



GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO



ESTUDIOS GEOTÉCNICOS ESPECÍFICOS PARA EL REFUERZO Y REHABILITACIÓN DEL TRAMO SUBTERRÁNEO DE LA LÍNEA 12 DEL STC

Dr. Juan Manuel Mayoral Villa
Comité de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12



Elaborado Para:

Gobierno de la Ciudad de México, CDMX

Julio de 2021



RESUMEN

Este informe presenta la evaluación del desempeño esperado a corto y largo plazo de la obra subterránea de la Línea 12 del Metro ante carga sostenida, después de nueve años de servicio, y a la luz del colapso sufrido en una trabe de su parte elevada. Se revisaron cuatro secciones críticas con diferentes características geotécnicas y estructurales en el túnel. Con base en los estudios descritos en este informe se concluye que:

- 1) El túnel presentará un comportamiento satisfactorio ante carga monotónica a corto y largo plazo, siempre y cuando prevalezcan las condiciones piezométricas consideradas en su diseño, ya que los elementos mecánicos en las secciones revisadas se encuentran al límite en los diagramas de interacción con un factor de seguridad de 1.5, por lo que se recomienda el monitoreo periódico de asentamientos en superficie, al interior del túnel, y de la piezometría en las zonas aledañas a esta obra subterránea para prevenir su afectación.
- 2) La colocación de una cubeta estructural o concreto fluido aunque sólo mejora ligeramente el comportamiento estructural del túnel, brindaría un sustento más homogéneo al balasto de la vía, y menos susceptible a deformarse por su interacción con el agua proveniente de las filtraciones del túnel. Más aún, permitirían la instalación de un drenaje más eficiente en las zonas de filtraciones críticas.
- 3) Debe revisarse con calas si hay cubeta estructural en la zona de salidas de emergencia, y de no existir estas colocarlas.
- 4) Debe revisarse el comportamiento sísmico del túnel en las zonas de cambio de rigidez, baja cobertura, o donde la proximidad con edificios altos modifiquen los elementos mecánicos en el sistema de retención del túnel, tal como la sección D analizada en este informe ante carga sostenida.



Es importante mencionar que la compleja interacción entre el túnel y su sistema de contención a largo plazo está gobernada por la consolidación regional, a su vez asociada a la presencia y funcionamiento de pozos profundos para abastecimiento de agua a la ciudad y zona conurbada, y posibles cargas accidentales como los sismos de magnitud importante que se han registrado en la ciudad de México a lo largo de su historia. Las conclusiones presentadas en este informe, se generaron con base en modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas, de las secciones críticas analizadas para simular el comportamiento acoplado del sistema túnel-suelo, incluyendo el efecto de consolidación. Los parámetros geotécnicos y estructurales para análisis se obtuvieron de memorias de cálculo, estratigrafías del subsuelo, y pruebas de laboratorio, proporcionados por la empresa diseñadora Ingenieros Civiles Asociados, ICA. Los modelos numéricos fueron calibrados con base en mediciones tomadas al final de la construcción por la empresa diseñadora Ingenieros Civiles Asociados, ICA, y mediciones de convergencias y divergencias en condiciones actuales, llevadas a cabo por el Colegio de Ingenieros Civiles de México, CICM. Se estimaron esfuerzos y deformaciones en el suelo y el túnel, y los elementos mecánicos correspondientes en el sistema de retención. Las condiciones piezométricas prevalecientes en estas zonas de análisis se establecieron con base en las mediciones de piezometría disponibles al momento de la construcción, proporcionadas por ICA. Es evidente que estas han cambiado en los años de operación de la Línea 12, y estos cambios deben establecerse de acuerdo a mediciones piezométricas actualizadas y revisarse periódicamente. Asimismo, se identificaron tres secciones críticas de filtraciones a lo largo del tramo dovelado que necesitan ser atendidas: 1) Atlalilco, 2) Parque de los venados-Eje Central, y 3) Insurgentes, en donde se identificó la presencia de un manto colgado, a través de inyecciones en la bóveda del túnel, y mejoras en el sistema de drenaje, incluyendo la reparación de registros. En particular en el tramo 1) Atlalilco, se deberán tapar dos cárcamos que quedaron abiertos y desconectados del drenaje durante la construcción.



1.	INTRODUCCIÓN.....	1
2.	OBJETIVOS.....	1
2.1	CONSIDERACIÓN DE LAS RECOMENDACIONES DEL CICM, Y DEL IMT, REFERENTES AL COMPORTAMIENTO DEL TRAMO SUBTERRÁNEO....	2
2.1.1	Instituto Mexicano del Transporte, IMT, Levantamiento de estudios de alta tecnología en el tramo subterráneo (Atlalilco – Mixcoac) de la Línea 12 del sistema de transporte colectivo metro (STCM) de la Ciudad de México, 4 de junio de 2021.	2
2.1.2	Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C., CICM, Informe preliminar correspondiente al dictamen geotécnico – estructural de vulnerabilidad correspondiente al túnel de la Línea 12 del STC-Metro, 17 de junio de 2021.....	4
2.2	RECORRIDOS TÉCNICOS AL SITIO PARA VERIFICAR EL ESTADO ACTUAL DEL TRAMO SUBTERRÁNEO.....	5
2.3	REVISIÓN DE MEMORIAS DE CÁLCULO	28
2.4	REVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL TÚNEL EN CUATRO ZONAS CRÍTICAS, EMPLEANDO MODELOS NUMÉRICOS TRIDIMENSIONALES.....	37
2.4.1	Análisis de la Sección A Pk. 21+150	38
2.4.2	Análisis de la Sección B Pk. 21+800	46
2.4.3	Sección C Pk. 22+400.....	68
2.4.4	Sección D Pk. 27+100.....	89

