

---

*INFORME EJECUTIVO*

---

**LEVANTAMIENTO, INSPECCIÓN, TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO DE LA LÍNEA 12 DEL METRO EN EL TRAMO SUBTERRANEO**

## Contenido

1.	ANTECEDENTES .....	3
2.	CONDICIONES ESTRUCTURALES DEL TUNEL .....	3
3.	REVISIÓN INTEGRAL AL SISTEMA DE DRENAJE .....	4
3.1	LEVANTAMIENTO DE FILTRACIONES .....	4
3.2	EXCAVACIÓN PARA MEDICION DE ESPESORES DE CAPAS .....	6
3.3	CONDICIONES Y CAPACIDAD DE DRENAJE .....	7
4.	HALLAZGOS RELEVANTES EN EL SISTEMA DE DRENAJE .....	9
4.1	APORTES EXTRAORDINARIOS DE AGUA.....	9
4.2	PRESENCIA DE AGUA EN REGISTROS DEL DRENAJE.....	10
4.3	RESTITUCIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO .....	10
5.	ESTUDIOS DE MATERIALES.....	11
5.1	OBJETO DEL ESTUDIO.....	11
5.2	ESTUDIOS DE CAMPO – MUESTREO DE BALASTO.....	12
5.3	EJECUCIÓN DE ENSAYOS .....	12
5.4	PRUEBAS DE PLACA .....	13
6.	ANÁLISIS Y RESULTADOS .....	13
6.1	COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL REVESTIMIENTO .....	13
6.2	CALIDAD DE LOS MATERIALES.....	14
6.2.1	Balasto .....	14
6.2.2	Relleno de grava-arena .....	14
6.3	NIVEL FREÁTICO .....	15
6.4	COMPORTAMIENTO DE LA PLATAFORMA DE VÍA .....	15
7.	RECOMENDACIONES Y PLAN DE ACCIONES PARA CONSERVACIÓN .....	16
7.1	Estructuras .....	16
7.2	Drenaje y Filtraciones.....	16
7.3	Balasto y relleno grava-arena.....	17

## 1. ANTECEDENTES

Con base en la distribución de responsabilidades contractuales del Proyecto Línea 12, ICA fue la encargada de ejecutar el tramo subterráneo de la Línea 12.

Derivado del colapso del Tramo Elevado de la Línea 12, ocurrido el día 3 de mayo del año en curso, el sistema de transporte colectivo Metro solicitó realizar una inspección de toda la línea 12. En particular, se encomendó a ICA revisar las condiciones actuales del tramo subterráneo. De acuerdo a lo anterior, se realizó un programa multidisciplinario para verificar que las condiciones son adecuadas para la operación del Metro. A manera de resumen se revisó el túnel estructuralmente, sistema de drenaje, espesores y calidad de los materiales de capas de balasto y relleno de grava-arena y filtraciones.

Derivado de las acciones realizadas por Gobierno de la Ciudad de México (GCDMX), el Colegio de Ingenieros Civiles de México (CICM), realizó un dictamen de la sección del Tramo Subterráneo. En dicho documento se confirma que el túnel es seguro para continuar con su funcionamiento.

El GCDMX, en conjunto con la Secretaría de Obras y Servicios (SOBSE), Sistema de Transporte Colectivo (STC) y el Comité Técnico Asesor (integrado por Sergio Alcocer Martínez de Castro, Raúl Jean Perrilliat, Rubén Alfonso Ochoa Torres, Bernardo Gómez González, Juan Manuel Mayoral Villa y José María Rioboo Martín); realizaron diversos análisis de la situación del tramo subterráneo.

## 2. CONDICIONES ESTRUCTURALES DEL TUNEL

En relación a las áreas de Geotecnia y Estructuras, a través del Dr. Juan Manuel Mayoral Villa, quien, con su grupo de trabajo, recabó información sobre el comportamiento estructural del túnel de dovelas para corroborar las condiciones del mismo. Por esta razón se realizaron calas entre la lumbrera de Centeno (Inicio del túnel de dovelas) y el intertramo Parque de los Venados-Zapata; se retiró el balasto y el relleno grava arena hasta encontrar la cubeta de concreto. Las calas se realizaron los días 4 y 5 de agosto del presente año (Ver Anexo 2.1 “Sondeos”)

De los datos de las calas realizadas y de las memorias de análisis estructural, se concluyó con el grupo de expertos que, entre los cadenamientos 20+360 a 21+300, el túnel de dovelas cuenta con un revestimiento secundario y cubeta estructural; entre los cadenamientos 21+300 a 22+470 se tiene una cubeta estructural; entre los cadenamientos 22+470 a 25+303 se tiene una cubeta de concreto ciclópeo y finalmente entre los cadenamientos 25+303 al 27+390 se tiene un relleno de grava-arena. Estas secciones se pueden ver en el Anexo 2.2 “larguillo Tramo Subterráneo”. Las cuatro secciones mencionadas tienen sus correspondientes memorias de cálculo que avalan el diseño. Diseño que fue certificado o avalado por la supervisión de Proyecto Ejecutivo (IPISA), el Corresponsable en Seguridad Estructural, el Director Responsable de Obra y el Proyecto Metro del Distrito Federal.

Referente al diseño sísmico del túnel de dovelas se discutió con el Comité Técnico Asesor que en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal y sus Normas Técnicas Complementarias para

Diseño por Sismo, así como el Manual de COVITUR no contemplan el análisis por sismo de las **estructuras subterráneas**.

