbanos complejos.

Se proporcionará una tabla con los equipos utilizados por brigadas de topografía, y una breve descripción de su uso en este tipo de construcción de infraestructura.

Tabla 4 - Equipo de topografía. Elaboración propia.

Equipo de topografía	Descripción
<b>Estación total</b>	Instrumento óptico-electrónico utilizado para medir ángulos horizontales y verticales, así como distancias. Permite la determinación precisa de coordenadas de puntos en el terreno y en estructuras.
<b>GPS (Sistema de Posicionamiento Global)</b>	Dispositivo que utiliza la señal de satélites para determinar coordenadas y alturas de puntos en el terreno con gran precisión. Útil para levantamientos topográficos y seguimiento de la construcción en áreas extensas.
<b>Nivel óptico</b>	Instrumento utilizado para medir diferencias de altura entre puntos en el terreno. Esencial para establecer cotas de referencia y controlar las pendientes y desniveles en la construcción de túneles y estaciones de metro.
<b>Escáner Láser 3D</b>	Dispositivo que utiliza tecnología láser para generar nubes de puntos tridimensionales de objetos y superficies. Permite obtener información detallada y precisa de la geometría de las estructuras y el terreno en construcción de túneles y estaciones.
<b>Nivel digital</b>	Instrumento que combina las características de un nivel óptico y un distanciómetro electrónico. Permite medir distancias y diferencias de altura entre puntos en el terreno de manera rápida y precisa.
<b>Plomada láser</b>	Herramienta que emite un haz láser vertical para asegurar la alineación y plomada de elementos en la construcción, como pilares y muros.
<b>Cinta métrica</b>	Herramienta de medición básica que permite medir distancias lineales en el terreno y en las estructuras. Es útil para verificaciones rápidas y mediciones de corta distancia.
<b>Drones</b>	Vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras y/o sensores que pueden capturar imágenes y datos geoespaciales en alta resolución. Útiles para inspecciones aéreas, levantamientos topográficos y seguimiento del progreso de la construcción.

### 2.1.2-Caso especial de modelado tridimensional utilizando drones para inspecciones y apoyo a la topografía y supervisión en la construcción:

El modelado tridimensional a partir de vuelos de drones y la fotogrametría han revolucionado la forma en que se realiza la inspección y el seguimiento de obras de construcción, como la de túneles de metro y estaciones. La fotogrametría es una técnica que utiliza imágenes capturadas desde diferentes ángulos y perspectivas para generar modelos tridimensionales precisos de objetos y terrenos.

Los drones, al ser vehículos aéreos no tripulados, permiten capturar imágenes de alta resolución y abarcar grandes extensiones de terreno en poco tiempo. Esto resulta especialmente útil para la inspección y seguimiento de la obra en áreas de difícil acceso o peligrosas para los trabajadores.

Una vez que las imágenes han sido capturadas por los drones, se utilizan programas especializados en fotogrametría para procesarlas y construir un modelo tridimensional del área de interés. Estos modelos proporcionan una representación visual detallada de las estructuras y el terreno, lo que permite analizar y evaluar el progreso de la construcción, así como detectar posibles problemas o áreas que requieran atención.

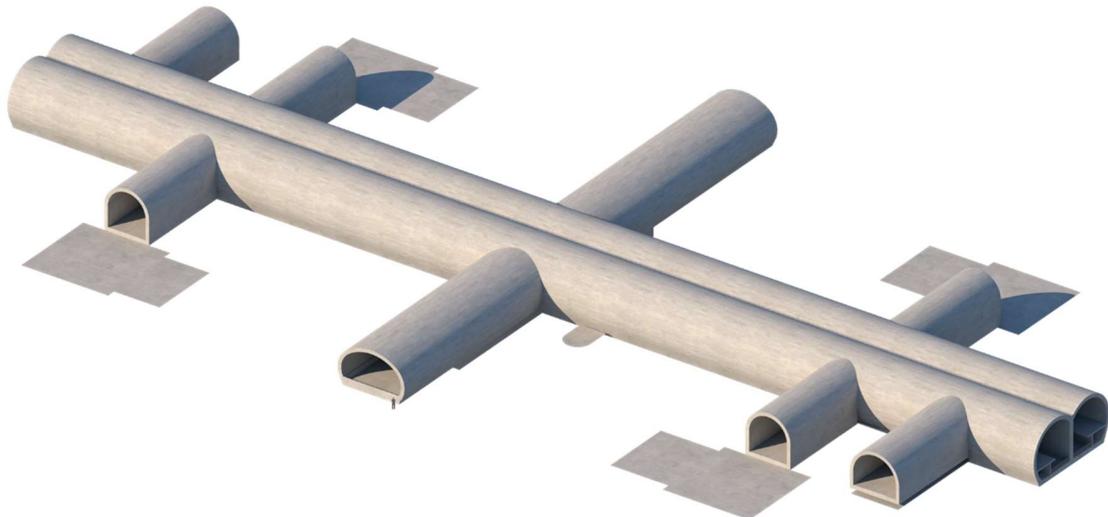
Además, los modelos tridimensionales generados a partir de fotogrametría pueden integrarse con sistemas de información geográfica (SIG) y programas de diseño y construcción, como AutoCAD y Revit. Esto facilita la colaboración entre los diferentes actores del proyecto, como ingenieros, arquitectos y constructores, al proporcionar una base de datos espacial común.

La utilización de drones y fotogrametría en el seguimiento de obras de construcción de túneles y estaciones de metro también contribuye a mejorar la seguridad en el sitio, ya que reduce la necesidad de que los trabajadores accedan a áreas de alto riesgo. Además, los datos recopilados permiten anticipar y gestionar problemas antes de que se conviertan en obstáculos costosos y que retrasen el proyecto.



*Ilustración 20 - Diferentes drones que pueden ser utilizados en la supervisión de la construcción, varían en tamaño, tiempo de vuelo y calidad de cámara. DJI 2023.*

El modelado tridimensional a partir de vuelos de drones y la fotogrametría han transformado la forma en que se lleva a cabo la inspección y seguimiento de obras de construcción, ofreciendo una herramienta eficiente, precisa y segura para monitorear el progreso y garantizar la calidad en la construcción de túneles de metro y estaciones. Esta información podrá utilizarse para desarrollar modelos más limpios y que sirvan para toma de decisiones o seguimiento.



*Ilustración 21 - Modelo 3D de un sistema de túneles gemelos y túneles secundarios de una estación. Realizado en SketchUp2020/Blender 2020/Vray20. SOBSE 2020.*

## **2.2-Seguimiento geotécnico.**

La construcción de túneles en la Ciudad de México presenta un desafío geológico y geotécnico debido a la diversidad de suelos y condiciones geológicas en la zona. Una estrategia efectiva de seguimiento geológico y geotécnico es esencial para abordar estos desafíos y garantizar la estabilidad y seguridad de la obra.

En primer lugar, es fundamental realizar un estudio geotécnico detallado antes de iniciar la construcción del túnel. Este estudio debe incluir la identificación de las formaciones geológicas y las propiedades del suelo en la trayectoria del túnel, así como la presencia de cuerpos de agua y zonas de riesgo sísmico. Además, se deben analizar las condiciones de estabilidad de las excavaciones y las estructuras de soporte necesarias en función del tipo de suelo encontrado.

Durante la construcción del túnel, se debe implementar un programa de monitoreo geotécnico que permita detectar y evaluar las deformaciones del suelo y las estructuras de soporte. Este programa debe incluir instrumentos como extensómetros, inclinómetros, piezómetros y otros sensores que permitan medir en tiempo real el comportamiento del suelo y el avance de la excavación.

Es importante contar con un equipo multidisciplinario de especialistas en geotecnia, geología y estructuras para interpretar los datos del monitoreo y tomar decisiones en función de los resultados. Este equipo debe estar en comunicación constante con los responsables de la construcción para asegurar una respuesta rápida y efectiva ante cualquier eventualidad.

En función del tipo de suelo, se deben implementar técnicas constructivas adecuadas para garantizar la estabilidad y seguridad del túnel. En la Ciudad de México, es común encontrar suelos arcillosos, limosos y arenosos, así como roca volcánica. Cada tipo de suelo requiere un enfoque diferente en cuanto a la excavación, el sostenimiento y el revestimiento del túnel.

Una estrategia de seguimiento geotécnico también debe incluir un plan de contingencia que permita enfrentar situaciones imprevistas o cambios en las condiciones geológicas. Este plan debe establecer protocolos claros de acción y comunicación en caso de emergencias, como inundaciones, deslizamientos de tierra o colapsos en la excavación.

Finalmente, es esencial considerar el impacto ambiental y social de la construcción del túnel. La estrategia de seguimiento geotécnico debe contemplar la minimización de riesgos asociados a la generación de vibraciones, la liberación de emisiones contaminantes y el manejo de residuos sólidos y líquidos. Además, se deben identificar posibles afectaciones a infraestructura existente y áreas naturales protegidas, así como implementar medidas de mitigación y compensación correspondientes.

Casos especiales en la Ciudad de México, rellenos Antrópicos: El material de relleno antrópico es aquel que ha sido modificado o depositado por actividades humanas, como desechos de construcción, escombros o suelos desplazados. Este tipo de material puede presentar desafíos geotécnicos y geológicos en la construcción de túneles debido a sus características heterogéneas y a menudo impredecibles. A continuación, se describen algunas estrategias para abordar el tema geotécnico y geológico al encontrar material de relleno antrópico.

**Estudio geotécnico preliminar:** Antes de iniciar la construcción del túnel, es esencial realizar un estudio geotécnico detallado que identifique la presencia de material de relleno antrópico y determine sus propiedades físicas y mecánicas. Esto incluye la realización de sondeos, pruebas de laboratorio y análisis geofísicos para caracterizar el material y definir su distribución y extensión a lo largo del trazado del túnel.

**Monitoreo y adaptabilidad en la construcción:** Durante la excavación, es crucial monitorear el avance y la estabilidad de la obra. Si se encuentra material de relleno antrópico no previsto, se debe adaptar el método de construcción y el diseño de las estructuras de soporte en función de las características geotécnicas del material. Esto puede implicar cambios en las técnicas de excavación, la utilización de sistemas de sostenimiento más resistentes o la modificación del trazado del túnel.

**Control de calidad:** Es importante mantener un estricto control de calidad en la construcción del túnel al encontrar material de relleno antrópico. Esto implica verificar que las estructuras de soporte y los revestimientos cumplen con los requisitos de resistencia y estabilidad establecidos en el diseño y las normativas aplicables.

**Mitigación de riesgos:** En función de las características del material de relleno antrópico, se deben implementar medidas de mitigación de riesgos para garantizar la seguridad y estabilidad del túnel. Esto puede incluir la realización de tratamientos de consolidación del suelo, como inyecciones de cemento o resinas, o la utilización de sistemas de drenaje para controlar la presencia de agua.

**Gestión de residuos y materiales:** La excavación de material de relleno antrópico puede generar residuos y materiales que requieren un manejo adecuado. Es necesario desarrollar un plan de gestión de residuos y materiales que contemple su clasificación, transporte y disposición final en función de las normativas ambientales y sanitarias aplicables.

**Comunicación y coordinación:** La presencia de material de relleno antrópico puede generar incertidumbre y cambios en el proyecto. Es fundamental mantener una comunicación fluida y coordinación entre los diferentes actores involucrados, como proyectistas, constructores, supervisores y autoridades, para garantizar una respuesta rápida y efectiva ante cualquier eventualidad.

**Plan de contingencia:** Por último, es importante contar con un plan de contingencia que permita enfrentar situaciones imprevistas o cambios en las condiciones geológicas al encontrar material de relleno antrópico. Este plan debe establecer protocolos claros de actuación, asignación de responsabilidades y recursos necesarios para abordar los problemas y garantizar la seguridad y la estabilidad de la construcción del túnel.

**Capacitación del personal:** Dada la complejidad que puede presentar la construcción de túneles en presencia de material de relleno antrópico, es fundamental que el personal involucrado en la obra cuente con la capacitación adecuada. Esto incluye la formación en técnicas de excavación, sistemas de sostenimiento, gestión de riesgos y procedimientos de seguridad específicos para estas condiciones geotécnicas.