J



2.5	COMENTARIOS REFERENTES AL MONITOREO DE SECCIONES DEL TÚNEL LLEVADAS A CABO POR EL M.I. FRANCISCO SUAREZ FINO 104	
2.6	ANÁLISIS ANTE CARGA SÍSMICA DEL TÚNEL	113
3.	CONCLUSIONES.....	115
4.	REFERENCIAS.....	117



1. INTRODUCCIÓN

La denominada Línea 12 deberá ser reforzada y rehabilitada para su reapertura segura. El Gobierno de la Ciudad de México, a través de la Jefa de Gobierno, Dra. Claudia Sheinbaum, ha establecido el Comité de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12, integrado alfabéticamente por Sergio Manuel Alcocer Martínez de Castro, Bernardo Gómez Gonzáles, Juan Manuel Mayoral Villa, Raúl Jean Perilliat, Rubén Alfonso Ochoa, y José María Riobóo Martín, su colaboración para llevar a cabo estudios específicos para proponer las mejoras a la obra que garanticen su comportamiento satisfactorio ante cargas permanentes y accidentales. La Línea 12 del Metro está ubicada al suroriente del Valle de México y tiene una longitud total de 28.4 km. Se conforma por 20 estaciones localizadas entre Mixcoac y Tláhuac. La Línea 12 del Metro se proyectó con cuatro soluciones geotécnicas diferentes: túnel profundo, cajón subterráneo, tramo elevado y cajón superficial.

2. OBJETIVOS

Los objetivos de este informe se mencionan a continuación:

- Visitas técnicas al túnel para detectar áreas de oportunidad en el diseño y funcionamiento del tramo subterráneo.
- Revisión de memorias de cálculo y planos “as-built” con el objetivo de verificar las hipótesis de diseño y contar con información para establecer el desempeño del túnel a corto y largo plazos a través de modelos numéricos.
- Analizar el comportamiento estático del túnel mediante modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas, evaluando su desempeño ante carga sostenida tomando en cuenta el efecto de consolidación a largo plazo y la influencia de este en las fuerzas actuantes sobre el revestimiento del túnel. La revisión ante carga sísmica se incluirá en un informe por separado.



2.1 CONSIDERACIÓN DE LAS RECOMENDACIONES DEL CICM, Y DEL IMT, REFERENTES AL COMPORTAMIENTO DEL TRAMO SUBTERRÁNEO

En este apartado se presenta la consideración de las opiniones técnicas emitidas hasta el momento por el Instituto Mexicano del Transporte, IMT, y el Colegio de Ingenieros Civiles de México, CICM (IMT 2021, y el CICM 2021) para el tramo subterráneo de la Línea 12 del STC-Metro. Los documentos de referencia se enlistan a continuación:

1. Instituto Mexicano del Transporte, IMT. Levantamiento de estudios de alta tecnología en el tramo subterráneo (Atlalilco – Mixcoac) de la Línea 12 del sistema de transporte colectivo metro (STCM) de la Ciudad de México, 4 de junio de 2021.
2. Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C., CICM, Informe preliminar correspondiente al dictamen geotécnico – estructural de vulnerabilidad correspondiente al túnel de la Línea 12 del STC-Metro, 17 de junio de 2021.

2.1.1 Instituto Mexicano del Transporte, IMT, Levantamiento de estudios de alta tecnología en el tramo subterráneo (Atlalilco – Mixcoac) de la Línea 12 del sistema de transporte colectivo metro (STCM) de la Ciudad de México, 4 de junio de 2021.

Este documento es de tipo cualitativo y está enfocado en la inspección del tramo subterráneo.

1. La principal problemática expuesta en el documento está relacionada con las filtraciones al interior de las diferentes secciones del tramo subterráneo. Las más importantes se enlistan a continuación.
 - 20+345 zona de transición entre Mexicaltzingo – Atlalilco.