Durante la fase de diseño del proyecto de la Línea 12, se llevó a cabo el análisis sísmico longitudinal del túnel, mediante un programa de diferencias finitas (FLAC). La revisión correspondió al intertramo Mexicaltzingo-Ermita, por ser la condición más desfavorable debido al espesor de arcillas en el que se aloja el túnel de dovelas en esa zona geológica de la CDMX. En el Anexo 2.3 “Revisión por sismo” se presenta los resultados obtenidos. Se concluye que el túnel tiene un comportamiento satisfactorio cumpliendo con los parámetros establecidos en el diseño integral, y éste sigue prácticas internacionales de diseño para sismo, condición que ha sido verificada en esta revisión.

Al respecto de las salidas de emergencia que conectan en cuatro puntos al túnel, el Comité Técnico Asesor tenía el interés de verificar los componentes estructurales asociados a esta condición, en específico verificar si el túnel en estos puntos contaba con la cubeta de concreto indicada en el proyecto; después de los sondeos realizados los días 4 y 5 de agosto del 2021, **se confirmó que las cuatro conexiones cuentan con la cubeta de concreto**.

En el modelo de diseño desarrollado numéricamente, se incluyó una extensión de la cubeta (llamado hastiales de la cubeta), ver Anexo 2.4. “Revisión estructural de salidas de emergencia” En esta revisión contempló confirmar que las conexiones del túnel en las 4 salidas de emergencia fueron resueltas satisfactoriamente con cubeta de concreto, precisando que los hastiales de la cubeta sólo son requeridos en dos de ellas (vía láctea y sur 73), mientras que las dos restantes (Balboa y Vertiz) no requieren hastiales como se observa en la parte final del Anexo 2.4.

**Una vez que se ha hecho esta revisión y los recorridos en puntos de interés, se confirma que el túnel no representa riesgos estructurales después de años de operación ya que no existen evidencias de fallas en estos puntos.**

### 3. REVISIÓN INTEGRAL AL SISTEMA DE DRENAJE

#### 3.1 LEVANTAMIENTO DE FILTRACIONES

Como parte de la revisión integral del sistema de drenaje, se llevó a cabo el reconocimiento de las filtraciones a lo largo del tramo comprendido desde la transición Pueblo Culhuacán- Atlalilco hasta cola Mixcoac. Esta campaña se llevó a cabo en presencia alternada de personal de la SOBSE, STC, Grupo RioBoo, así como consultores especializados en sistemas hidráulicos de ICA.

El reconocimiento consistió en:

- Inspeccionar visualmente anillo por anillo del túnel de dovelas, y determinar su condición relacionada con posibles filtraciones, para lo cual se registró su ubicación cadenamamiento, posición respecto a la vía más próxima y la cantidad de gotas que existen en el intradós o cara interna de la dovela.

- Recorrer las diferentes secciones construidas (cajón con muro Milán, túnel convencional NATM, cajón con pilas, lumbreras, cárcamos, registros, galerías, entre otros) para registrar la presencia de agua y construir un mapa de la condición actual del drenaje del tramo subterráneo.

En el anexo 3.1.1 “Reporte de Filtraciones” se presentan los datos obtenidos en dicho reconocimiento.

Una vez concluido el mapa de condiciones filtraciones presentes en el tramo subterráneo, claramente se pueden clasificar dos grupos de condiciones:

Intertramos	1er grupo Mayor incidencia de filtraciones	2do grupo Menor incidencia o sin filtraciones
Pueblo Culhuacán- Atlalilco - Mexicaltzingo (cabecera oriente)	X	
Mexicaltzingo (cabecera poniente) - Ermita	X (en 615 m)	X
Ermita-Eje Central	X (157 m)	X
Eje Central – Parque de los Venados	X	
Parque de los Venados -Zapata		X
Zapata- 20 de Noviembre		X
20 de Noviembre – Insurgentes Sur		X
Insurgentes Sur - Mixcoac		X

Esta clasificación se basa en la campaña de aforos de aporte de agua realizados en los cárcamos de las estaciones de dichos tramos.

El resultado de este reconocimiento posibilitó identificar 790 puntos que corresponden a humedad y brillo sin escurrimiento y no requieren tratamiento alguno, 265 con flujo despreciable y 165 de mayor aporte de atención necesaria. En el Anexo 3.1.2 “Prioridad de atención a filtraciones”, se enlistan las de mayor aporte y su prioridad sugerida de atención.

**Durante esta inspección se detectó una condición ajena a las filtraciones asociadas al nivel freático de diseño, que proviene de fuentes externas y puntos específicos que requieren arreglos (tuberías dislocadas, rejillas, galerías, entre otros) y que contribuyen importantemente a la cantidad de agua encontrada durante esta inspección; que debiera remediarse para evitar riesgos en el sistema de drenaje y vías.**

Es decir, esta condición ajena, por un lado se trata de aportes por fugas de la infraestructura hidráulica, agua potable y de drenaje de la Ciudad de México, que claramente tienen influencia en

la condición actual encontrada y que no deriva de condiciones intrínsecas a la construcción, ni a la operación del metro. Sin embargo, por su naturaleza y responsabilidad, es necesaria la intervención de la autoridad responsable para su eficaz atención; y por otro lado aportes de tuberías o rejillas que canalizan agua del exterior del metro directamente al sistema de vías y que pueden remediarse para detener el aporte externo hacia el sistema

### 3.2 EXCAVACIÓN PARA MEDICION DE ESPESORES DE CAPAS

Se llevó a cabo una campaña de exploración geotécnica orientada a la verificación de los espesores de las capas de Balasto y Relleno de Grava-Arena. Para esto, se excavaron 45 calas (excavaciones manuales a pico y pala) distribuidas a lo largo del tramo subterráneo, a una distancia de 250 m entre cada una de ellas. En el Anexo 3.2.1 “Reporte de medición de espesores de capas”.