**Revisión y actualización de la información geotécnica:** A medida que avanza la construcción del túnel y se obtiene nueva información sobre el material de relleno antrópico,

es importante actualizar los estudios geotécnicos y geológicos para reflejar las condiciones reales del sitio. Esto permite ajustar y optimizar el diseño y la ejecución del proyecto en función de la información más reciente.

**Integración con la comunidad y autoridades locales:** La presencia de material de relleno antrópico puede generar preocupaciones en la comunidad y las autoridades locales, especialmente en términos de seguridad y posibles impactos ambientales. Es fundamental mantener un diálogo abierto y transparente con estas partes interesadas, informar sobre las medidas adoptadas para garantizar la seguridad y minimizar los impactos, y abordar cualquier inquietud o pregunta que puedan tener.

En conclusión, al enfrentar el desafío que presenta el material de relleno antrópico en la construcción de túneles de metro y estaciones, es esencial contar con una estrategia integral que aborde los aspectos geotécnicos, geológicos, constructivos y de comunicación. Esto garantiza la seguridad, la estabilidad y la eficiencia en la ejecución del proyecto, minimizando los riesgos e impactos asociados a este tipo de material.

Aquí se mostrarán algunas normas mexicanas (NMX) y estadounidenses (ASTM) relacionadas con el control de calidad en geotecnia y geología, cabe mencionar que pueden existir mayores normas aplicables conforme cambie el proyecto o se actualicen dichas normas:

Tema / Área	NMX	ASTM
Muestreo de suelos	NMX-CC-9000-IMNC-2000	ASTM D1586, ASTM D3550
Clasificación de suelos		ASTM D2487, ASTM D3282
Ensayo de compactación Proctor		ASTM D698, ASTM D1557
Ensayo de límites de Atterberg		ASTM D4318
Permeabilidad de suelos		ASTM D5084, ASTM D2434
Ensayo de resistencia al corte (cizallamiento) en suelos		ASTM D3080, ASTM D4767
Densidad de suelos in situ		ASTM D2937, ASTM D2167, ASTM D6938
Pruebas de carga en placa		ASTM D1194, ASTM D1196
Ensayos de penetración estándar (SPT)		ASTM D1586
Muestreo de roca		ASTM D2113
Ensayos de compresión en roca		ASTM D7012
Ensayo de permeabilidad en roca		ASTM D4644, ASTM D4546
Ensayos de resistencia al corte en roca	ASTM D5607	

Tabla 5 - Normas mexicanas y americanas referente a geotecnia y geología. Elaboración propia.

## 2.3-Control de calidad.

### 2.3.1-Plan de calidad

El primer paso para garantizar la calidad en la construcción de túneles y estaciones de metro es desarrollar e implementar un plan de calidad. Este plan debe incluir objetivos de calidad, procedimientos y protocolos, responsabilidades, recursos y mecanismos de seguimiento y control.

**Normas y especificaciones técnicas:** La calidad depende en gran medida del cumplimiento de las normas y especificaciones técnicas aplicables. Estas normas pueden ser locales, nacionales o internacionales y abarcan aspectos como diseño, materiales, ejecución de obra, entre otros.

**Diseño de calidad:** Un diseño adecuado y bien fundamentado es esencial para garantizar la calidad en la construcción de túneles y estaciones de metro. El diseño debe ser realizado por profesionales con experiencia y conocimientos específicos en la materia, y deben tomar en cuenta las condiciones geotécnicas, geológicas, ambientales y sociales del proyecto.

**Selección de materiales:** La calidad de los materiales fundamental para lograr estructuras duraderas y seguras. Los materiales deben ser seleccionados de acuerdo con las especificaciones técnicas y cumplir con los estándares de calidad establecidos.

**Procedimientos constructivos:** La calidad en la construcción de túneles y estaciones de metro también depende de la correcta ejecución de los procedimientos constructivos. Estos procedimientos deben ser detallados y específicos para cada fase del proyecto y deben ser seguidos de manera rigurosa por el personal involucrado en la obra.

**Control de calidad en obra:** La supervisión y el control de calidad en obra son fundamentales para garantizar que se cumplan los requisitos de calidad establecidos en el plan de calidad y las especificaciones técnicas. Esto incluye la realización de inspecciones, pruebas y ensayos en los diferentes componentes de la obra, como el hormigón, los sistemas de sostenimiento, las instalaciones electromecánicas, entre otros.



*Ilustración 22 - La calidad en materiales, procesos constructivos y terminados es esencial para toda construcción en especial en túneles. SOBSE 2021.*

**Capacitación y formación del personal:** El personal involucrado en la construcción de túneles y estaciones de metro debe contar con la formación y capacitación necesaria para garantizar la calidad en la ejecución de los trabajos. Esto incluye la formación en procedimientos constructivos, control de calidad, seguridad e higiene, entre otros aspectos.

**Monitoreo y ajustes:** La calidad en la construcción también implica un monitoreo constante y la realización de ajustes cuando sea necesario. Esto permite identificar y corregir posibles problemas de calidad en etapas tempranas y garantizar el cumplimiento de los objetivos y requisitos de calidad establecidos.

**Documentación y registros:** La documentación y los registros de calidad son fundamentales para garantizar la trazabilidad y el seguimiento de los procesos de construcción y control de calidad en la obra. Esto incluye la elaboración de informes, registros de inspecciones y ensayos, entre otros documentos que permiten verificar el cumplimiento de los requisitos de calidad.

**Auditorías de calidad:** La realización de auditorías de calidad es una herramienta importante para evaluar el cumplimiento del plan de calidad y las especificaciones técnicas en la construcción de túneles y estaciones de metro. Las auditorías pueden ser internas o externas y deben realizarse periódicamente para identificar áreas de mejora y garantizar la efectividad de los procesos de calidad implementados.

**Certificaciones y acreditaciones:** Para garantizar la calidad es recomendable obtener certificaciones y acreditaciones de organismos reconocidos. Estas certificaciones pueden ser específicas para la industria de la construcción de túneles y estaciones de metro, o más generales relacionadas con la gestión de calidad en la construcción. Al obtener estas certificaciones, se demuestra el compromiso de la empresa constructora con la calidad y la mejora continua.

**Mejora continua:** La calidad en la construcción de túneles y estaciones de metro no es un objetivo estático, sino un proceso de mejora continua. Esto implica la identificación y análisis de problemas, la implementación de soluciones y la evaluación de los resultados para ajustar y mejorar constantemente los procesos y sistemas de calidad. La mejora continua asegura que la calidad en la construcción de túneles y estaciones de metro se mantenga a lo largo del tiempo y se adapte a los cambios y desafíos que puedan surgir.

### **2.3.2-Calidad de materiales en la construcción de un túnel de metro y estaciones:**

**Material de relleno:** El control de calidad del material de relleno es fundamental para asegurar la estabilidad y resistencia del terreno en la construcción de túneles y estaciones de metro. Se deben realizar pruebas de compactación y granulometría, así como verificar que el material esté libre de contaminantes y cumpla con las especificaciones establecidas.

**Relleno fluido:** La calidad del relleno fluido debe ser controlada mediante la medición de su fluidez, resistencia y tiempo de fraguado. También es importante asegurar que el material no contenga elementos nocivos o perjudiciales para la estructura o el entorno.

**Asfalto:** El control de calidad del asfalto incluye pruebas de viscosidad, adherencia y resistencia al desgaste. Además, se deben realizar ensayos de granulometría y contenido de asfalto en los agregados para garantizar que cumplan con las especificaciones requeridas.

**Concreto:** El control de calidad del concreto implica la realización de pruebas de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y durabilidad. También es necesario verificar la calidad del cemento, los agregados y la mezcla de agua para garantizar que se cumplan las proporciones adecuadas.

**Concreto lanzado:** El control de calidad del concreto lanzado debe incluir la evaluación de la resistencia, la cohesión y la adherencia a la superficie de aplicación. Además, es importante verificar la calidad del equipo de proyección y las condiciones de aplicación para garantizar un rendimiento óptimo.



*Ilustración 23 - La calidad de los trabajos es importante en todas las etapas del proyecto, manteniendo la mejor calidad de materiales, aplicación y limpieza. SOBSE 2022.*

En el caso del concreto tenemos aditivos que podrán ser utilizados para optimizar y mejorar la calidad de nuestra obra, algunos son los siguientes:

*Tabla 6 - Aditivos para el concreto. Elaboración propia.*

<b>Nombre del aditivo</b>	<b>Descripción</b>
<b>Plastificantes</b>	Reducen la cantidad de agua necesaria en la mezcla de concreto, permitiendo una mayor trabajabilidad sin comprometer la resistencia del concreto.
<b>Aceleradores</b>	Reducen el tiempo de fraguado del concreto y aceleran la resistencia al desarrollo temprano, útiles en trabajos que requieren rápida ganancia de resistencia.
<b>Reductores de permeabilidad</b>	Mejoran la impermeabilidad del concreto al reducir la porosidad y la penetración de agua, garantizando una mayor durabilidad y protección.
<b>Expansores</b>	Generan un ligero aumento en el volumen del concreto durante el fraguado, compensando la contracción natural y reduciendo la posibilidad de fisuras.
<b>Fibras</b>	Mejoran la resistencia a la tracción y al impacto del concreto, así como el control de la fisuración, proporcionando una mayor resistencia y durabilidad.
<b>Aditivos hidrofugantes</b>	Proporcionan resistencia al agua y la humedad en el concreto, ideales para aplicaciones que requieren mayor resistencia a la infiltración y penetración de agua.

**Acero de refuerzo:** El control de calidad del acero de refuerzo implica la verificación de su resistencia, ductilidad y adherencia al concreto. Además, se deben realizar pruebas de doblado y corte, así como inspecciones visuales para detectar defectos superficiales.

**Perfiles de acero:** La calidad de los perfiles de acero se verifica mediante la medición de sus dimensiones, la resistencia a la corrosión y la capacidad de carga. También es importante realizar pruebas de soldabilidad y revisar la calidad de las soldaduras.

**Soldaduras:** El control de calidad de las soldaduras incluye la inspección visual, las pruebas de penetración y las pruebas de ultrasonido para detectar defectos internos. Además, se deben evaluar la resistencia y la ductilidad de las soldaduras para asegurar su adecuado desempeño.

**Cimbras:** El control de calidad de las cimbras implica la inspección de su montaje, la verificación de las dimensiones y la capacidad de carga. También es necesario asegurar que las cimbras se instalen de acuerdo con las especificaciones y se retiren en el momento adecuado para garantizar la calidad del concreto.

**Acabados de concreto:** El control de calidad de los acabados de concreto incluye la verificación de su textura, nivelación y resistencia al desgaste. Además, es importante asegurar que los acabados cumplan con los requisitos estéticos y funcionales establecidos.

**Otros materiales:** Además de los mencionados, también se deben controlar la calidad de los elementos de anclaje, cables, tuberías, sistemas de ventilación y otros componentes.

**Elementos de anclaje:** El control de calidad de los elementos de anclaje, como pernos y tirantes, implica la verificación de su resistencia a la tracción, resistencia a la corrosión y capacidad de carga. Es fundamental asegurar que los anclajes cumplan con las especificaciones técnicas y se instalen de acuerdo con las recomendaciones del fabricante.

**Cables:** La calidad de los cables utilizados debe ser controlada mediante pruebas de resistencia a la tracción, resistencia a la abrasión y verificación de las características eléctricas. Además, es necesario revisar las conexiones y el aislamiento para garantizar un correcto funcionamiento.

**Tuberías:** El control de calidad de las tuberías incluye la verificación de sus dimensiones, resistencia a la presión y resistencia a la corrosión. También es importante realizar pruebas de estanqueidad para asegurar que no haya fugas y cumplir con las normativas específicas para el manejo de fluidos.

**Sistemas de ventilación:** El control de calidad de los sistemas de ventilación en túneles y estaciones de metro implica la verificación de su capacidad de extracción de aire, la calidad del aire suministrado y el cumplimiento de los estándares de seguridad en cuanto a niveles de ruido y vibración. También es esencial asegurar que los sistemas de ventilación se instalen de acuerdo con las especificaciones técnicas y se realice un mantenimiento periódico.