- Entre las estaciones Ermita y Atlalilco se observaron filtraciones con escurrimiento continuo al centro de ambas vías.
 - El tramo que mayor porcentaje de filtraciones presenta es el de Zapata a parque de los Venados, con un 69% del tramo afectado por filtraciones. Después sigue el tramo de Atlalilco - Portal Oriente, con un 58% de afectaciones.
2. Como consecuencia de la presencia de agua al interior del túnel, y debido a que durante la construcción del proyecto se sustituyó la losa falsa, por un sistema de material compactado, similar al empleado en carreteras, se han presentado asentamientos diferenciales de la vía, debido a la acción que el flujo del agua produce sobre el suelo. IMT sustenta esta teoría mediante nueve calas realizadas a lo largo del tramo subterráneo, en las cuales se observó que el material que conformó la superficie de rodamiento se encontraba saturado.
 3. Se reportan agrietamientos de los revestimientos del túnel en los siguientes cadenamientos:
 - Grieta y filtraciones en 28+100, tramo Mixcoac – Insurgentes Sur.
 - Grieta y filtraciones en 27+820, tramo Mixcoac – Insurgentes Sur.
 - Grieta y filtraciones en 27+774, tramo Mixcoac – Insurgentes Sur.
 4. Se muestran curvas de nivel obtenidas en la clave del tramo dovelado, y en la tapa superior del tramo con sección cajón, sin embargo, no se concluye nada sobre el desempeño que el túnel ha tenido con base en esta información.
 5. Se reporta que la separación entre durmientes es mayor a la recomendada, para evitar que la vía trabaje como puente entre durmientes, lo cual genera fatiga del material a largo plazo. Separación recomendada 60 cm, separación in-situ hasta 67 cm.



Comentarios y recomendaciones sobre el documento del IMT

En dicho documento se plantea que es recomendable realizar un mejoramiento de las capas de suelo que conforman la superficie de rodamiento, lo cual es factible, siempre y cuando la solución contemple materiales ultraligeros, que no modifiquen la velocidad de hundimiento del tramo a mejorar. Es recomendable que, las curvas de nivel presentadas sean contrastadas con datos anteriores, para realizar la evaluación del desempeño del tramo subterráneo. Se recomienda reparar las grietas, que podrían estar asociadas a juntas frías o procedimiento constructivo, y monitorearlas para ver su comportamiento con el tiempo.

2.1.2 Colegio de Ingenieros Civiles de México A.C., CICM, Informe preliminar correspondiente al dictamen geotécnico – estructural de vulnerabilidad correspondiente al túnel de la Línea 12 del STC-Metro, 17 de junio de 2021.

El documento emitido por el M. I. José Francisco Suarez Fino, se enfoca en la inspección del tramo subterráneo.

1. Se monitoreó el movimiento relativo en ocho estaciones de medición en el interior del túnel. Por interacción directa con el Ing. Suarez se le solicitó agregar un punto de control para complementar la revisión presentada en este documento, y proporcionar la medición de convergencias y divergencias en las secciones transversales en los cadenamientos instrumentados. El Ing. Suarez indica que es conveniente que se investigue sobre el impacto que las filtraciones han tenido a lo largo de 10 años sobre la vida útil del revestimiento, por ejemplo se podrían realizar pruebas de cloruros sobre el concreto del revestimiento, para comprobar el impacto han tenido, asimismo recomienda realizar lecturas de comprobación en los inclinómetros,



extensómetros y piezómetros instalados durante la construcción del túnel, para verificar hipótesis de diseño.

Comentarios y recomendaciones sobre el documento emitido por el CICM.

Se está de acuerdo con realizar modelos numéricos tridimensionales de las secciones críticas instrumentadas, calibrándolos con la información del monitoreo topográfico. Estos son los presentados en este informe. Estos modelos, permitieron evaluar el desempeño del túnel a largo plazo ante carga monotónica, considerando el efecto de la consolidación regional.

2.2 RECORRIDOS TÉCNICOS AL SITIO PARA VERIFICAR EL ESTADO ACTUAL DEL TRAMO SUBTERRÁNEO

En este apartado se presentan los comentarios y recomendaciones, derivados de las visitas técnicas, al tramo subterráneo de la Línea 12 del STC-Metro, en especial en el tramo comprendido entre la estación “Parque de los Venados” y la estación “Atlalilco”. En dicho tramo la solución implementada para la conformación del túnel consistió en la excavación mediante escudo y la utilización de dovelas prefabricadas como revestimiento primario, el cual funge como revestimiento único en la mayor parte de tramo, específicamente desde el cadenamiento 22+900 hasta el 27+390. Los objetivos principales de la visita consistieron en identificar aquellas problemáticas relacionadas con la presencia de agua en el túnel, como lo son: 1) filtraciones a través del revestimiento (lo cual indica un deterioro prematuro del sello impermeable que se colocó de proyectó en todo el tramo dovelado), 2) el funcionamiento inadecuado del sistema de drenaje del túnel (cárcamos y registros), y 3) acumulación de cantidades importantes de agua en algunos puntos del túnel. Como resultado del recorrido realizado, se derivan las siguientes observaciones y recomendaciones.

Filtraciones y presencia de humedad

En el tramo comprendido entre las estaciones Parque de los Venados, Eje Central, y Ermita, se observó la mayor cantidad de filtraciones hacia el interior del túnel, lo cual evidencia el deterioro prematuro del sistema de impermeabilización colocado en esta zona del proyecto. Incluso en algunas zonas se observó goteo continuo, lo que ha generado la acumulación de sales sobre las dovelas, instalaciones electromecánicas, balasto y durmientes. En las Fotografías 1 a 9 se presentan ejemplos de estas observaciones.