El Anexo 2.2 “larguillo Tramo Subterráneo” muestra la ubicación de cada uno de los puntos de inspección realizados en las diferentes secciones tal y como se conforma el tramo subterráneo.

Durante esta exploración se confirmó que la sección construida en cajón está resuelta con una losa de cimentación; por otro lado, también se confirmó la existencia del relleno grava-arena en el túnel con dovelas.

En algunos puntos a lo largo de la campaña de exploración se detectaron zonas con contenido anormal de arenas, polvo y lodo, que provienen de fuentes externas (como ejemplo se puede citar el ingreso de agua con lodo desde la superficie de la rejilla de ventilación de la lumbrera de centeno que se deposita en el foso y contamina el balasto).

Casos como el anteriormente descrito se citan a continuación:

- Estación Parque de Los Venados (Cala No.31).
- Lumbrera de Centeno (el polvo entra por la rejilla de ventilación superior y se deposita en la zona de vías).
- Zona de rejillas de ventilación lateral del intertramo Atlalilco-Mexicaltzingo.
- Zonas aledañas a las cuatro salidas de emergencia.

En estos puntos **se observa contaminación de balasto por estas fuentes y no corresponde a los materiales que conforman el sistema de vías ( del relleno grava-arena y balasto)**, pero que pueden afectar la disipación de esfuerzos en el balasto y **es necesario intervenir estos puntos** mediante la separación de los diferentes tamaños de balasto con técnicas de cribado para poder hacer el retiro de polvo, arenas, o lodo que pudiera encontrarse o para poder restablecer sus propiedades .

### 3.3 CONDICIONES Y CAPACIDAD DE DRENAJE

Se realizó el reconocimiento de sistema de drenaje; registros, tuberías y operación de los cárcamos del túnel. Este reconocimiento en presencia de personal de SOBSE, Grupo Rioboo, STC e ICA, **no detectó sitios donde la presencia de agua aflorara al nivel de las vías ( en ocasiones nombrado efecto de aguachinamiento).**

Mediante equipo topográfico se ubicaron 490 registros de drenaje que fueron inspeccionados y se determinó su cadenamamiento, posición, respecto la vía más próxima, así como los niveles de tapa, arrastre hidráulico y nivel de agua en los casos en que se presentó. En el Anexo 3.3.1 “Informe de Inspección de Registros” se muestran resultados del levantamiento de registros.

De los hallazgos encontrados se puede señalar:

- **Azolve en 60%** de los registros en el tramo subterráneo, constituido por balasto, basura, etc., muestra del mantenimiento inadecuado de tramo en cuestión.
- **3%**, registros con **daño estructural**, mismos que serán incorporados en un programa de intervención para su reparación correspondiente.
- **8.8%**. con agua a distintos niveles.
- **El 30%** de los registros restantes inspeccionados, se encontraban secos y en buen estado.

En el anexo 3.3.2 “Planta y Perfil” se muestra zonas identificadas con presencia de agua para su análisis y plan de acción como el que a continuación se sugiere:

- a) Limpieza y desazolve de **registros**, que acusan atención que impiden el buen funcionamiento del drenaje en estos sectores.
- b) Desazolve y limpieza de **cárcamos** que se encuentran con condiciones no óptimas de operación, por ejemplo, el caso de Centeno que recibe aportes de 2 fosos, y que sería necesario hacer una intervención para evitar el desbordamiento de agua hacia las vías.
- c) **Construcción y equipamiento** de tres cárcamos de trasvase:
  - a. Atlalilco- Mexicaltzingo PK 20+701
  - b. Mexicaltzingo-Ermita PK 22+823
  - c. Ermita-Eje Central PK 23+146
- d) **Adecuación de los cárcamos existentes:**
  - a. Eje central – Parque de los Venados PK 24+487
  - b. Parque de los Venados – Zapata PK 25+525

- e) **Construcción de un nuevo registro** para conectar el drenaje del tramo de Centeno a la Estación Mexicaltzingo y asegurar el flujo de las posibles aportaciones.

Cabe señalar que la zona donde los registros presentan acumulación de agua, anteriormente mencionadas, coincide con las tomas de materiales en que presentaron agua libre en las terracerías (3 de 45 muestreos) mediante pozos a cielo abierto.

Se informa que la actividad de **desazolve y limpieza** de los incisos anteriores, se encuentra en **proceso a cargo de ICA** con un avance del 23% con corte al 22 de octubre de 2021, bajo un programa establecido de trabajo con una fecha tentativa de terminación al Febrero 2022 que seguirá los proyectos ejecutivos entregados por el GCDMX.