**Revestimientos e impermeabilizantes:** La calidad de los revestimientos e impermeabilizantes utilizados debe ser controlada mediante pruebas de adherencia, resistencia al desgaste y capacidad de impermeabilización. Es importante asegurar que estos materiales cumplan con las especificaciones técnicas y se apliquen correctamente.

**Iluminación:** El control de calidad de los sistemas de iluminación implica la verificación de su eficiencia energética, calidad de la luz emitida y cumplimiento de los estándares de seguridad en cuanto a niveles de luminancia. También es fundamental asegurar que la iluminación se instale de acuerdo con las especificaciones técnicas y se realice un mantenimiento periódico.

A continuación, se presenta una tabla resumen de las normativas aplicables conforme a materiales en la construcción de un túnel (las más importantes), cabe destacar que algunas no tienen relación directa o no existen en la normativa mexicana:

Tabla 7 - Normativas mexicanas y americanas referentes al concreto. Elaboración propia.

Material / Tema	NMX	ASTM	ACI
<b>Agregados</b>	NMX-C-061-ONNCCE-2014	ASTM C33/C33M-18	ACI 301-16
<b>Acero de refuerzo</b>	NMX-C-083-ONNCCE-2014	ASTM A615/A615M-20	ACI 318-19
<b>Perfiles de acero</b>	NMX-C-160-ONNCCE-2018	ASTM A36/A36M-19	ACI 332-14
<b>Cemento Portland</b>	NMX-C-017-ONNCCE-2018	ASTM C150/C150M-20	ACI 350-06
<b>Mortero</b>	NMX-C-407-ONNCCE-2015	ASTM C270-14a	ACI 530-13
<b>Concreto premezclado</b>	NMX-C-162-ONNCCE-2018	ASTM C94/C94M-20	ACI 301-16
<b>Concreto en obra</b>	NMX-C-111-ONNCCE-2017		ACI 301-16
<b>Soldadura</b>	NMX-J-524-ANCE-2013	ASTM A36/A36M-19	ACI 318-19
<b>Concreto reforzado</b>	NMX-C-496-ONNCCE-2015		ACI 318-19
<b>Aditivos para concreto</b>	-	-	ACI 212.3R-16
<b>Juntas de construcción en concreto</b>	-	-	ACI 224.3R-95
<b>Concreto autocompactante</b>	-	-	ACI 237R-07
<b>Concreto de alta resistencia</b>	-	-	ACI 363R-16
<b>Durabilidad del concreto</b>	-	-	ACI 201.2R-16

#### 2.4-Gestión ambiental.

Antes de iniciar la construcción de un túnel de metro y estaciones, es fundamental llevar a cabo estudios de impacto ambiental para identificar y evaluar los posibles efectos negativos que el proyecto pueda tener en el entorno. Estos estudios deben abordar aspectos como la flora y fauna local, la calidad del aire, el ruido y las vibraciones, así como el consumo de recursos naturales y la generación de residuos.

Una vez identificados los impactos ambientales potenciales, es necesario desarrollar un plan de manejo ambiental que establezca las acciones y medidas de mitigación a implementar a lo largo del proyecto. Este plan debe ser revisado y actualizado periódicamente, y debe contemplar la adaptación a posibles cambios en el entorno o en las condiciones de trabajo.

Durante la construcción del túnel de metro y estaciones, se debe llevar a cabo un monitoreo ambiental continuo, que permita verificar el cumplimiento de las medidas de mitigación establecidas en el plan de manejo ambiental y detectar posibles desviaciones o impactos no previstos. Este monitoreo debe abordar aspectos como la calidad del aire, el nivel de ruido y vibraciones, y la conservación de la flora y fauna.

La gestión adecuada de los residuos generados durante la construcción es esencial para minimizar el impacto ambiental del proyecto. Esto implica implementar prácticas de segregación, almacenamiento y disposición final de los residuos de acuerdo con la normativa aplicable y las mejores prácticas ambientales, así como promover la reducción, reutilización y reciclaje de materiales.

La prevención y control de la contaminación del suelo y agua es otro aspecto clave en la gestión ambiental de la construcción de un túnel de metro y estaciones. Esto puede lograrse mediante la implementación de medidas de control de la erosión, el manejo adecuado de sustancias químicas y peligrosas, y la realización de inspecciones y monitoreo periódico de la calidad del suelo y agua.

La conservación y restauración del entorno natural afectado por la construcción del túnel de metro y estaciones debe ser una prioridad en la gestión ambiental del proyecto. Esto puede incluir la revegetación de áreas degradadas, la protección y reubicación de especies de flora y fauna en riesgo, y la compensación de áreas naturales afectadas mediante la creación o restauración de hábitats similares.

Por último, es fundamental fomentar la participación y comunicación con la comunidad local y otros actores interesados en el proyecto, para informar sobre las acciones de gestión ambiental, abordar inquietudes y recibir retroalimentación. Esto ayuda a mejorar la percepción del proyecto y a garantizar una mayor aceptación y apoyo por parte de la sociedad, facilitando así el desarrollo exitoso del túnel de metro y estaciones.

Para la gestión ambiental en un proyecto de construcción y supervisión de túneles de metro y estaciones en México, es necesario cumplir con diversas normas y leyes enfocadas en la protección del medio ambiente. A continuación, se enlistan algunas de las principales normas ambientales aplicables a este tipo de proyectos:

- **Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA):** Establece las bases para la política ambiental en México y regula la prevención y control de la contaminación ambiental.
- **Ley General de Cambio Climático:** Establece los lineamientos para la mitigación y adaptación al cambio climático, incluyendo la promoción de infraestructura y transporte sustentable.
- **Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable:** Regula la conservación, protección, restauración y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas forestales.

- **Ley General de Vida Silvestre:** Regula la conservación y el aprovechamiento sustentable de la fauna silvestre y su hábitat.
- **Ley de Aguas Nacionales:** Regula el uso, conservación y protección de los recursos hídricos en México.
- **Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) aplicables en materia de impacto ambiental, tales como:**
  - **NOM-120-SEMARNAT-2011:** Establece las especificaciones para la protección ambiental de sistemas de transporte que atraviesan ecosistemas terrestres y acuáticos.
  - **NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012:** Establece los límites máximos permisibles de hidrocarburos en suelos y las especificaciones para su caracterización y remediación.
- **Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) aplicables en materia de emisiones atmosféricas y ruido, como:**
  - **NOM-085-SEMARNAT-2011:** Establece los límites máximos permisibles de emisiones contaminantes provenientes de fuentes fijas.
  - **NOM-081-SEMARNAT-1994:** Establece los límites máximos permisibles de emisión de ruido de las fuentes fijas.
- **Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) aplicables en materia de residuos, como:**
  - **NOM-161-SEMARNAT-2011:** Establece los criterios para clasificar a los residuos de manejo especial y determinar qué residuos son sujetos a Plan de Manejo.
  - **NOM-052-SEMARNAT-2005:** Establece las características de los residuos peligrosos, su clasificación y los listados de estos.
  - **Ley de Residuos Sólidos del Distrito Federal** (o de la entidad federativa correspondiente): Regula el manejo integral de los residuos sólidos urbanos y de manejo especial en la Ciudad de México o en la entidad federativa donde se realice el proyecto.
  - Programas de Ordenamiento Ecológico y Territorial aplicables al área donde se realice el proyecto, a nivel federal, estatal y municipal.

## **2.5-Seguridad e higiene.**

La seguridad e higiene en la construcción y supervisión de túneles de metro y estaciones es fundamental para prevenir accidentes y garantizar la salud y el bienestar de todos los trabajadores involucrados en el proyecto. Esto incluye la identificación y evaluación de riesgos, la implementación de medidas de prevención y protección, y la promoción de una cultura de seguridad en el lugar de trabajo.

Uno de los aspectos clave de la seguridad e higiene en la construcción de túneles de metro y estaciones es la realización de análisis de riesgos y la identificación de las posibles fuentes de peligro. Esto incluye riesgos relacionados con la maquinaria y equipos, las condiciones geológicas, la utilización de sustancias químicas, y la interacción entre diferentes actividades y trabajadores en el sitio de construcción.

La formación y capacitación de los trabajadores en materia de seguridad e higiene es esencial para asegurar que todos los empleados conozcan y sigan las mejores prácticas y procedimientos en el lugar de trabajo. Esto incluye la realización de cursos y talleres, la

distribución de material informativo, y la promoción de un ambiente de aprendizaje y mejora continua.

El uso de equipo de protección personal (EPP) adecuado es un componente clave de la seguridad e higiene en la construcción. Los trabajadores deben contar con cascos, gafas de protección, guantes, botas, chalecos reflectantes y otros elementos de protección según las necesidades específicas de cada tarea y actividad.

La señalización y demarcación del área de trabajo es fundamental para garantizar la seguridad en la obra. Esto incluye la utilización de señales de advertencia, barreras de protección, conos y cintas de demarcación para indicar áreas peligrosas, zonas de circulación de vehículos y maquinaria, y espacios donde se realicen actividades específicas.

La implementación de sistemas de ventilación y control de la calidad del aire es crucial en la construcción de túneles de metro y estaciones, debido a las condiciones de trabajo subterráneas y la generación de polvo y gases nocivos. Estos sistemas deben ser diseñados, instalados y mantenidos de acuerdo con las normas y regulaciones aplicables, garantizando así un ambiente de trabajo seguro y saludable.



*Ilustración 24 - Los sistemas de ventilación para vigilar la calidad del aire son muy importante en la construcción de túneles. SOBSE 2022.*

La iluminación adecuada en el lugar de trabajo es otro aspecto importante de la seguridad e higiene. La iluminación debe ser suficiente para permitir a los trabajadores realizar sus tareas de manera segura y eficiente, evitando la fatiga visual y el riesgo de accidentes.

La gestión y disposición adecuada de los residuos y materiales peligrosos es esencial para garantizar la seguridad e higiene en la obra. Esto incluye la identificación, clasificación, almacenamiento y disposición de sustancias químicas, residuos sólidos y líquidos, y otros materiales que puedan representar un riesgo para la salud y el medio ambiente.

La implementación de protocolos de emergencia y evacuación es fundamental en caso de accidentes o situaciones de riesgo en la construcción. Estos protocolos deben incluir rutas de evacuación claramente señalizadas, puntos de encuentro, y la capacitación periódica de los trabajadores en la respuesta a emergencias, incluyendo primeros auxilios y el uso de extintores.

La promoción de una cultura de seguridad en el lugar de trabajo es esencial para garantizar la seguridad e higiene. Esto implica fomentar la comunicación abierta y efectiva entre los trabajadores, la dirección y los responsables de seguridad, así como el compromiso de todos los niveles de la organización en la prevención de accidentes y la mejora continua de las condiciones de trabajo.



*Ilustración 25 - La ventilación, iluminación y limpieza son importantes en todos los procesos constructivos del túnel. SOBSE 2022.*

En México, la seguridad e higiene en las construcciones está regulada principalmente por la Secretaría del Trabajo y Previsión Social (STPS) y la Normatividad Oficial Mexicana (NOM). Existen varias normas y regulaciones que deben seguirse en el ámbito de la construcción. A continuación, se mencionan algunas de las normas más relevantes en este contexto:

- **NOM-001-STPS-2018:** Disposiciones de seguridad e higiene para la edificación, mantenimiento, reparación y demolición de inmuebles. Esta norma establece los requisitos mínimos de seguridad e higiene que deben cumplirse en las actividades de construcción, incluyendo la protección de los trabajadores, la prevención de accidentes y la identificación y control de riesgos.
- **NOM-002-STPS-2010:** Condiciones de seguridad y prevención de riesgos para la prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo. Esta norma se enfoca en la prevención y protección contra incendios, incluyendo la instalación y mantenimiento de sistemas de detección y extinción de incendios, así como la capacitación y formación de brigadas de emergencia.
- **NOM-004-STPS-1999:** Protección de los sistemas de protección para maquinaria y equipo utilizados en los centros de trabajo. Esta norma establece las medidas de seguridad para la operación y mantenimiento de maquinaria y equipo en el lugar de trabajo, incluyendo dispositivos de seguridad, procedimientos de bloqueo y etiquetado, y capacitación para los trabajadores.