Fotografía 1. Filtraciones observadas en el cadenamiento 25+180.

Debido a la configuración que tiene la formación de sales puede concluirse que estas filtraciones tienen al menos 1 año de existencia, la presencia de agua en esta zona reduce la vida útil del revestimiento, daña las instalaciones de la zona y evidencia un comportamiento inadecuado del sistema de impermeabilización, y a largo plazo puede generar la erosión de las partículas finas que conforman la terracería sobre la cual se desplantan el balasto.



2

Fotografía 2. Daños causados por filtraciones, se observa la acumulación de sales sobre un durmiente a la altura del cadenamiento 24+500.



Fotografía 3. Daños causados por filtraciones, se observa la generación de sulfatos sobre el balasto, lo cual indica la presencia constante de agua en esta zona.



2

Fotografía 4. Presencia de filtraciones a la altura del cadenamiento 25+245

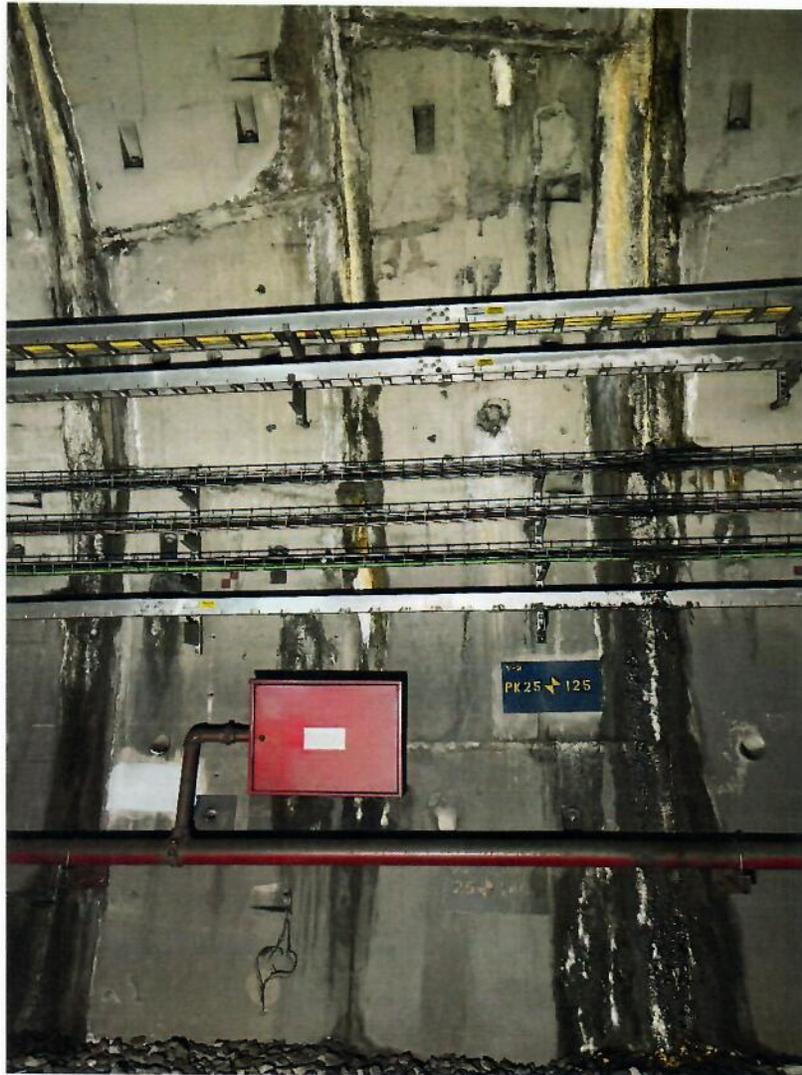


Fotografía 5. Filtraciones entre juntas a la altura del cadenamiento 24+972.