Se detectaron zonas puntuales donde el agua no escurre en condiciones óptimas por falta de mantenimiento adecuado. Sin embargo, el flujo sigue su curso a través del sistema sin que esto represente un riesgo al sistema de vías y en ningún caso está comprometido el desalojo del agua. Se confirma que, en relación a la capacidad instalada del sistema de drenaje inspeccionado y con base en el levantamiento técnico de detalle, **que el sistema de tuberías es funcional, redundante y su desempeño es acorde a la normatividad aplicable y no requiere una intervención mayor o cambio de criterio de diseño.**

Lo anterior se soporta con la campaña de mediciones y aforos en los cárcamos ubicados en el tramo subterráneo de los cuales se resume:

El gasto total medido fue de 2.32 litros por segundo (lps), registrados en los 21 cárcamos aforados en el periodo comprendido entre el 6 de septiembre y el 5 de octubre. De los cuales marcadamente el mayor valor se **registró en el tramo comprendido desde la transición Pueblo Culhuacán – Mexicaltzingo**, con un gasto máximo registrado de 1.93 lps que corresponde al **83%** del aporte medido en el tramo subterráneo de la línea 12 del Metro.

Es pertinente señalar que de acuerdo a las consideraciones de diseño, estaba previsto recibir un aporte en promedio de 3.5 lps en cada cárcamo para un total de 73.5 lps en todo el tramo subterráneo, lo cual deja en claro el margen con que cuenta el sistema de desalojo.

En lo relativo al sistema de tuberías es posible indicar que para las condiciones de pendiente mínima de 0.001 la capacidad de conducción de una tubería de 20 cm de diámetro es de 15 lps respecto el 1.43 lps que se midió en el tramo de aporte crítico.

En el anexo 3.3.3 “Aforo de Cárcamos” presentan los resultados a detalle de aforo tanto de aporte como de la capacidad de las bombas instaladas de manera individual y con operación simultánea.

Otro hallazgo detectado durante esta revisión señala una deficiencia en los equipos de bombeo (nueve casos) que deben atenderse y que más adelante de este escrito se detallará la acción correctiva.

## 4. HALLAZGOS RELEVANTES EN EL SISTEMA DE DRENAJE

### 4.1 APORTES EXTRAORDINARIOS DE AGUA

En el tramo desde la Transición Culhuacán – Atlalilco a la estación Mexicaltzingo, se presenta el mayor aporte de agua, equivalente al 83% del total que se presenta en el tramo subterráneo de la Línea 12. Este aporte se distribuye de la siguiente manera:

Cárcamo “Silos” cadenamiento 19+420 el cual recibe el 64%,

Cárcamo “Atlalilco” cadenamiento 18+797 el 11% y

Cárcamo “Centeno” cadenamiento 20+340 con el 8%.

Lo relevante del hallazgo es que, tanto en el cárcamo “Silos” como en el de “Centeno”, se tienen aportes puntuales, toda vez que dicho flujo no corresponde a un caudal acumulado a lo largo del tramo de influencia. Más bien, se presenta en los últimos tres registros previos a su descarga al cárcamo. Esto apoya la conclusión que se trata de un caso de aporte y flujo externo, debido a fugas de la infraestructura hidráulica de la ciudad.

Condición similar se presenta en el SR 12 Parque de los Venados y SR 11 Ermita, en éste último el aporte no se incorpora al túnel toda vez que es enviado por bombeo a la red exterior del drenaje de la zona.

Con relación a los aportes externos antes mencionados se pueden citar los siguientes:

1. Galería de cables en la SEAT Estrella.
2. Rejillas de ventilación en tramo Atlalilco - Mexicaltzingo
3. Salida de emergencia de Vertiz
4. Salida de emergencia de Parque de los Venados
5. Rejilla de ventilación en tramo 20 de Noviembre – Insurgentes Sur
6. Filtraciones en el tramo 28+067 al 28+098 (V1 y V2) del intertramo Insurgentes Sur- Mixcoac
7. Filtraciones en el tramo 28+136 al 28+158 (V1) del intertramo Insurgentes Sur- Mixcoac
8. Lumbrera en Tapón Mixcoac.

**Ante tales aportes externos se reitera la necesidad de involucrar a la autoridad responsable en la operación de los sistemas hidráulicos de la Ciudad de México para su debida atención.**

#### 4.2 PRESENCIA DE AGUA EN REGISTROS DEL DRENAJE.

Se identificaron registros con presencia de agua, la mayoría se localiza en los siguientes tramos:

Transición Culhuacán – Atlalilco a la estación Mexicaltzingo, en una longitud de aproximadamente **250 m** en el que el nivel del agua alcanza la zona de material de relleno.

Mexicaltzingo – Ermita de igual manera se presenta una longitud de aproximadamente **615 m** en condición similar y,

Ermita – Eje Central con una longitud de **157 m** con la misma condición en la que el agua alcanza el material de relleno.

La longitud acumulada (1,022 m) anterior representa solo el 8.8 % de la longitud total del tramo subterráneo.

Como ya se mencionó, será necesario la construcción de tres cárcamos de trasvase para abatir el nivel y encausar el agua al sistema de drenaje.