- **NOM-017-STPS-2008:** Equipo de protección personal. Esta norma se enfoca en la selección, uso, mantenimiento y reposición del equipo de protección personal (EPP) para los trabajadores, así como en la capacitación y la supervisión en su uso correcto.
- **NOM-031-STPS-2011:** Construcción: condiciones de seguridad y salud en el trabajo. Esta norma establece los lineamientos específicos para la seguridad y salud en el trabajo en la industria de la construcción, incluyendo la planificación, organización, ejecución y control de las actividades de construcción.

La siguiente tabla presenta un ejemplo de un pequeño plan estratégico de mitigación de riesgos para mejorar la seguridad e higiene en la construcción de un túnel. La tabla se organiza en cinco columnas: Riesgos, Medidas preventivas, Medidas de control, Responsable y Seguimiento.

Tabla 8 - Plan estratégico de mitigación de riesgos. Elaboración propia.

Riesgos	Medidas preventivas	Medidas de control	Responsable	Seguimiento
<b>Caídas de altura</b>	Capacitación en trabajo en altura	Uso de EPP y sistemas de anclaje	Encargado de seguridad	Inspecciones periódicas
<b>Derrumbes y desprendimientos de material</b>	Estudio geotécnico previo	Monitoreo y refuerzo de estructuras	Ingeniero geotécnico	Revisión de informes
<b>Exposición a gases tóxicos y explosivos</b>	Ventilación adecuada	Monitoreo de gases y sistemas de alarma	Encargado de seguridad	Inspecciones periódicas
<b>Accidentes con maquinaria</b>	Capacitación en manejo de maquinaria	Mantenimiento y uso de dispositivos de seguridad en maquinaria	Operadores y técnicos	Revisión de registros de mantenimiento
<b>Incendios</b>	Capacitación en prevención de incendios	Instalación de extintores y sistemas de detección de humo	Encargado de seguridad	Inspecciones periódicas y simulacros
<b>Ruido excesivo</b>	Evaluación de niveles de ruido	Uso de EPP y barreras acústicas	Encargado de seguridad	Monitoreo de niveles de ruido
<b>Exposición a vibraciones</b>	Evaluación de niveles de vibración	Uso de EPP y maquinaria con sistemas antivibratorios	Encargado de seguridad	Monitoreo de niveles de vibración
<b>Contacto con materiales peligrosos</b>	Capacitación en manejo de materiales peligrosos	Almacenamiento y etiquetado adecuado	Encargado de seguridad	Inspecciones periódicas
<b>Fatiga y estrés laboral</b>	Establecimiento de horarios y turnos de trabajo adecuados	Fomento de pausas y descansos	Recursos humanos	Evaluación del bienestar de los trabaja

Como resumen se muestra una tabla donde se tendrán las normativas mexicanas y americanas con su equivalencia para los campos de seguridad e higiene y ambiental:

*Tabla 9 - Normas mexicanas y americanas para seguridad, higiene y ambiental. Elaboración propia.*

<b>Tema / Área</b>	<b>NOM</b>	<b>OSHA</b>	<b>NOM-SEMARNAT</b>
<b>Seguridad en la construcción</b>	NOM-031-STPS-2011	29 CFR 1926	-
<b>Equipo de protección personal (EPP)</b>	NOM-017-STPS-2008	29 CFR 1910.132-138	-
<b>Protección contra caídas</b>	NOM-009-STPS-2011	29 CFR 1926.501-503	-
<b>Andamios</b>	NOM-143-STPS-2004	29 CFR 1926.450-454	-
<b>Manejo manual de cargas</b>	NOM-087-STPS-2000	29 CFR 1910.176	-
<b>Espacios confinados</b>	NOM-033-STPS-2015	29 CFR 1910.146	-
<b>Ruido</b>	NOM-011-STPS-2001	29 CFR 1910.95	-
<b>Vibraciones</b>	NOM-024-STPS-2001	29 CFR 1910.97	-
<b>Iluminación</b>	NOM-025-STPS-2008	29 CFR 1926.56	-
<b>Manejo de residuos peligrosos</b>	-	-	NOM-052-SEMARNAT-2005
<b>Emisiones a la atmósfera</b>	-	-	NOM-043-SEMARNAT-1993
<b>Residuos sólidos urbanos</b>	-	-	NOM-083-SEMARNAT-2003
<b>Impacto ambiental</b>	-	-	NOM-120-SEMARNAT-2011
<b>Aguas residuales</b>	-	-	NOM-003-SEMARNAT-1997

Para fomentar la seguridad e higiene en una construcción, es fundamental establecer una cultura de prevención y responsabilidad compartida en todos los niveles de la organización. Esto incluye proporcionar capacitación continua en seguridad y buenas prácticas laborales, implementar medidas de control y prevención de riesgos adecuadas, y fomentar la comunicación abierta y efectiva entre trabajadores, dirección y responsables de seguridad. Además, es crucial realizar evaluaciones periódicas y actualizaciones del plan de mitigación de riesgos, adaptándose a las condiciones específicas del proyecto y promoviendo el compromiso de todos los involucrados en la obra para garantizar un entorno de trabajo seguro y saludable.

## **2.6-Estimaciones ordinarias, adicionales y extraordinarias.**

### **2.6.1-Estimaciones ordinarias:**

Las estimaciones ordinarias son aquellas que se realizan para calcular los costos de los trabajos que forman parte del alcance original del proyecto de construcción. Estas estimaciones se basan en el análisis de precios unitarios, las cantidades de obra y el programa de ejecución establecido en el contrato. En este tipo de estimaciones, se consideran los materiales, la mano de obra, la maquinaria y el equipo necesarios para llevar a cabo las actividades planificadas.

Para la construcción de un túnel de metro y estaciones, las estimaciones ordinarias incluyen aspectos como la excavación, el revestimiento del túnel, la construcción de la estructura de las estaciones, la instalación de sistemas electromecánicos y la obra civil en general. Estas estimaciones se actualizan periódicamente conforme avanza el proyecto, reflejando los avances en la ejecución de las obras y las variaciones en los costos de los insumos.

La precisión de las estimaciones ordinarias es crucial para garantizar que el proyecto se mantenga dentro del presupuesto establecido y se cumplan los objetivos financieros. Un control adecuado de estas estimaciones permite identificar desviaciones y tomar medidas correctivas a tiempo, asegurando una ejecución eficiente del proyecto y evitando sobrecostos innecesarios.

### **2.6.2-Estimaciones adicionales:**

Las estimaciones adicionales se refieren a los costos de los trabajos adicionales que no estaban incluidos en el contrato original pero que, durante el desarrollo del proyecto, se identifican como necesarios o beneficiosos para el cumplimiento de los objetivos planteados. Estas estimaciones pueden surgir debido a cambios en el alcance del proyecto, mejoras en la calidad, la funcionalidad o la seguridad, o ajustes para cumplir con nuevas regulaciones o requerimientos de las autoridades.

Las estimaciones adicionales se elaboran en función de la información actualizada del proyecto y se presentan para su aprobación por parte de las autoridades correspondientes. Es importante que las partes involucradas en el proyecto, como el contratista y el propietario, analicen y negocien estos costos adicionales y su impacto en el cronograma de la obra. La gestión adecuada de las estimaciones adicionales es fundamental para asegurar la viabilidad financiera del proyecto y garantizar que se cumplan las expectativas de calidad, seguridad y funcionalidad en la construcción de las obras públicas.

### **2.6.3-Estimaciones extraordinarias:**

Las estimaciones extraordinarias se refieren a los costos de trabajos o situaciones imprevistas que surgen durante la ejecución del proyecto y que no pueden ser atribuidos a las partes involucradas.

En el contexto de la construcción de un túnel de metro y estaciones, las estimaciones extraordinarias podrían abordar eventos como, cambios imprevistos en la legislación que impacten el desarrollo del proyecto, ajustes en el diseño derivados de condiciones no anticipadas en el proyecto ejecutivo, o modificaciones en los alcances de contrato para abordar nuevos requerimientos.

La gestión adecuada de las estimaciones extraordinarias es fundamental para la resiliencia del proyecto y la capacidad de enfrentar situaciones imprevistas sin poner en riesgo su viabilidad financiera y técnica. Al planificar y prepararse para estos eventos, el equipo del proyecto puede minimizar el impacto en el costo y el cronograma, asegurando que el túnel de metro y las estaciones se construyan de manera exitosa y cumplan con los objetivos establecidos.

En un proyecto de construcción, la solicitud de precios extraordinarios es un proceso que permite a los contratistas solicitar un ajuste en los precios o costos de este, debido a circunstancias excepcionales o imprevistas que no formaban parte del contrato original y que afectan el desarrollo y ejecución del proyecto, este proceso se lleva a cabo siguiendo una serie de pasos y requisitos establecidos para garantizar la transparencia y el adecuado manejo de los recursos públicos.

Para realizar la solicitud de precios extraordinarios, el contratista debe:

- Identificar y documentar las circunstancias imprevistas o excepcionales que generan la necesidad de un ajuste en los precios o costos del proyecto. Estas circunstancias pueden incluir desastres naturales, cambios de trazo, suelos, procesos constructivos, cambios en la legislación, o situaciones políticas o sociales que afecten la ejecución del proyecto.
- Elaborar una propuesta detallada que incluya la descripción de los trabajos extraordinarios, los costos asociados, la justificación técnica y económica para la solicitud, y el impacto en el cronograma del proyecto.
- Presentar la propuesta a la autoridad responsable del proyecto, como la entidad contratante o la supervisión de obra, para su evaluación y aprobación.
- La autoridad responsable del proyecto evaluará la propuesta y, si procede, aprobará los precios extraordinarios y realizará las modificaciones necesarias en el contrato para incorporar los ajustes.
- Finalmente, el contratista debe llevar a cabo los trabajos extraordinarios y cumplir con los nuevos requisitos establecidos en el contrato modificado, incluyendo la presentación de informes y la comprobación de los costos incurridos.

Es importante que todas las partes involucradas en el proyecto colaboren y se comuniquen de manera eficiente durante este proceso, a fin de asegurar el adecuado manejo de los recursos y garantizar el cumplimiento de los objetivos del proyecto de construcción.

#### **2.6.4-Problemáticas en las estimaciones:**

Existen diversos problemas que pueden surgir en las estimaciones de obra, tanto en la fase de planeación como durante la ejecución del proyecto:

- **Errores en la medición o cálculo de las cantidades de trabajo**, lo que puede llevar a discrepancias entre las estimaciones y la realidad en obra, provocando desviaciones en los costos y tiempos del proyecto.
- **Cambios en los precios de los materiales y mano de obra**, que pueden afectar significativamente las estimaciones iniciales y, por ende, el costo final del proyecto.

- **Dificultades para obtener los materiales o recursos** necesarios, lo que puede retrasar el avance de la obra y generar costos adicionales.
- **Errores en la identificación y cuantificación** de los riesgos del proyecto, lo que puede resultar en estimaciones poco realistas y una posible falta de recursos para enfrentar imprevistos.
- **Desviaciones en la ejecución de la obra**, que pueden provocar la necesidad de realizar estimaciones extraordinarias o adicionales, afectando el presupuesto y la programación del proyecto.
- **Falta de comunicación y coordinación** entre las partes involucradas en el proyecto, lo que puede generar conflictos y discrepancias en las estimaciones y el seguimiento del avance de la obra.

### Diferencias notables entre estimaciones:

Tabla 10 - Diferencias entre tipos de estimaciones. Elaboración propia.