2

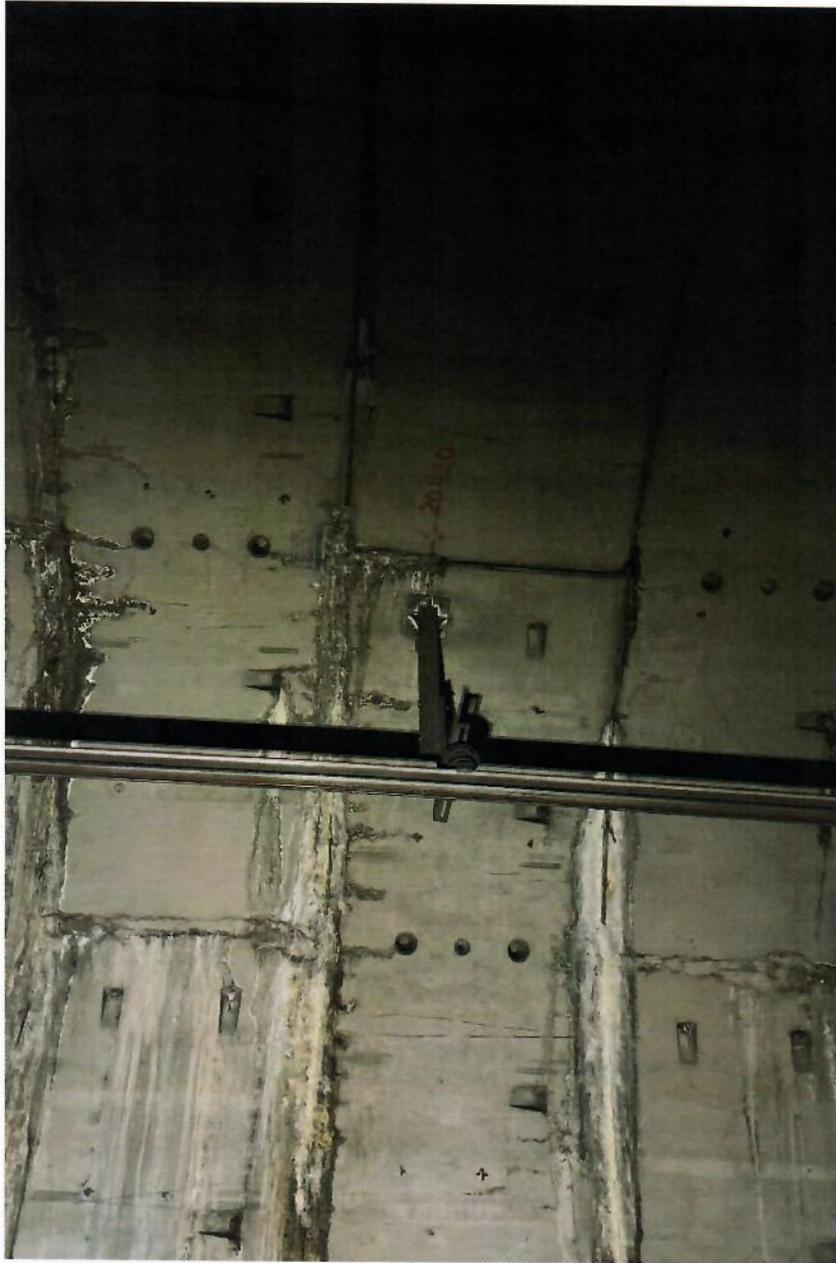
Fotografía 6. Filtraciones a la altura del cadenamiento 25+090. Se observa que la presencia de filtraciones en esta zona está dañando las instalaciones electromecánicas.



Fotografía 7. Filtraciones entre junta a la altura del cadenamiento 25+125.



Fotografía 8. Filtraciones entre juntas a la altura del cadenamiento 25+140.



J

Fotografía 9. Filtraciones a la altura del cadenamiento 20+120 en zona de catenaria.



Debido a que el funcionamiento del sistema hidráulico del túnel se rige por gravedad, con base en la pendiente que tiene el trazo del túnel, los cárcamos deberían ubicarse en las partes más bajas trazo, sin embargo, esta condición no se cumple, particularmente el cárcamo ubicado en el cadenamiento 24+880, no se encuentra en el punto más bajo de la zona, por lo que su funcionamiento es cuestionable, debido a que los tirantes observados en el mismo son muy bajos, en comparación con su capacidad de captación, como solución temporal a esta problemática se instaló una bomba al interior de un registro ubicado en el cadenamiento 24+470, a una distancia de 410 m del cárcamo de bombeo. La solución temporal aplicada para atender esa problemática tiene dos limitaciones importantes, la primera de ellas radica en que la capacidad del registro que está captando el agua que debería recibir el cárcamo es de aproximadamente 0.85 m^3 , mientras que la capacidad total del cárcamo es de aproximadamente 1000 m^3 . La segunda área de oportunidad radica en que la bomba instalada para desalojar el agua acumulada necesita tirantes de agua mayores a 0.75 m para iniciar operaciones, con lo cual las tuberías ubicadas aguas arriba se encuentran siempre trabajando como tubo lleno, en caso de que las tuberías tengan imperfecciones que filtren agua hacia la terracería, esta condición potencializa el deterioro de la misma. Finalmente, se observa que la configuración de las tuberías colocadas en el registro que comunica el sistema hidráulico del túnel con el cárcamo ubicado en el cadenamiento 24+880, no es adecuado, pues el tubo que comunica al registro con el cárcamo tiene una elevación mayor a la que presentan los tubos del sistema hidráulico. En las Fotografías 10 a 16 se describe la problemática expuesta.



Fotografía 10. Agrietamiento en la paredes y azolve de materiales al fondo del registro de drenaje ubicado a la altura del cadenamiento 25+175.