Se aclara que en aquellas zonas de cajón con losa de concreto y **túnel con cubeta de concreto ( en ambos casos el drenaje se encuentra embebido en concreto)**, los registros presentan **tirante de agua variable asociado a obstrucciones generadas por basura o residuos, pero se pudo confirmar que a pesar de que el agua mantiene un flujo constante ininterrumpido, se deben tomarse las acciones de limpieza y mantenimiento permanente durante la operación, y en ningún caso alcanza la capa de balasto ni las vías.**

Debido a lo anterior y conforme los resultados de las calas y la detección de agua libre en los materiales de balasto y de relleno, es posible señalar que no existe *aguachinamiento* del balasto ni en los materiales de relleno, menos aún corrientes de agua en estas capas.

**El total del valor aforado o encontrado en el sistema durante esta campaña que se llevó a cabo en época intensa de lluvias, corresponde a sólo el 3% de la capacidad instalada del sistema de drenaje, por lo que se reitera que no es necesaria una intervención mayor.**

#### 4.3 RESTITUCIÓN DE EQUIPOS DE BOMBEO.

Durante la campaña de aforo en los cárcamos de bombeo, fue posible identificar **equipos faltantes o fuera de servicio**, como se muestran en algunos ejemplos bajo el Anexo 4.3.1 “Falta de Bombas”, de acuerdo a lo siguiente:

<b>Cárcamo</b>	<b>Observaciones</b>
<b>Mexicaltzingo cabecera oriente</b>	Bomba N° 2 no es capaz de vencer la carga de bombeo.
<b>Mexicaltzingo cabecera poniente</b>	Bomba N° 1 fuera de servicio.
<b>Mexicaltzingo – Ermita Cad. 21+660</b>	Bomba N° 1 fuera de servicio.
<b>Ermita cabecera poniente</b>	Bomba N° 2 fuera de servicio.
<b>Ermita cabecera poniente</b>	Bomba N° 2 no existe.

<b>Parque de los Venados cabecera oriente</b>	Bomba N° 2 no existe.
<b>Insurgentes Sur cabecera poniente</b>	Bomba N° 1 fuera de servicio.
<b>Mixcoac Cabecera oriente</b>	Bomba N° 1 fuera de servicio.
<b>Tapón Mixcoac</b>	Bombas 1 y 2 no instaladas, no vencen carga de bombeo.

Es necesario restituir estos equipos a fin de restablecer la capacidad del sistema y de redundancia original para la confiable operación del sistema de bombeo. El estado actual de dichos equipos es independiente a la fase de construcción y puesta en marcha, debido a que se entregó el sistema totalmente equipado y funcionando.

## 5. ESTUDIOS DE MATERIALES

### 5.1 OBJETO DEL ESTUDIO

Durante la construcción del metro de la línea 12 el balasto utilizado, provenía del banco Peñasco de la Laguna, realizando el control de su calidad mediante muestras tomadas en el sitio de la trituración del banco con la frecuencia de una muestra a cada 10 mil toneladas, que cumplieron con los parámetros indicados en la especificación aprobada; y la liberación se realizó mediante la autorización de la supervisión CONISSA con base a los informes que emite el laboratorio LIAC de muestras tomadas únicamente en la planta de trituración, puesto que, en términos del contrato respectivo, la Especificación Contractual PMDF-09-VI-8-6120000-III-0015-02845-E-00, solo indicaba el punto de control para efecto de aceptación del balasto, en la planta de trituración en el banco y no en la capa colocada.

Por lo anterior y sin contar con la evidencia del mantenimiento, reemplazo o bateo a lo largo del tiempo en que operó la línea se desarrolló un plan de inspección y prueba con el propósito de tener una evaluación de la calidad del material que rige el comportamiento de la estructura de la plataforma; se realizaron muestreos de calas con el objeto de llevar a cabo en el laboratorio las siguientes pruebas representativas del material ya colocado para su calidad física o su nivel de envejecimiento a 10 años después de su colocación.

- Desgaste de los Angeles
- Coeficiente de dureza instantánea (DRI), en función de las pruebas de desgaste de los ángeles y Microdeval seco.
- Densidad
- Absorción
- Intemperismo acelerado
- Granulometrías

Cabe aclarar que las pruebas de densidad, absorción e intemperismo acelerado, no vienen relacionados en las especificaciones del metro. Sin embargo, consideramos que son aplicables para medir la calidad del balasto, tomadas de la referencia de “American Railway Engineering and Maintenance of Way Association”, AREMA por sus siglas.

Por lo anterior, se hizo un plan de ejecución, plasmándose en un larguillo del tramo subterráneo Anexo 2.2 las 45 calas que se muestrearon e incluyen zonas de curvas con radio reducido y tangente, mismas que fueron conciliadas con personal de obras públicas. Para continuar con el proceso de levantamiento realizado por ICA y a los resultados que se obtienen mediante pruebas Inter laboratorios, se seleccionaron a dos laboratorios acreditados ante la Entidad Mexicana de acreditación (EMA) para la realización de los muestreos de balasto y pruebas para el material de relleno, directamente en los tramos como material colocado, calificándolos con base a normas o estándares de calidad indicadas por el proyecto metro .

En el anexo 5.1 se muestran las acreditaciones vigentes de los dos laboratorios que realizaron los muestreos.

Posteriormente, en las instalaciones de cada uno de los laboratorios, se constató la realización de pruebas antes citadas.

**Estas pruebas tienen el propósito de evaluar el nivel de desgaste, degradación o envejecimiento después de los años de operación.**

### 5.2 ESTUDIOS DE CAMPO – MUESTREO DE BALASTO

Se realizaron un total de 53 calas en la capa del balasto.