Diferencias	Estimaciones Ordinarias	Estimaciones Extraordinarias	Estimaciones Adicionales
<b>Definición</b>	Son pagos por trabajos ya previstos en el contrato.	Son pagos por trabajos no previstos en el contrato.	Son pagos por trabajos adicionales a los contemplados en el contrato.
<b>Frecuencia</b>	Se realizan periódicamente durante la ejecución del proyecto.	Se realizan en casos excepcionales.	Se realizan cuando se requiere aumentar el alcance del proyecto.
<b>Causa</b>	Son generadas por el avance de la obra conforme a lo planeado.	Surgen de imprevistos o situaciones no contempladas en el contrato.	Se deben a cambios en el proyecto o requerimientos adicionales.
<b>Aprobación</b>	Requieren aprobación por parte del supervisor de la obra.	Requieren aprobación por parte del supervisor y, en ocasiones, del cliente.	Requieren aprobación por parte del cliente y el supervisor de la obra.
<b>Monto</b>	El monto es preestablecido en el contrato.	El monto se determina en función de los trabajos realizados y su costo.	El monto se determina en función del costo de los trabajos adicionales.
<b>Efecto en el contrato</b>	No modifican el contrato original.	Pueden modificar el contrato original.	Modifican el contrato original al incluir nuevos trabajos y costos.

Es fundamental llevar a cabo una adecuada planeación y seguimiento de las estimaciones de obra para evitar estos problemas, mediante una efectiva comunicación y coordinación entre todas las partes involucradas en el proyecto, la correcta identificación y cuantificación de los riesgos, y la actualización periódica de las estimaciones conforme al avance real de la obra.

### 2.7-Ajustes de costos y Factor de actualización.

Es fundamental entender la importancia de los ajustes de costos y el factor de actualización en la construcción, ya que estos elementos son clave para mantener un control financiero eficiente y transparente en los proyectos de infraestructura.

**Los ajustes de costos:** son necesarios para adaptar el presupuesto de un proyecto a las variaciones en los precios de materiales, mano de obra y otros recursos a lo largo del tiempo.

Estas variaciones pueden deberse a factores como la inflación, fluctuaciones en los precios de los materiales, cambios en las condiciones del mercado laboral, entre otros.

Para realizar ajustes de costos, se deben identificar y evaluar las variaciones en los precios y aplicar los cambios necesarios al presupuesto del proyecto. Esto asegura que los costos reflejen de manera precisa la realidad económica y se ajusten a las condiciones actuales.

**El factor de actualización:** es una herramienta utilizada para ajustar los costos de un proyecto a lo largo del tiempo, considerando factores como la inflación y las fluctuaciones en los precios de los recursos. Al aplicar el factor de actualización, se actualizan los costos del proyecto a valores presentes, lo que permite una comparación y análisis más precisos de los costos y el desempeño financiero del proyecto.

El factor de actualización se calcula utilizando índices y tasas específicas, como el índice de precios al consumidor o las tasas de interés, que reflejan las condiciones económicas y financieras a lo largo del tiempo.

En la gestión de proyectos de construcción, es crucial incorporar tanto los ajustes de costos como el factor de actualización en la planificación y control financiero. Esto permite mantener un enfoque proactivo en la gestión de los recursos financieros y asegurar que el proyecto se ejecute dentro del presupuesto y los plazos establecidos. Además, estos elementos facilitan la identificación de oportunidades de mejora en la eficiencia y rentabilidad del proyecto, lo que contribuye al éxito y la sostenibilidad a largo plazo de las obras de infraestructura.

### **2.8-Gastos no recuperables.**

Los gastos no recuperables son aquellos costos que no pueden ser recuperados o compensados a lo largo de la vida útil del proyecto. En el caso de la construcción de túneles de metro, estos gastos pueden incluir una variedad de costos relacionados con aspectos técnicos, ambientales, sociales y de planificación.

- **Estudios preliminares y consultoría:** Estos costos incluyen la realización de estudios geotécnicos, hidrológicos, topográficos y de impacto ambiental, así como la contratación de consultores especializados para la evaluación y diseño de soluciones técnicas y de ingeniería para el proyecto. Estos costos son necesarios para garantizar la viabilidad y seguridad del proyecto, pero no se recuperan directamente a través de los ingresos generados por la infraestructura.
- **Costos de adquisición de terrenos y reubicación:** La construcción de túneles de metro en áreas urbanas densamente pobladas puede requerir la adquisición de terrenos y la reubicación de personas y negocios. Estos costos pueden ser significativos y, aunque son necesarios para la ejecución del proyecto, no se recuperan directamente a través de los ingresos generados por el metro.
- **Licencias, permisos y tasas gubernamentales:** La construcción de un proyecto de infraestructura como un túnel de metro requiere la obtención de diversas licencias y permisos, así como el pago de tasas gubernamentales. Estos costos no se recuperan a través de los ingresos del proyecto, pero son esenciales para cumplir con las regulaciones y leyes locales y federales.

- **Medidas de mitigación ambiental y social:** Durante la construcción del túnel de metro, pueden ser necesarias acciones para mitigar los impactos ambientales y sociales negativos, como la implementación de programas de compensación ambiental, la restauración de áreas afectadas y la realización de obras para reducir la vibración y el ruido. Estos gastos son importantes para minimizar los efectos adversos del proyecto, pero no se recuperan a través de los ingresos generados por la infraestructura.
- **Costos imprevistos y contingencias:** A pesar de la planificación y el análisis exhaustivos, pueden surgir situaciones imprevistas durante la construcción del túnel de metro, como la aparición de condiciones geotécnicas inesperadas, accidentes o retrasos en la obra. Estos costos imprevistos pueden ser significativos y, aunque no se recuperan directamente a través de los ingresos del proyecto, son fundamentales para garantizar la finalización y el éxito de este.

Los gastos no recuperables son una parte importante de la gestión financiera en la construcción de túneles de metro en México. Aunque estos costos no se recuperan directamente a través de los ingresos generados por el proyecto, son esenciales para garantizar la viabilidad, seguridad y cumplimiento de las regulaciones en la ejecución del proyecto.

### **2.9-Gastos financieros.**

Los gastos financieros son aquellos costos asociados con la financiación y el manejo de los recursos financieros necesarios para llevar a cabo un proyecto de infraestructura. Estos costos pueden variar según la estructura de financiamiento del proyecto y el perfil de riesgo, pero generalmente incluyen los siguientes elementos:

- **Intereses de préstamos y financiamiento:** En la mayoría de los casos, los proyectos de construcción de túneles de metro requieren la obtención de financiamiento externo, como préstamos de bancos, organismos financieros internacionales o emisión de bonos. Los intereses asociados con estos préstamos y financiamientos son un costo financiero importante y deben ser considerados en el presupuesto y la planificación del proyecto.
- **Costos de emisión de bonos y otros instrumentos financieros:** Si el proyecto se financia mediante la emisión de bonos u otros instrumentos financieros, se incurre en costos relacionados con la estructuración, colocación y administración de estos instrumentos. Estos costos pueden incluir comisiones de emisión, honorarios legales y asesoramiento financiero.
- **Gastos bancarios y comisiones:** La administración de los recursos financieros del proyecto puede involucrar la apertura y mantenimiento de cuentas bancarias, la realización de transferencias y otras operaciones financieras. Estas actividades suelen generar gastos bancarios y comisiones que deben ser considerados como parte de los gastos financieros del proyecto.
- **Costos de seguros y garantías:** Los proyectos de construcción de túneles de metro pueden requerir la contratación de seguros y garantías para cubrir riesgos asociados con la construcción, como responsabilidad civil, riesgos geotécnicos y otros riesgos específicos del proyecto. Los costos de estos seguros y garantías son un componente clave de los gastos financieros.

- **Costos de cobertura financiera:** Dado que los proyectos de infraestructura a gran escala como los túneles de metro suelen tener una duración prolongada, pueden estar expuestos a riesgos financieros como la fluctuación de las tasas de cambio o las tasas de interés. En algunos casos, puede ser necesario contratar instrumentos financieros como opciones o futuros para cubrir estos riesgos, lo que implica costos adicionales.

En resumen, los gastos financieros son un componente crucial en la gestión financiera de proyectos de construcción de túneles de metro en México. Estos costos deben ser considerados y evaluados cuidadosamente en la planificación y ejecución del proyecto para garantizar una administración eficiente y sostenible de los recursos financieros, así como para mitigar los riesgos asociados con la financiación de la infraestructura.

### **2.10-Avances físico-financieros-programados.**

Es crucial comprender la importancia de monitorear y controlar los avances físicos, financieros y programados en un proyecto de. Estos tres aspectos son fundamentales para garantizar la eficiencia, la rentabilidad y el éxito a largo plazo del proyecto.

- **Avances físicos:** Los avances físicos se refieren al progreso real de la construcción en términos de obra ejecutada en relación con el plan establecido. Esto incluye aspectos como la excavación y revestimiento de túneles, la construcción de estaciones, la instalación de sistemas electromecánicos y la implementación de medidas de seguridad. Monitorear y controlar el avance físico es esencial para asegurar que el proyecto se desarrolle según lo previsto y para identificar posibles desviaciones o problemas que puedan surgir durante la construcción.
- **Avances financieros:** Los avances financieros se relacionan con el desembolso y la utilización de los recursos económicos asignados al proyecto en comparación con el presupuesto establecido. Esto incluye el seguimiento de los gastos en materiales, mano de obra, equipos, servicios de consultoría y otros costos asociados con la construcción del túnel y las estaciones de metro.

El monitoreo y control de los avances financieros permiten garantizar que los recursos se utilicen de manera eficiente y se ajusten a los límites presupuestarios, además de detectar posibles desviaciones y áreas de mejora en la gestión financiera del proyecto.

- **Avances programados:** Los avances programados se refieren al cumplimiento de los plazos e hitos establecidos en el cronograma del proyecto. Esto implica el seguimiento de la ejecución de las actividades y tareas planificadas, así como la identificación de posibles retrasos o adelantos en la obra.

El control de los avances programados es fundamental para asegurar que el proyecto se complete dentro del tiempo establecido y para tomar medidas correctivas en caso de desviaciones en el cronograma.

Es fundamental llevar un seguimiento y control riguroso de los avances físicos, financieros y programados. Esto permite garantizar que la obra se realice de acuerdo con las especificaciones técnicas, dentro de los límites presupuestarios y en el plazo establecido, lo que contribuye al éxito y la sostenibilidad del proyecto de infraestructura a largo plazo.

Abajo pondremos una pequeña tabla de los posibles riesgos que afectarían los avances físicos, financieros y programados de un proyecto:

*Tabla 11 - Riesgos que impactan los avances físicos, financieros y programados. Elaboración propia.*

<b>Problemáticas y soluciones</b>	<b>Avance físico</b>	<b>Avance financiero</b>	<b>Avance programado</b>
<b>Cambios en el diseño</b>	Revisar y actualizar el diseño	Reevaluar y ajustar el presupuesto	Revisar y modificar el cronograma
<b>Dificultades geotécnicas</b>	Implementar soluciones técnicas	Asegurar financiamiento adicional	Revisar plazos e hitos afectados
<b>Escasez de mano de obra</b>	Contratar personal adicional	Considerar costos adicionales	Evaluar impacto en el cronograma
<b>Falta de materiales</b>	Adquirir o sustituir materiales	Ajustar el presupuesto	Revisar plazos de entrega
<b>Inclemencias del tiempo</b>	Implementar medidas preventivas	Considerar impacto en costos	Reajustar el cronograma
<b>Retrasos en la entrega</b>	Mejorar la logística	Evaluar impacto en costos	Revisar y modificar el cronograma
<b>Problemas de calidad</b>	Implementar controles de calidad	Revisar y ajustar costos	Evaluar impacto en el cronograma
<b>Problemas ambientales</b>	Aplicar medidas de mitigación	Considerar costos adicionales	Revisar plazos e hitos afectados
<b>Conflictos con contratistas</b>	Resolver conflictos y negociar	Evaluar impacto en costos	Revisar y modificar el cronograma
<b>Cambios en la normativa</b>	Ajustar el proyecto a normativa	Revisar y ajustar costos	Revisar y modificar el cronograma