J

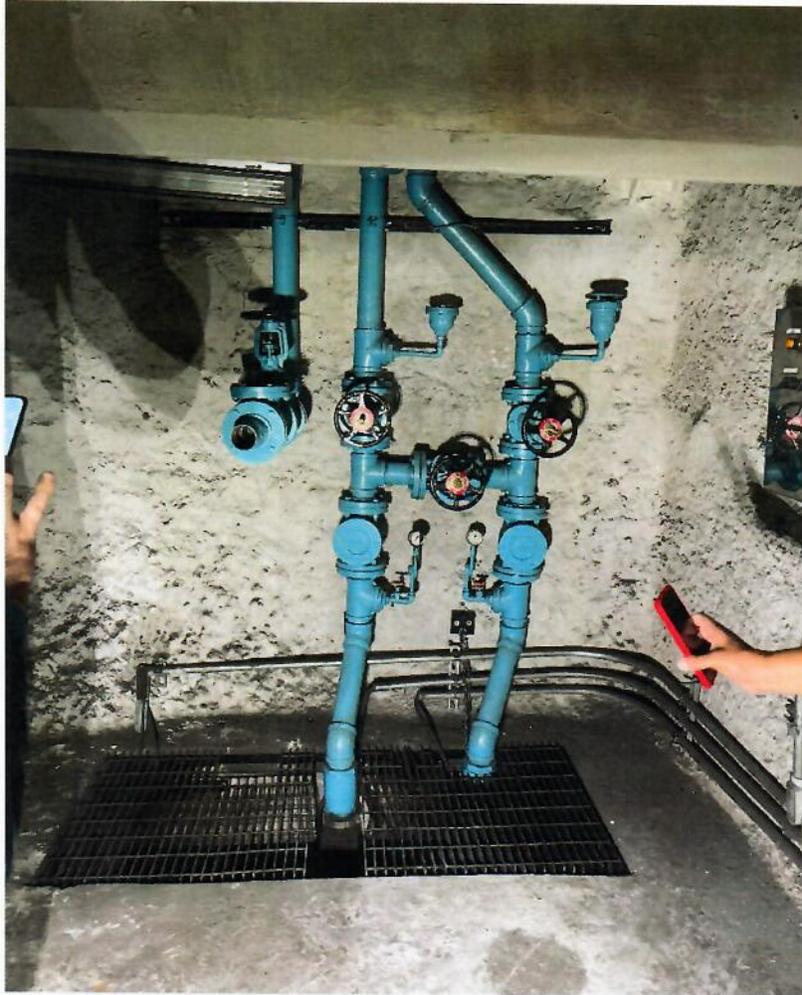
Fotografía 11. Disposición inadecuada de las tuberías ubicadas en el registro que comunica el sistema hidráulico del túnel con el cárcamo de bombeo.



Fotografía 12. Bomba de achique instalada en el cadenamiento 24+470. Puede observarse que las tuberías se encuentran llenas y la bomba aún no estaba operando.



Fotografía 13. Estado actual del cárcamo de bombeo ubicado en el cadenamiento
24+880.



Fotografía 14. Estado actual del cárcamo de bombeo ubicado en el cadenamiento 24+880. Pese a los tirantes existentes en algunos tramos del túnel, las bombas del cárcamo no estaban operando debido a su bajo nivel hidráulico.



Fotografía 15. Daños estructurales en las paredes del registro ubicado en el encadenamiento 25+180. A largo plazo, la pared del registro fallará y el balasto obstruirá el sistema hidráulico.