El Laboratorio LIEC hizo el muestro de los materiales de las 45 calas; mientras que el Laboratorio LANCO realizó el muestreo en 10 calas (de la 35 a la 45) y posteriormente LANCO realizó un muestreo a cada kilómetro en los intertramos de Mexicaltzingo a cola Mixcoac, obteniendo 8 muestras de 8 calas. En el anexo 5.2.1, se observan las fotografías de la ejecución de calas y muestreos de balasto.

### 5.3 EJECUCIÓN DE ENSAYOS

Una vez levantadas las muestras del tramo subterráneo en las calas anteriormente señaladas y bajo un protocolo adecuado de manejo y disposición de las muestras, éstas fueron trasladadas a las respectivas instalaciones de los laboratorios LIEC y LANCO, en donde exhibieron las calibraciones de los equipos a utilizar en los métodos de prueba, se constató la competencia técnica del personal a cargo de la ejecución de las pruebas, así como las verificaciones de los equipos menores.

Se verificó la rastreabilidad de las muestras previo a su ensaye.

Los informes de laboratorio, tablas resúmenes y fotografías de los ensayos se incluyen en el Anexo 5.3.1 “Fotografías de ensayos, informes de pruebas y tabla resumen”.

#### 5.4 PRUEBAS DE PLACA

Atendiendo a las recomendaciones del comité técnico asesor, se realizaron pruebas de placa para determinar la rigidez del relleno grava-arena, las 8 pruebas realizadas se distribuyeron a lo largo de los intertramos subterráneos; las pruebas consisten en aplicar un esfuerzo al suelo y determinar la deformación ocasionada por dicho esfuerzo. La forma de ejecutar estas pruebas es mediante una placa circular de 30.0 cm de diámetro aplicando una fuerza mediante un gato hidráulico. La deformación se mide con micrómetros de una precisión en centésimas de mm, se colocan tres medidores de carátula y se toma la deformación para diferentes niveles de esfuerzo. Posteriormente, se realiza una gráfica de esfuerzo-deformación, donde se pueden calcular diferentes parámetros como el módulo de reacción vertical y módulos de elasticidad y de manera indirecta la resistencia. La ubicación de las pruebas de placa se muestra en el Anexo 6.2.2.1 “Prueba de placa” junto con los resultados individuales de cada una de las pruebas.

## 6. ANÁLISIS Y RESULTADOS

### 6.1 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL REVESTIMIENTO

En recorridos realizados en el tramo subterráneo desde agosto del presente año, no se observó un comportamiento estructural desfavorable que ponga en riesgo el funcionamiento del sistema de transporte ni la seguridad del túnel. Es importante recalcar que, a casi 10 años de funcionamiento, los sismos de gran intensidad que han impactado a la ciudad no han afectado la estructura del túnel.

A la par de los recorridos, se revisaron los documentos que soportan el análisis y diseño del túnel de dovelas de concreto reforzado. Derivado de dicha revisión, el grupo de expertos reiteró que el tramo subterráneo no presenta ningún problema de estabilidad estructural.

Como complemento a lo revisado con el grupo de expertos, se recabó información y se realizaron las revisiones por sismo y salidas de emergencia (temas puntuales surgidos después de los recorridos), las cuales arrojaron resultados favorables para el túnel (ver anexo 2.3 y Anexo 2.4).

## 6.2 CALIDAD DE LOS MATERIALES

### 6.2.1 Balasto

Con base a los análisis de resultados Anexo 5.3.1 “Fotografías de ensayos, informes de pruebas y tabla resumen”, se observa en general un cumplimiento de las especificaciones en relación con la calidad del material; en el caso de la granulometría los valores promedio cumplen con la curva requerida en los valores indicados en los libros naranja “Especificaciones para el proyecto y construcción de líneas del metro de la Ciudad de México Vol.3, apartado 4, calidad de materiales numeral 4.02.01.001” con respecto al balasto colocado.

No obstante que las muestras cumplen, existen al menos tres valores que se acercan a los límites permitidos con el porcentaje de finos y se han podido relacionar con las curvas de radio reducido; Lo anterior puede tener como explicación el efecto previsto y señalado en la memoria de proyecto geométrico de vías induciendo mayor desgaste del riel y del propio balasto por el efecto de la fricción entre las aristas del balasto, asociado por el efecto de la baja compatibilidad entre el material rodante y el trazado geométrico de la vía. Esta condición es propia del trazado geométrico proporcionado por el Proyecto Metro y será motivo de permanente mantenimiento para asegurar la operación y seguridad del sistema.

Adicionalmente, durante los recorridos en el túnel se observaron puntos específicos de desgaste en la geometría del balasto (aristas redondeadas) en zonas localizadas en donde se encuentran las juntas aislantes de la vía, cajas inductivas y los aparatos de cambio de vía; que puede advertirse que es debido a que no se puede realizar una compactación o bateo totalmente efectivo por presencia de instalaciones de señalización o tracción. Para este hallazgo y al derivar de situaciones no relacionadas con la construcción del Tramo Subterráneo de la Línea 12.

Se observaron de igual forma, zonas en donde la vía está descubierta (faltante de balasto) que puede deducirse que se realizó una nivelación de vía, dejándola descubierta, y no se repuso el volumen de balasto para llegar al nivel de proyecto (1 cm por debajo del hongo del riel). Para este hallazgo y al derivar de situaciones no relacionadas con la construcción del Tramo Subterráneo de la Línea 12, se sugiere que se completen los niveles óptimos de material.