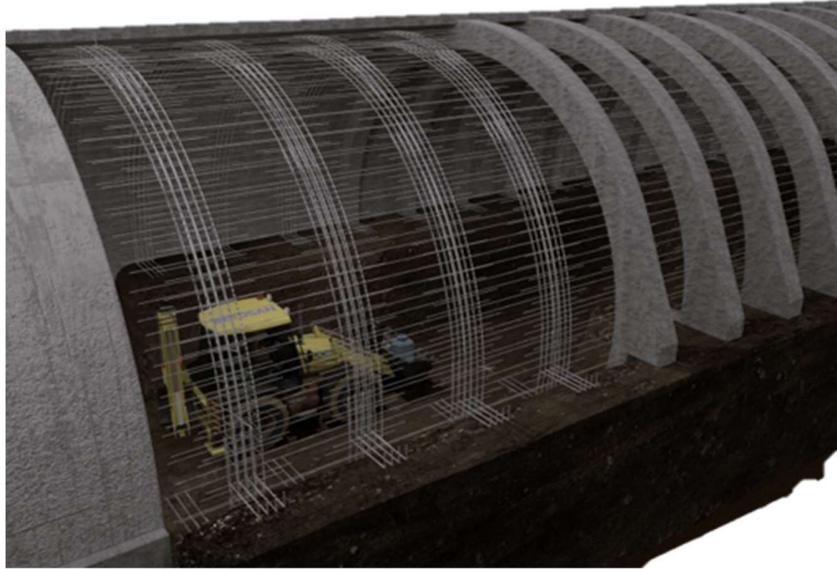
### **2.11-Utilización de Excel y Microsoft Project para dar seguimiento al avance físico financiero y programado de un proyecto.**

El uso de herramientas digitales como Microsoft Excel y Microsoft Project es esencial en la supervisión y gerencia de un proyecto de construcción de un túnel, ya que estas herramientas facilitan la planificación, el seguimiento y la actualización del avance físico, financiero y programado del proyecto. Además, permiten a los gerentes de proyecto y supervisores analizar y comparar datos, identificar desviaciones y tomar decisiones informadas para mantener el proyecto en curso y dentro del presupuesto.

Tabla 12 - Pros y contras del uso de Excel y Microsoft Project. Elaboración propia.

Herramienta	Pros	Contras
<b>Microsoft Excel</b>	1. Fácil acceso y uso generalizado	1. No está específicamente diseñado para la gestión de proyectos
	2. Flexibilidad para personalizar y adaptar a las necesidades	2. No cuenta con herramientas integradas de seguimiento del tiempo
	3. Integración con otros programas de Microsoft	3. Puede resultar complicado al gestionar proyectos grandes y complejos
	4. Compatible con múltiples formatos de archivos	4. Limitaciones en el manejo de recursos y asignaciones
	5. Gran cantidad de funciones y fórmulas para análisis de datos	5. La colaboración en tiempo real puede ser limitada
	6. Permite el uso de tablas dinámicas para analizar información	6. Riesgo de errores humanos en fórmulas y funciones
	7. Disponibilidad de plantillas predefinidas	7. La seguridad de los datos puede ser limitada
<b>Microsoft Project</b>	1. Diseñado específicamente para la gestión de proyectos	1. Puede ser más difícil de aprender para los usuarios nuevos
	2. Herramientas avanzadas de programación y seguimiento del tiempo	2. Mayor costo en comparación con Excel
	3. Integración con otros programas de Microsoft y software de terceros	3. Menos flexibilidad para personalizar y adaptar a necesidades específicas
	4. Gestión avanzada de recursos y asignaciones	4. Menor compatibilidad con múltiples formatos de archivos
	5. Facilita la colaboración en tiempo real entre equipos	5. La adopción y compatibilidad con otros programas pueden ser limitadas
	6. Generación automática de informes y gráficos	6. Dependencia de la plataforma Windows
	7. Mayor capacidad para gestionar la incertidumbre en el proyecto	7. Limitaciones en la personalización de informes y gráficos





*Ilustración 27 - 2 Imágenes de un modelo 3D para visualización de procesos constructivos, seguimiento y toma de decisiones. Realizado en Blender-Unreal-Autodesk, SOBSE 2021.*

La aplicación de BIM en la construcción de túneles y sistemas de transporte masivo ofrece numerosas ventajas, como la identificación temprana de problemas y la reducción de riesgos durante la construcción. Además, al contar con un modelo digital completo, los equipos pueden realizar simulaciones y análisis de diferentes escenarios, optimizando la eficiencia y la sostenibilidad de la infraestructura. Asimismo, el uso de BIM facilita la gestión y

mantenimiento de la infraestructura a lo largo de su vida útil, ya que permite el acceso a información actualizada y precisa sobre los elementos y sistemas del túnel o transporte masivo.

Tabla 13 - Pros y contras de la metodología BIM. Elaboración propia.

Pros	Contras
1. Mejora la colaboración entre equipos	1. Requiere de capacitación y habilidades especializadas
2. Permite la identificación temprana de problemas	2. Mayor inversión inicial en software y hardware
3. Facilita la comunicación y toma de decisiones	3. Cambios en los procesos de trabajo y adaptación de la empresa
4. Reduce riesgos y costos en la construcción	4. Dependencia de la compatibilidad entre diferentes softwares BIM
5. Mejora la eficiencia y sostenibilidad del proyecto	5. Puede ser percibido como una carga adicional de trabajo
6. Facilita la gestión y mantenimiento de la infraestructura	6. Riesgo de mala implementación y falta de estándares
7. Acceso a información actualizada y precisa	7. Puede generar resistencia al cambio en los equipos
8. Permite la realización de simulaciones y análisis	8. Posibles problemas de interoperabilidad entre aplicaciones BIM
9. Agiliza la documentación y aprobación de proyectos	9. Dificultades en la implementación de BIM en proyectos existentes
10. Facilita el seguimiento y control del proyecto	10. Riesgo de pérdida de información si no se gestionan adecuadamente los datos

## 2.13-Propuesta de personal para la supervisión y gerencia de proyectos.

### 2.13.1-Personal directo:

La construcción de túneles y estaciones de metro es un proyecto de gran envergadura que requiere de un equipo altamente capacitado y experimentado en diferentes áreas de la ingeniería y la construcción. La correcta gestión de los recursos humanos es esencial para garantizar el éxito del proyecto, desde la planificación hasta la puesta en marcha de la infraestructura. El equipo de trabajo debe estar compuesto por profesionales especializados en diversas disciplinas, incluyendo ingeniería civil, geotecnia, electromecánica, ambiental, seguridad, arquitectura y topografía, así como personal técnico y operativo para llevar a cabo las diversas tareas de construcción.

Cada perfil profesional dentro del proyecto tiene responsabilidades específicas y debe trabajar en conjunto con los demás miembros del equipo para cumplir con los objetivos y plazos establecidos. La coordinación efectiva entre las distintas áreas y la buena comunicación entre los profesionales involucrados son fundamentales para el desarrollo exitoso del proyecto. Además, es importante contar con un liderazgo sólido y experimentado en la figura del gerente de proyecto y sus subgerentes, quienes serán los responsables de supervisar, coordinar y controlar las actividades de todo el equipo de trabajo.

La siguiente tabla presenta una descripción de los perfiles profesionales más comunes en la construcción de túneles y estaciones de metro, sus responsabilidades y la cantidad estimada de personas que podrían requerirse en una obra de esta naturaleza. Es importante tener en cuenta que estas cifras son estimativas y pueden variar en función de las características específicas de cada proyecto y las necesidades particulares de cada etapa del proceso constructivo.

<b>Perfil Profesional</b>	<b>Responsabilidades</b>	<b>Cantidad de Personas</b>
<b>Gerente de Proyecto</b>	Planificación, coordinación, supervisión y control del proyecto, comunicación con interesados	1
<b>Subgerente de Proyecto (2)</b>	Apoyo al Gerente en la coordinación y supervisión de áreas específicas, seguimiento de metas y plazos	2
<b>Ingeniero Civil</b>	Diseño y supervisión de la construcción de túneles y estaciones, cálculos estructurales, coordinación técnica	8-12
<b>Auxiliar de Ingeniero Civil</b>	Apoyo al Ingeniero Civil en la supervisión y coordinación de trabajos, asistencia técnica	8-12
<b>Ingeniero Electromecánico</b>	Diseño y supervisión de sistemas electromecánicos, coordinación técnica en instalaciones	2-4
<b>Ingeniero en Geotecnia</b>	Análisis del suelo, diseño de sistemas de soporte y excavación, asesoramiento en geotecnia	4-8
<b>Ingeniero Ambiental</b>	Evaluación de impacto ambiental, gestión de permisos, monitoreo ambiental y cumplimiento de normativas	4
<b>Ingeniero de Seguridad</b>	Implementación y monitoreo de medidas de seguridad, capacitación y supervisión del personal en seguridad	4-8
<b>Topógrafo</b>	Levantamientos topográficos, control de alineación y nivelación, asesoramiento en ubicación de estructuras	8-12
<b>Ayudante de Topografía</b>	Asistencia al topógrafo en la realización de levantamientos y mediciones, apoyo en trabajos de campo	16-24
<b>Arquitecto</b>	Diseño de estaciones y áreas públicas, integración estética y funcional al entorno urbano	4-8
<b>Capataz / Supervisor de Obra</b>	Supervisión y coordinación del personal de construcción, control de avance y calidad en obra	8-16
<b>Operadores de Maquinaria Pesada</b>	Operación de maquinaria pesada, como excavadoras, grúas y camiones para excavación y transporte de materiales	16-32
<b>Trabajadores de la Construcción</b>	Realización de tareas de construcción, como excavación, armado de acero, cimbrado, concreto y acabados	60-120
<b>Personal de Mantenimiento</b>	Mantenimiento preventivo y correctivo de maquinaria y equipos, gestión de repuestos y herramientas	8-16
<b>Especialista BIM</b>	Desarrollo y gestión de modelos BIM, coordinación y colaboración entre disciplinas, análisis y optimización de diseño.	4-8

Tabla 14 - Personal directo en una obra de construcción de túnel de metro. Elaboración propia.

El total de personal requerido es de mínimo 139 – máximo 248 personas, esta estimación se realiza para un proyecto de 5km con 4 estaciones (túneles gemelos) cambiará conforme al número de estaciones, longitud del túnel de Intertramo y demás obra civil que se requiera, el cálculo se realiza únicamente para poder dar un pivote que sirva de conocimiento general.

### 2.13.2-Personal Indirecto:

En un proyecto de construcción de túneles y estaciones de metro, además del personal que trabaja directamente en la obra, es fundamental contar con un equipo de profesionales que desempeñen funciones de soporte y coordinación desde las oficinas y otras instalaciones de las empresas involucradas. Estos roles indirectos son esenciales para garantizar el buen funcionamiento del proyecto, y abarcan áreas como la administración, finanzas, adquisiciones, recursos humanos y aspectos legales, entre otras.

La siguiente tabla presenta algunos de los perfiles profesionales clave que forman parte del equipo de personal indirecto en un proyecto de construcción de túneles y estaciones de metro, sus responsabilidades y la cantidad de personas que podrían ser necesarias en función de las necesidades y la estructura organizativa de cada empresa participante. Es importante tener en cuenta que estas cifras son aproximadas y pueden variar según las especificidades del proyecto y las empresas involucradas.

Perfil Profesional	Responsabilidades	Cantidad
<b>Director de operaciones</b>	Supervisar y coordinar las actividades operativas de la empresa.	1
<b>Gerente administrativo</b>	Administrar y coordinar las actividades financieras, contables y de recursos humanos de la empresa.	1
<b>Contador</b>	Llevar la contabilidad y preparar los estados financieros de la empresa.	1
<b>Analista de costos</b>	Realizar estimaciones de costos y seguimiento de los gastos del proyecto.	1
<b>Especialista en adquisiciones</b>	Gestionar las compras y contrataciones de bienes y servicios necesarios para el proyecto.	1
<b>Asistente administrativo</b>	Brindar apoyo administrativo en diversas áreas de la empresa.	1-2
<b>Especialista en recursos humanos</b>	Gestionar el reclutamiento, selección, contratación y capacitación del personal.	1
<b>Abogado</b>	Asesorar y gestionar los aspectos legales relacionados con el proyecto y la empresa.	1
<b>Chofer</b>	Transportar a los empleados y materiales en vehículos de la empresa.	2
<b>Mensajero</b>	Entregar documentos y paquetes entre la empresa y otros lugares relacionados con el proyecto.	1

Tabla 15 - Personal indirecto en una construcción de túnel de metro. Elaboración propia.