J

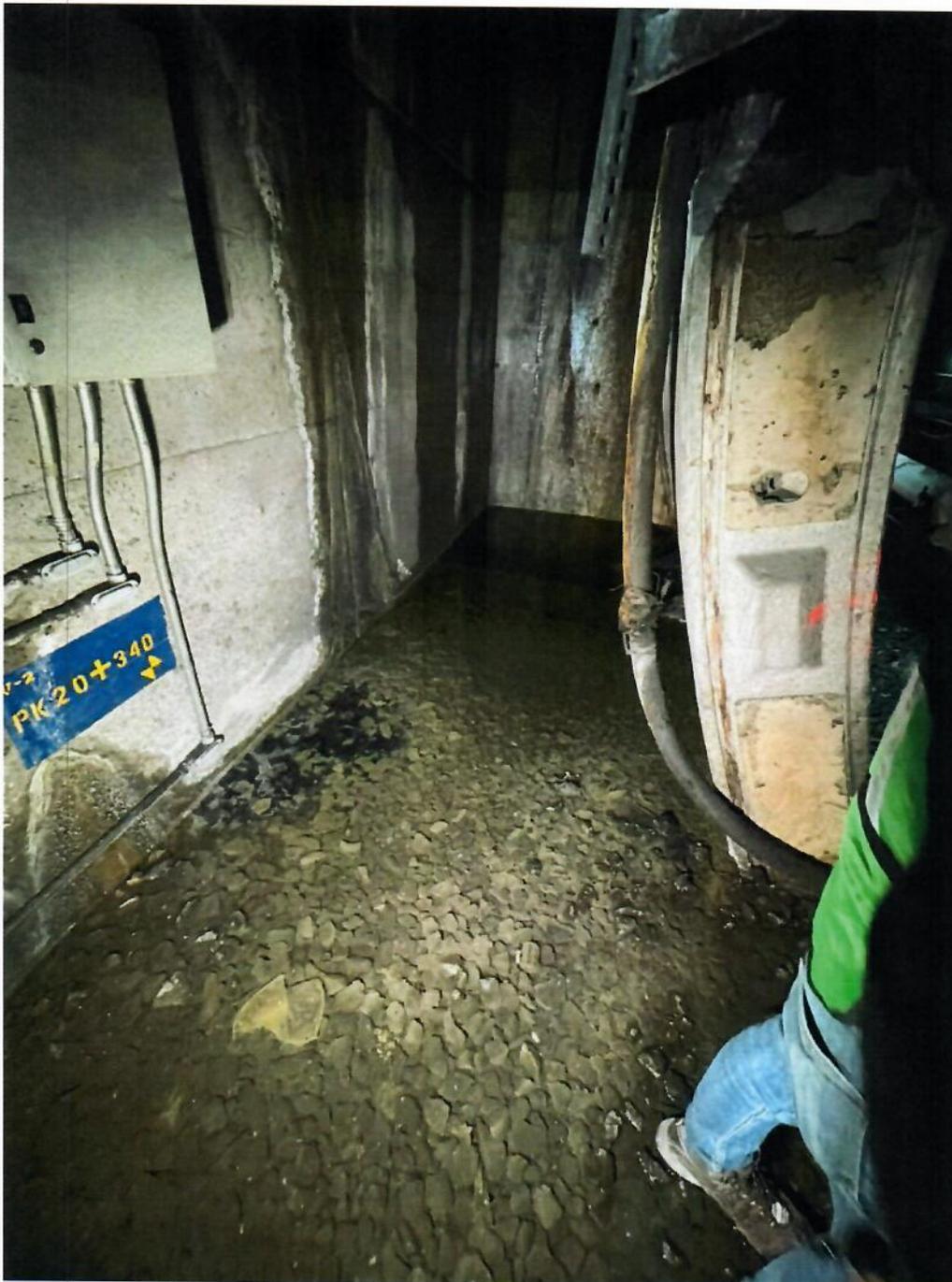


Fotografía 16. Falla estructural en las paredes del registro ubicado en el encadenamiento 20+400.



Estancamiento de agua.

Por último, se realizó la visita a un punto crítico ubicado en una zona de transición de sección con túnel a sección en cajón, a la altura del cadenamiento 20+345, donde existe un estancamiento de agua bastante importante en las partes laterales de la vía. Tal estancamiento se debe a la existencia de dos fosas o cárcamos que tuvieron utilidad durante la construcción del tramo, sin embargo, estos se dejaron descubiertos y sin salida hidráulica, por lo que actualmente el agua se encuentra rebosando hacia el balasto. A pesar de que en esta zona fue colocada la cubeta estructural, es importante reiterar que el balasto descansa sobre una terracería de 40 cm de espesor que se puede ver fuertemente afectada por la presencia de agua en esta zona. Personal del STC, comenta que las filtraciones se han observado de manera continua, con el mismo gasto desde el inicio de operaciones, por lo que su origen podría deberse a tuberías dañadas en superficie. Debido a lo anterior es necesario documentar de manera detallada la información de los colectores en la zona, y realizar pruebas al agua de la zona para determinar su origen. En las Fotografías 17 a 22 se ilustra la problemática descrita.



2

Fotografía 17. Acumulación de agua en fosa lateral derecha al túnel a la altura del cadenamiento 20+340, se observa un constante escurrimiento de agua en las paredes del cajón.



J

Fotografía 18. Erosión en el balasto de la vía y en el bordillo perimetral provocado por el constante flujo que ha tenido el agua hacia el interior del túnel.



J

Fotografía 19. Acumulación de agua en fosa lateral izquierda al túnel a la altura del cadenamiento 20+340, se observa un constante escurrimiento de agua en las paredes del cajón.

Degradación del concreto de revestimiento

Se observó degradación del concreto que conforma la pared estructural del tramo en cajón, ubicado en el cadenamiento 19+820. El daño observado en esta zona está relacionado con la presencia de filtraciones que a lo largo del tiempo han degradado el concreto. Es recomendable realizar la escarificación de la pared para determinar hasta donde se extiende la degradación del concreto, y verificar el estado actual del acero estructural. En las Fotografías 20 y 21 se presenta la problemática expuesta anteriormente.



Fotografía 20. Estado actual del túnel en el cadenamiento 19+820.



2

Fotografía 21. Degradación del concreto

Comentarios y recomendaciones

1. Debido a que el sistema de impermeabilización del tramo dovelado está teniendo un desempeño comprometido, es recomendable contar con alguna alternativa que evite las filtraciones al interior del túnel debido a que estas pueden disminuir la vida útil de los materiales, aumentar los costos anuales de mantenimiento, y dañar las instalaciones del STC.
2. Tomando en cuenta el desempeño deficiente del sistema hidráulico, es recomendable presentar alternativas que descarten la aparición de problemas a largo plazo relacionadas con el mal desempeño de este sistema.
3. Debe implementarse un sistema de desalojo de agua para los dos cárcamos que se encuentran rebosando a la altura del cadenamamiento 20+340.
4. Todos los registros con daño estructural deben repararse.