### 6.2.2 Relleno de grava-arena

El relleno de grava-arena, que sirve como desplante y nivelación de la capa de balasto, fue sometido a pruebas mecánicas en el sitio para determinar el grado de compactación, su rigidez y capacidad de carga; para ello se realizaron las pruebas de placa que se muestran en el Anexo 6.2.2.1 “Pruebas de placa”.

El promedio de los resultados de compacidad alcanzado fue del 95%, lo cual cumple con lo indicado en el boletín autorizado para su construcción PMDF-11-EST-612000-III-0117-50757-B-00. Las pruebas de placa realizadas para determinar la resistencia del material de relleno de grava-arena, parámetro solicitado por el Comité Técnico Asesor, **arrojaron una resistencia promedio de 11.2kg/cm<sup>2</sup>, valor que supera los 2.0 kg/cm<sup>2</sup> solicitado para garantizar un buen desempeño** como capa de sustento del balasto y el sistema riel-durmiente.

Con objeto de corroborar el nivel de sollicitaciones que induce el tren a la capa de relleno grava-arena, se realizó un análisis de elemento finito, que se muestran en el Anexo 6.2.2.2 “Análisis de esfuerzo-deformación mediante elemento finito”, con éste se determinó que **el nivel de esfuerzo al que está sometida la capa de relleno de grava-arena es del orden de 0.7 kg/cm<sup>2</sup>**, que corresponde a un nivel de esfuerzos menor al valor recomendado por el Comité Técnico Asesor de: 2.0 kg/cm<sup>2</sup> y muy por debajo al valor promedio obtenido de la prueba de placa de **11.2 kg/cm<sup>2</sup>**.

### 6.3 NIVEL FREÁTICO

El nivel freático (NAF) a lo largo del tramo subterráneo, varía de acuerdo la zonificación geotécnica por donde se desarrolla el túnel. En la Zona de Lomas a partir del Km 28+740 y hasta el Km 27+900 (tramo entre la cola de maniobras y el Inter tramo Mixcoac-Insurgentes sur) el nivel de aguas freáticas no aparece o aparece a profundidades entre los 6 y 10 m, hacia el oriente. En la Zona de Transición, el NAF aparece en promedio entre los 3 y 6 m de profundidad que corresponde al tramo entre los cadenamientos 27+900 y 25+320 (Insurgentes Sur – Parque de los venados). Finalmente, en la Zona de Lago, el NAF se detectó a una profundidad de 2.2 m, esto es entre los cadenamientos 25+320 al 17+800 (Parque de los Venados – inter tramo Atlalilco y Culhuacán). En resumen, el Nivel de Aguas Freáticas se encuentra más superficialmente (2.2 m) en la zona oriente. Es decir, en la estación Atlalilco y a partir de la estación Insurgentes Sur al poniente no se detectó o quedaron algunos mantos colgados. En el Anexo 6.3.1 “Perfil Estratigráfico” se muestra la estratigrafía y la posición del Nivel de Aguas Freáticas.

### 6.4 COMPORTAMIENTO DE LA PLATAFORMA DE VÍA

El estudio de comportamiento de la vía está en desarrollo un análisis que permitirá auscultar las condiciones físicas y geométricas de vía del tramo subterráneo cuyos resultados se compartirán en los próximos meses.

El soporte documental de los levantamientos y estudios relacionados con la Sección 6 del presente documento, se puede consultar en Anexo 6.5.1.

## 7. RECOMENDACIONES Y PLAN DE ACCIONES PARA CONSERVACIÓN

A partir de los resultados que hemos descrito en los estudios de este informe y con el objeto de realizar trabajos de conservación a secciones específicas del tramo subterráneo, se plantean las siguientes acciones:

### 7.1 Estructuras

Después de revisar la memoria de cálculo del proyecto y los criterios de diseño de las distintas zonas geotécnicas, y los recorridos de inspección, se concluye que el túnel ha presentado un comportamiento estructural adecuado para el que fue diseñado, que garantiza una condición estructural segura para la operación.

### 7.2 Drenaje y Filtraciones

- a) Mitigación de aportaciones de fuentes externas.- Consiste en la realización de levantamientos físicos que permitan desarrollar una solución (Proyectos ejecutivos) con el efecto de mitigar los flujos o caudales provocados por diversas causas entre ellas fugas de la infraestructura hidráulica de la ciudad, estructuras que conectan con el túnel (salidas de emergencia, galerías de ventilación, subestación de alta tensión estrella SEAT, subestaciones de rectificación, galería de ventilación mayor, lumbreras de construcción sobre la avenida Felix Cuevas) como se indica a continuación:

ZONAS DE ATENCIÓN PRIORITARIA POR APORTES DE AGUA DE FUENTES EXTERNAS				
SITIO O ESTRUCTURA	TRAMO O ESTACIÓN	CADENAMIENTO INICIAL (REFERENCIA EXTERIOR)	CADENAMIENTO FINAL (REFERENCIA EXTERIOR)	OBSERVACIONES
<b>CÁRCAMO SILOS. (19+420.000)</b>	ATLALILCO - MEXICALTZINGO	19+400.000 (ERMITA IZTAPALAPA Y CALLE SUR 125)	19+510.000 (ERMITA IZTAPALAPA Y CALLE TROJES)	EL APORTE EXTERNO SE MANIFIESTA EN EL PARAMENTO NORTE DE ERMITA IZTAPALAPA
<b>SEAT ESTRELLA</b>	ATLALILCO - MEXICALTZINGO	19+560.000 (ERMITA IZTAPALAPA Y CALLE ARNESES)	19+680.000 (ERMITA IZTAPALAPA Y AV. 5)	EL APORTE EXTERNO SE MANIFIESTA EN EL SECTOR SUR DE LA GALERÍA EN SÓTANO DE LA SEAT ESTRELLA.
<b>LUMBRERA CENTENO</b>	ATLALILCO - MEXICALTZINGO	20+300.000 (ERMITA IZTAPALAPA Y CALLE CENTENO)	20+450.000 (ERMITA IZTAPALAPA Y CALLE SUR 109)	EL APORTE EXTERNO SE MANIFIESTA EN LA TRANSICIÓN DE CAJÓN SUBTERRÁNEO A TÚNEL
<b>SR 11 ERMITA</b>	ERMITA – EJE CENTRAL	23+040.000 (DEPRIMIDO CALZ. TLALPAN - ERMITA IZTAPALAPA)	23+060.000 (DEPRIMIDO CALZ. TLALPAN - ERMITA IZTAPALAPA)	EL APORTE EXTERNO SE MANIFIESTA EN GALERÍA DE CABLES COLINDANTE CON LA VIALIDAD SUR DEL DEPRIMIDO.
<b>SALIDA DE EMERGENCIA VERTIZ</b>	EJE CENTRAL – PARQUE DE LOS VENADOS	24+880.000 (VERTIZ Y CALLE DE EMPERADORES)	24+900.000 (VERTIZ Y CALLE DE EMPERADORES)	APORTE EXTERNO POR LLUVIA ENTRADA DIRECTA A ESCOTILLA DE SALIDA DE EMERGENCIA.
<b>SR 12 ERMITA</b>	EJE CENTRAL – PARQUE DE LOS VENADOS	25+200.000 (MUNICIPIO LIBRE Y DIVISIÓN DEL NORTE)	25+500.000 (MUNICIPIO LIBRE Y CALLE IXCATEOPAN)	EL APORTE EXTERNO SE MANIFIESTA EN GALERÍA DE CABLES COLINDANTE CON PARAMENTO NORTE DE MUNICIPIO LIBRE, SE HA OBSERVADO FLUJO DE AGUA CLARA EN COLECTOR AL SUR DE ESTA VIALIDAD.
<b>ESTACIÓN PARQUE DE</b>	ESTACIÓN PARQUE DE LOS VENADOS	25+303.311	25+457.323 (MUNICIPIO LIBRE Y CALLE IXCATEOPAN)	EL APORTE EXTERNO EN LA CABECERA PONIENTE DE LA ESTACIÓN, VISIBLE A TRAVÉS DE LA GALERÍA DE VENTILACIÓN MAYOR.

<b>LOS VENADOS</b>		(MUNICIPIO LIBRE Y CALLE PROLONGACIÓN XOCHICALCO)		
<b>REJILLA DE VENTILACIÓN</b>	20 DE NOVIEMBRE – INSURGENTES SUR	26+960.000 (EXTREMADURA Y CALLE DE JOSÉ BARTOLACHE)	27+100.00 (EXTREMADURA Y CALLE PATRICIO SANZ)	APORTE EXTERNO REJILLA DE VENTILACION A NIVEL DE VIALIDAD, REQUIERE PROTECCIÓN PERIMETRAL O MAYOR PERALTE EN BOMBEO TRANSVERSAL

- b) Desarrollo de los proyectos ejecutivos para la intervención requerida de los puntos del inciso anterior.
- c) Restitución de equipos de bombeo faltante.
- d) Reforzamiento y habilitado de los cárcamos de bombeo en zona de vados de acuerdo al proyecto autorizado que instruya la autoridad correspondiente.
- e) Reparación de fugas de los sistemas de protección contra incendio.
- f) Limpieza y de registros y cárcamos del drenaje.
- g) Tratamientos de impermeabilización y canalización de filtraciones en la estructura del túnel de acuerdo con el procedimiento que instruya la autoridad correspondiente.

### 7.3 Balasto y relleno grava-arena

Con base a los resultados obtenidos relacionados con la durabilidad del balasto después de 10 años, ratificamos que el desempeño es satisfactorio, por lo que no hay razón para su sustitución; salvo las acciones habituales y normadas de mantenimiento y conservación de la vía.

Como parte de las acciones, se recomienda sustituir o cambiar la segunda capa de balasto (próxima a los durmientes que se determinará en el proyecto ejecutivo correspondiente) en las zonas de curvas de radio reducido para prevenir el deterioro del mismo, complementar los volúmenes de balasto faltante, así como realizar el bateo del balasto en las zonas donde se observa deficiencia.

Al respecto de la calidad y el comportamiento mecánico del relleno grava-arena y a los resultados obtenidos de las pruebas de placa, así como los análisis con elemento finito, el material de relleno de grava-arena es competente y se corrobora con la resistencia promedio alcanzada del orden de 11.2 kg/cm<sup>2</sup> que supera ampliamente el valor mínimo recomendado de 2 kg / cm<sup>2</sup>; con esta evidencia no es necesario intervenir esta capa.