Esto suma un total de 12 personas en roles indirectos para el proyecto de construcción de túneles y estaciones de metro.

### **III.-Conclusiones.**

La construcción de túneles de metro y estaciones es un proceso complejo que requiere una gran cantidad de recursos humanos, maquinaria especializada y herramientas. Los equipos de trabajo deben estar compuestos por profesionales con experiencia en diferentes áreas, como ingenieros civiles, electromecánicos, topógrafos, geólogos y técnicos especializados. Además, el personal administrativo y de apoyo también desempeña un papel fundamental en el éxito del proyecto, contribuyendo en áreas como la gestión, logística y comunicación.

La planificación y gestión de proyectos es crucial en la construcción de túneles y estaciones de metro. La coordinación entre todas las partes involucradas es esencial para garantizar el cumplimiento de los plazos, el control de costos y la calidad en la ejecución de la obra. Los gerentes de proyecto, subgerentes y otros profesionales deben trabajar en conjunto para abordar los desafíos y resolver problemas a medida que surjan durante la construcción.

En términos de maquinaria y herramientas, la selección adecuada y el uso eficiente de estos recursos es crucial para el avance y éxito del proyecto. Las tuneladoras, equipos de excavación, grúas y bombas de concreto son solo algunos de los equipos esenciales para llevar a cabo las tareas de construcción. Además, la topografía, los trabajos de habilitado y soldado, y en general las herramientas manuales también desempeñan un papel importante en el proceso constructivo.

El monitoreo y control de calidad durante la construcción de túneles y estaciones de metro es otro aspecto crítico que debe ser atendido por profesionales especializados. La inspección y verificación de la calidad del concreto, el acero de refuerzo, las instalaciones electromecánicas y otros componentes de la obra garantizan la seguridad y la durabilidad de las estructuras construidas.

Las obras inducidas, como la reubicación de servicios públicos, el apuntalamiento de edificaciones colindantes y la implementación de medidas de mitigación del impacto ambiental y social, también deben ser consideradas en el proceso de construcción de túneles y estaciones de metro. Estas obras son necesarias para asegurar que el proyecto se desarrolle de manera responsable y con la menor afectación posible a la comunidad y al entorno.

El uso de sistemas BIM en la construcción de túneles es una herramienta valiosa y eficiente que permite mejorar la colaboración entre los profesionales involucrados en el proyecto, optimizar el proceso de diseño y construcción, y reducir los costos y tiempos de ejecución. Además, al facilitar la detección temprana de problemas y conflictos, BIM promueve una mayor calidad en la construcción y disminuye los riesgos asociados a la obra. En un contexto en el que la infraestructura de transporte masivo, como los túneles de metro, es cada vez más importante para el desarrollo urbano sostenible, la implementación de tecnologías como BIM resulta esencial para garantizar proyectos exitosos y eficientes en términos de recursos y tiempo.

La utilización de herramientas como Excel y Microsoft Project en la gestión de proyectos de construcción es fundamental para llevar a cabo un seguimiento eficiente y estructurado del avance físico, financiero y programado del proyecto. Estas herramientas permiten un mejor control de los recursos, la identificación temprana de desviaciones y la toma de decisiones

informadas para garantizar el cumplimiento de los objetivos y plazos establecidos, contribuyendo así al éxito general del proyecto.

Por otro lado, una adecuada supervisión y gerencia de proyectos en la construcción es esencial para asegurar la calidad, seguridad y eficiencia de la obra. Un enfoque de gestión sólido, que incluya una planificación rigurosa, una comunicación efectiva entre los interesados y un monitoreo constante del progreso y los riesgos permite identificar y resolver los problemas de manera oportuna y mejorar el desempeño del proyecto. En este contexto, la supervisión y gerencia de proyectos en túneles son fundamentales para garantizar la entrega de infraestructuras de transporte masivo de alta calidad y que cumplan con las expectativas y necesidades de las comunidades a las que sirven.

Finalmente, la construcción de túneles de metro y estaciones es un proyecto a gran escala que requiere una planificación cuidadosa, una ejecución precisa y la colaboración efectiva entre todas las partes involucradas. La experiencia y el compromiso de los profesionales y trabajadores, junto con el uso adecuado de maquinaria y herramientas, son fundamentales para garantizar el éxito del proyecto y la entrega de una infraestructura de transporte público segura, eficiente y sostenible.

En México, el desarrollo de túneles de metro y estaciones ha sido un factor clave en el crecimiento y la modernización de las principales ciudades del país. La construcción de estos sistemas de transporte público ha permitido mejorar la movilidad urbana, reducir la congestión vehicular y disminuir la emisión de gases contaminantes. Además, ha fomentado la creación de empleo y el desarrollo de la industria de la construcción, al tiempo que ha impulsado la innovación en técnicas y tecnologías de construcción de túneles.

Para asegurar un futuro sostenible y continuar con el éxito en la construcción de túneles de metro en México, es fundamental seguir invirtiendo en la formación y capacitación de profesionales y trabajadores del sector, así como en el desarrollo de tecnologías y prácticas constructivas más eficientes y respetuosas con el medio ambiente. La colaboración entre el gobierno, la industria y la academia será crucial para enfrentar los desafíos del crecimiento urbano y seguir mejorando la calidad de vida de millones de personas que dependen del transporte público en su día a día.

## **Anexo A-Lista Imágenes**

Ilustración 1 - Imagen de los municipios de la zona metropolitana del Valle de México. INEGI-CONACYT 2017. ....	4
Ilustración 2 - Mapa de la Ciudad de México y las líneas actuales de metro y tren ligero. Google Maps 2023. ....	5
Ilustración 3 - Mapa de la red del STC Metro de la CDMX. ....	6
Ilustración 4 - Excavación y habilitado de acero de refuerzo para el Brocal de la lumbrera. SOBSE 2018. ....	9
Ilustración 5 - Fotografía aérea de lumbrera. SOBSE 2018. ....	10
Ilustración 6 - Fotografía aérea de lumbrera. SOBSE 2019. ....	10
Ilustración 7 - Excavación de la sección superior de túnel. SOBSE 2021. ....	11
Ilustración 8 - Movimiento de material de rezaga producto de la excavación a la lumbrera y su posterior retiro a superficie. SOBSE 2021. ....	11
Ilustración 9 - Habilitado de acero de refuerzo. SOBSE 2020. ....	12
Ilustración 10 - Cimbra metálica deslizante para la bóveda del túnel de estación. SOBSE 2020. ....	13
Ilustración 11 - Estructuración de losa de fondo, muro hastial y muro central de estación. Cimbra deslizante para el colado de bóveda. Estación de 1 vía terminada su estructuración. SOBSE 2020. ....	14
Ilustración 12 – Estructuración de túnel secundario de estación. SOBSE 2021. ....	14
Ilustración 13 - Trabajos de impermeabilización en túnel. SOBSE 2020. ....	15
Ilustración 14 - Trabajos de impermeabilización en túnel. SOBSE 2020. ....	15
Ilustración 15 - Nicho para instalaciones electromecánicas. SOBSE 2020. ....	16
Ilustración 16 - Preparaciones para cableado sobre muro hastial. SOBSE 2021. ....	18
Ilustración 17 - Trabajos previos para Obras Hidráulicas Inducidas para cambiar la traza de tuberías de agua potable. SOBSE 2021. ....	19
Ilustración 18 - Trabajos de revisión topográfica en túnel. SOBSE 2021. ....	20
Ilustración 19 - Equipos que pueden ser utilizados por las brigadas topográficas, niveles, estaciones totales, tripies, prismas, y sistemas GPS. ....	21
Ilustración 20 - Diferentes drones que pueden ser utilizados en la supervisión de la construcción, varían en tamaño, tiempo de vuelo y calidad de cámara. DJI 2023. ....	23
Ilustración 21 - Modelo 3D de un sistema de túneles gemelos y túneles secundarios de una estación. Realizado en SketchUp2020/Blender 2020/Vray20. SOBSE 2020. ....	23
Ilustración 22 - La calidad en materiales, procesos constructivos y terminados es esencial para toda construcción en especial en túneles. SOBSE 2021. ....	27
Ilustración 23 - La calidad de los trabajos es importante en todas las etapas del proyecto, manteniendo la mejor calidad de materiales, aplicación y limpieza. SOBSE 2022. ....	29
Ilustración 24 - Los sistemas de ventilación para vigilar la calidad del aire son muy importante en la construcción de túneles. SOBSE 2022. ....	34
Ilustración 25 - La ventilación, iluminación y limpieza son importantes en todos los procesos constructivos del túnel. SOBSE 2022. ....	35
Ilustración 26 - Ejemplo de programación de actividades en Microsoft Project para la construcción de una estación y túneles de Intertramo. Programa realizado para SOBSE 2022, en Microsoft Project 2022. ....	46
Ilustración 27 - 2 Imágenes de un modelo 3D para visualización de procesos constructivos, seguimiento y toma de decisiones. Realizado en Blender-Unreal-Autodesk, SOBSE 2021. ....	47

## **Anexo B-Lista de tablas**

Tabla 1 - Tipos de transporte en México. Elaboración propia. ....	3
Tabla 2 - Estaciones y líneas de Metro en la CDMX. Elaboración propia. ....	7
Tabla 3 - Pasajeros, líneas y número de estaciones por lustro. Elaboración propia. ....	8
Tabla 4 - Equipo de topografía. Elaboración propia. ....	22
Tabla 5 - Normas mexicanas y americanas referente a geotecnia y geología. Elaboración propia...	26
Tabla 6 - Aditivos para el concreto. Elaboración propia. ....	29
Tabla 7 - Normativas mexicanas y americanas referentes al concreto. Elaboración propia. ....	31
Tabla 8 - Plan estratégico de mitigación de riesgos. Elaboración propia. ....	36
Tabla 9 - Normas mexicanas y americanas para seguridad, higiene y ambiental. Elaboración propia. ....	37
Tabla 10 - Diferencias entre tipos de estimaciones. Elaboración propia. ....	40
Tabla 11 - Riesgos que impactan los avances físicos, financieros y programados. Elaboración propia. ....	44
Tabla 12 - Pros y contras del uso de Excel y Microsoft Project. Elaboración propia. ....	45
Tabla 13 - Pros y contras de la metodología BIM. Elaboración propia. ....	48
Tabla 14 - Personal directo en una obra de construcción de túnel de metro. Elaboración propia. ....	49
Tabla 15 - Personal indirecto en una construcción de túnel de metro. Elaboración propia. ....	50

## Anexo C-Bibliografía

1. Bickel, J. O., Kuesel, T. R., & King, E. H. (1996). Túneles y obras subterráneas: Manual de diseño y construcción. Editorial Limusa.
2. Chapman, D. N., Metje, N., & Stärk, A. (2010). Introduction to Tunnel Construction. CRC Press.
3. Diaz, J. L., & Silio, L. A. (2004). Manual de túneles y obras subterráneas. Editorial Rueda.
4. Eisenberg, N. A., & Nelson, P. P. (2015). Tunnel engineering handbook. Springer.
5. Escuder, I., & Maciá, F. (2005). Construcción de túneles en suelos y rocas: Métodos constructivos, sostenimientos y tratamientos previos. Editorial Club Universitario.
6. Maidl, B., Thewes, M., & Kleen, A. (2008). Handbook of Tunnel Engineering: Design and Construction for Mechanized Tunneling. Ernst & Sohn. doi: 10.1002/9783433600552
7. Meguid, M. A. (2016). Túneles y estructuras subterráneas: fundamentos, diseño y construcción. Editorial Reverté.
8. Muir Wood, A. (1990). Tunnelling: Management by Design. Springer Science & Business Media.
9. New, B., & O'Reilly, M. (1991). The Management of Tunnelling Projects. Tunnelling and Underground Space Technology, 6(3), 259-265. doi: 10.1016/0886-7798(91)90012-B
10. O'Reilly, M., & New, B. (1997). Tunnelling: Practice and technology. Thomas Telford.
11. Rogóz, M., & Dzioba, R. (2019). Tunnelling: Design, Planning, and Construction. CRC Press.
12. Sauer, G., & Anagnostou, G. (2007). Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling. Springer Science & Business Media.
13. Schittli, D. (2003). La construcción de túneles de carretera. Editorial Universitat Politècnica de València.
14. Sturzenegger, M., & Steiner, W. (2009). Closed-form solutions for tunneling-induced ground movements in clays. Géotechnique, 59(9), 753-762.
15. Viggiani, G., & Di Maio, C. (2012). Túneles urbanos: diseño y construcción en zonas urbanas densamente pobladas. Editorial La Sapienza.
16. Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas. (2014). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LOPSRM\\_301014.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LOPSRM_301014.pdf)
17. Reglamento de la Ley de Obras Públicas y Servicios Relacionados con las Mismas. (2015). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg\\_LOPSRM.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LOPSRM.pdf)
18. Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano. (2016). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5435094&fecha=28/11/2016](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5435094&fecha=28/11/2016)
19. Ley de Caminos, Puentes y Autotransporte Federal. (2016). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/133\\_080216.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/133_080216.pdf)

20. Reglamento de Construcción del Distrito Federal. (2004). Gaceta Oficial del Distrito Federal. Recuperado de: <https://www.aldf.gob.mx/archivo-99e5d3f76e4d4e2cb1f17ee3f3e3b575.pdf>
21. Norma Técnica Complementaria: Cimentaciones profundas para estructuras. (2011). Secretaría de Obras y Servicios del Distrito Federal. Recuperado de: [https://www.paot.org.mx/leyes/df/pdf/NTC-Cimentaciones\\_profundas\\_para\\_estructuras\\_2011.pdf](https://www.paot.org.mx/leyes/df/pdf/NTC-Cimentaciones_profundas_para_estructuras_2011.pdf)
22. Norma Técnica Complementaria: Túneles y obras subterráneas. (2004). Secretaría de Obras y Servicios del Distrito Federal. Recuperado de: [https://www.paot.org.mx/leyes/df/pdf/NTC-Tuneles\\_y\\_obras\\_subterranas\\_2004.pdf](https://www.paot.org.mx/leyes/df/pdf/NTC-Tuneles_y_obras_subterranas_2004.pdf)
23. Ley de Protección Civil del Distrito Federal. (2008). Gaceta Oficial del Distrito Federal. Recuperado de: [http://www.paot.org.mx/leyes/df/pdf/ley\\_proteccion\\_civil\\_2010.pdf](http://www.paot.org.mx/leyes/df/pdf/ley_proteccion_civil_2010.pdf)
24. Reglamento de Tránsito del Distrito Federal. (2015). Gaceta Oficial de la Ciudad de México. Recuperado de: <http://www.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/584/a45/6d3/584a456d382b2219540004.pdf>
25. Ley Federal del Trabajo. (2012). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/125\\_120618.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/125_120618.pdf)
26. Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo. (2014). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5349455&fecha=13/11/2014](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5349455&fecha=13/11/2014)
27. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). (2018). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5515030&fecha=10/05/2018](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5515030&fecha=10/05/2018)
28. Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Evaluación del Impacto Ambiental. (2000). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regla/n265.pdf>
29. Ley de Responsabilidad Ambiental. (2013). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LRA\\_070613.pdf](http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LRA_070613.pdf)
30. Reglamento de la Ley de Responsabilidad Ambiental. (2015). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de: [https://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5386065&fecha=19/03/2015](https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5386065&fecha=19/03/2015)
31. Comisión Europea. (2010). Eurocódigos: Normas de diseño estructural en la Unión Europea. Bruselas: Comisión Europea.
32. National Fire Protection Association. (2018). NFPA 502: Norma para Carreteras y Túneles de Vehículos de Motor. Quincy, MA: NFPA.
33. British Standards Institution. (2019). BS 6164:2019 Código de práctica para la seguridad, la salud y el medio ambiente en la construcción de túneles. Londres: BSI Group.
34. Asociación Internacional de Túneles y Espacio Subterráneo. (2014). Directrices para la construcción de túneles. Lausana: ITA.
35. American Society of Civil Engineers. (2016). ASCE 7-16: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures. Reston, VA: ASCE.

36. American Society for Testing and Materials. (2018). ASTM D4083-89: Standard Practice for Description of Frozen Soils (Visual-Manual Procedure). West Conshohocken, PA: ASTM International.
37. Transportation Research Board. (2022). Highway Capacity Manual. Washington, DC: Transportation Research Board.
38. American Concrete Institute. (2019). ACI 350: Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures and Commentary. Farmington Hills, MI: ACI.
39. American Association of State Highway and Transportation Officials. (2021). AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. Washington, DC: AASHTO.
40. National Fire Protection Association. (2019). NFPA 130: Standard for Fixed Guideway Transit and Passenger Rail Systems. Quincy, MA: NFPA.
41. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2014). Norma SCT N-CMT-4-03-004/14: Túneles para Vías Terrestres. México: SCT.
42. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2013). Norma SCT N-CMT-2-03-001/13: Carreteras – Clasificación y Definiciones. México: SCT.
43. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2014). Norma SCT N-CMT-4-03-002/14: Puentes y Estructuras de Concreto para Vías Terrestres. México: SCT.
44. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2014). Norma SCT N-CMT-4-03-003/14: Puentes y Estructuras Metálicas para Vías Terrestres. México: SCT.
45. Comisión Nacional del Agua. (2008). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000: Establece las especificaciones y el método para determinar la resistencia a la compresión de probetas de suelo-cemento. México: CNA.
46. Dirección General de Normas. (2012). Norma Oficial Mexicana NOM-011-STPS-2001: Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se manejen, transporten, procesen o almacenen sustancias químicas capaces de generar contaminación en el medio ambiente laboral. México: DGN.

## **Anexo D-Glosario**

1. **Andén:** Plataforma situada a lo largo de las vías del tren en una estación de metro, donde los pasajeros pueden esperar y abordar los trenes.
2. **Balasto:** Capa de material granular, generalmente compuesta de piedra triturada, que se coloca bajo las vías del tren para proporcionar soporte y drenaje adecuado.
3. **Bóveda:** Estructura curvada que forma el techo de un túnel, proporcionando soporte y resistencia a las cargas del terreno circundante.
4. **Cárcamo:** Estructura que se utiliza para recolectar y bombear aguas residuales, pluviales o de infiltración en túneles y otras construcciones subterráneas.
5. **Cimbra móvil:** Sistema de encofrado deslizante utilizado en la construcción de túneles para facilitar la colocación de concreto en la bóveda y las paredes del túnel.
6. **Concreto hidráulico:** Mezcla de cemento, arena, grava y agua que se endurece al reaccionar químicamente con el agua. Utilizado en la construcción de túneles de metro para formar estructuras resistentes y duraderas.
7. **Electromecánica:** Disciplina que combina la ingeniería eléctrica y la ingeniería mecánica, aplicada en la construcción de túneles de metro para el diseño e instalación de sistemas eléctricos y mecánicos, como la iluminación, la ventilación y el control de tráfico.
8. **Excavación:** Proceso de retirar material del suelo, como tierra, roca o sedimentos, para crear un espacio subterráneo en el que se construirá el túnel del metro.
9. **Fraguado:** Proceso mediante el cual el concreto adquiere resistencia y rigidez al endurecerse, permitiendo que las estructuras construidas con concreto soporten las cargas a las que están destinadas.
10. **Geomembrana:** Lámina impermeable hecha de materiales sintéticos como polietileno, utilizada para prevenir la infiltración de agua y otros líquidos en construcciones subterráneas como túneles de metro.
11. **Geotextil:** Material textil sintético permeable, utilizado en la construcción de túneles para separar, filtrar, proteger y drenar el terreno, mejorando así la estabilidad y la vida útil de la estructura.
12. **Hidrogeología:** Estudio del agua subterránea en relación con su distribución y movimiento en el subsuelo. Importante en la planificación y construcción de túneles de metro, ya que el agua subterránea puede afectar la estabilidad y la integridad de la estructura.
13. **Impermeabilización:** Proceso de proteger una estructura subterránea, como un túnel de metro, contra la infiltración de agua y humedad, utilizando materiales como geomembranas y geotextiles, y técnicas de construcción adecuadas.
14. **Instalaciones electromecánicas:** Equipos y sistemas eléctricos y mecánicos utilizados en la operación y el mantenimiento de túneles de metro, como sistemas de iluminación, ventilación, comunicación y control de tráfico.
15. **Losa:** Placa de concreto que forma el piso de un túnel o estación de metro, proporcionando una superficie de apoyo estable y resistente para las vías y los pasajeros.
16. **Muros hastiales:** Paredes laterales de un túnel de metro que proporcionan soporte y contención al terreno circundante, construidas con concreto armado u otros materiales resistentes.

17. Maquinaria pesada: Equipos de construcción de gran tamaño y potencia utilizados en la excavación y construcción de túneles de metro, como excavadoras, bulldozers y grúas.
18. Material rodante: Conjunto de vehículos ferroviarios, como trenes y vagones, que circulan por las vías de un sistema de metro para transportar pasajeros y carga.
19. Nichos: Espacios pequeños construidos en las paredes de un túnel de metro, destinados a albergar equipos eléctricos, sistemas de comunicación, extintores y otros elementos necesarios para la operación y seguridad del metro.
20. Obras inducidas: Proyectos de infraestructura y desarrollo urbano que surgen como resultado de la construcción de un túnel de metro, como mejoras en la red vial, saneamiento y servicios públicos.
21. Revestimiento primario: Capa de concreto proyectado (shotcrete) u otro material que se aplica a las paredes y techo de un túnel de metro durante la excavación, proporcionando soporte temporal al terreno circundante.
22. Revestimiento definitivo: Capa final de concreto u otro material aplicado a las paredes y techo de un túnel de metro, una vez completada la excavación, proporcionando soporte estructural y resistencia a largo plazo.
23. Seguridad en la construcción: Conjunto de prácticas y medidas destinadas a proteger la salud y seguridad de los trabajadores y visitantes en un sitio de construcción de túneles y estaciones de metro, incluyendo la capacitación, el uso de equipo de protección personal y el cumplimiento de normas y reglamentaciones aplicables.
24. Subsuelo: Capa de suelo y roca que se encuentra debajo de la superficie de la tierra, a través de la cual se construyen túneles de metro y estaciones subterráneas.
25. Túneles de conexión: Pasadizos subterráneos construidos para conectar diferentes túneles de metro o estaciones, permitiendo el paso de pasajeros, personal y material rodante entre ellos.
26. Túneles de estación: Túneles construidos en las estaciones de metro para albergar las vías y los andenes, así como el acceso de pasajeros y personal.
27. Túneles de intertramo: Segmentos de túneles de metro que conectan las estaciones a lo largo de la línea, permitiendo el paso del material rodante y proporcionando acceso a sistemas de mantenimiento y emergencia.
28. Túneles secundarios: Pasadizos adicionales construidos dentro de las estaciones de metro o entre túneles principales, utilizados para funciones de soporte, como la ubicación de instalaciones electromecánicas, ventilación y acceso de emergencia.
29. Vías férreas: Infraestructura de transporte sobre la cual circulan los trenes y material rodante en un sistema de metro, compuesta por rieles, durmientes y balasto.
30. Ventilación: Proceso de intercambio de aire en un túnel de metro o estación, necesario para mantener la calidad del aire, controlar la temperatura y garantizar la seguridad en caso de incendio u otras emergencias.
31. Zonas de transición: Áreas en las que un túnel de metro pasa de un terreno a otro, como de roca a suelo, requiriendo cambios en las técnicas de excavación y soporte utilizadas durante la construcción.
32. Zonificación: Proceso de clasificación y regulación del uso de la tierra en áreas cercanas a un túnel de metro o estación, con el objetivo de promover el desarrollo urbano sostenible y garantizar la seguridad y funcionalidad del sistema de transporte.