5. Es recomendable implementar un sistema de bombeo que trabaje en rangos de tirantes de agua menores, para garantizar un flujo constante en el sistema hidráulico, y con ello evitar azolves.

2.3 REVISIÓN DE MEMORIAS DE CÁLCULO

En este apartado se presentan los comentarios y recomendaciones derivados de la revisión a las memorias de cálculo, planos de proyecto y as-built, del tramo subterráneo de la Línea 12 del metro, la cual se llevó a cabo para la selección de parámetros geotécnicos y estructurales a considerar en los modelos numéricos desarrollados para la revisión del desempeño del túnel a corto y largo plazos. A continuación, se enlistan los documentos proporcionados para esta revisión:

- PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00
- PMDF-09-EST-612000-III-0020-04761-M-00
- PMDF-09-MS-612000-III-0031-02483-M-00a
- PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00
- PMDF-11-MS-612000-III-0094-10394-M-00
- PMDF-10-EST-612000-III-0035-05411-M-00
- PMDF-10-MS-612235-III-0076-06031-M
- PMDF-11-EST-612000-III-0095-10395-M-00
- PMDF-11-MS-612000-III-0096-10396-M-00
- PMDF-10-EST-612000-III-0066-05445-M-00
- PMDF-10-EST-612000-III-0051-05426-M-00
- PMDF-11-EST-612000-III-0083-51683-M-00
- PMDF-11-EST-612000-III-0013-50678-M-00
- PMDF-11-EST-612000-III-0015-50680-M-00
- PMDF-10-EST-612000-III-0061-05439-M-00
- PMDF-10-MS-612000-III-0116-06067-M-01
- PMDF-11-EST-612000-III-0076-05459-M-00
- PMDF-09-EST-612000-II-0025-00000-M-A
- PMDF-09-MS-612000-III-0037-03270-D-00
- PMDF-11-MS-612255-III-0272-06214-P-00
- PMDF-11-MS-612255-III-0288-51430-M-00
- PMDF-12-EST-612255-IV-0044-06944-P-AB
- PMDF-12-EST-612255-IV-0045-06945-P-AB
- PMDF-12-MS-612255-III-0318-05474-B-00
- PMDF-11-EST-612000-III-0050-06950-M-00
- PMDF-11-EST-612245-III-0002-06902-P-00



- PMDF-11-MS-612245-III-0228-06171-P-01
- PMDF-11-MS-612245-III-0283-51425-M-01
- PMDF-11-MS-612245-III-0345-53883-M-00
- PMDF-12-EST-612245-IV-0002-06902-P-AB
- PMDF-12-MS-612245-III-0320-05476-B-01
- PMDF-11-EST-612000-III-0050-06950-M-00

En la Tabla 2.3.1 se presentan los comentarios derivados de la revisión de memorias de cálculo, contrastados con lo incluido en planos “as-built”, donde se encontraron inconsistencias entre la solución de sostenimiento del proyecto y lo construido.



Tabla 2.3.1. Resumen de la revisión de la información proporcionada por ICA del túnel dovelado al 21 de julio del 2021

Cadenamiento (km)	Tramo	Documento / Riesgo de proyecto	Consolidación	Indicaciones de proyecto	Plano AB	Mejoras Para cumplir con proyecto	
20+362 21+851	Mexicaltzingo Atlixco	1.- PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00 20+362 al 21+851 2.- PMDF-09-EST-612000-III-0020-04761-M-00 20+362 al 21+700 3.- PMDF-09-MS-612000-III-0031-02483-M-00a 20+347 al 21+700 4.- PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00 20+362 al 21+851 5.- PMDF-11-MS-612000-III-0094-10394-M-00. 21+300 al 21+800 Este documento tiene como objetivo determinar zonas en las cuales es necesario el secundario, concluyendo que debe colocarse la Cubeta Estructural. El periodo de revisión es para 25 años.	Rige consolidación NAF 2.8 m 21+150 5.2 cm/año 21+800 3.1 cm/año 22+400 2.0 cm/año	1.- C.E y R.S 2.- C.E y R.S 3.- Mejoramientos del suelo en caso de tener un desempeño deficiente, y realizar monitoreo para verificar hipótesis de diseño a largo plazo. También indica riesgo de ovalización por consolidación. La consolidación puede generar cargas inadmisibles para el túnel. Posible apertura de juntas debido a los asentamientos diferenciales. 4.- C.E y R.S, A.- IIUNAM recomendó secundario para buen comportamiento a largo plazo en este tramo 5.- Memoria geotécnica indica que sin cubeta tendrá condiciones inaceptables por deformaciones y elementos mecánicos a largo plazo. Además, este documento indica que se realizará la revisión sísmica del tramo y los cálculos no se llevan a cabo	R.S Aclarar si se tiene C.E	20+362 21+040	Agregar C.E
					C.E R.S	21+040 21+300	OK (S-A 21+150)

C.E Cubeta Estructural
R.S Revestimiento Secundario
S.D Solo Dovelas



Tabla 2.3.1. Resumen de la revisión de la información proporcionada por ICA del túnel dovelado al 21 de julio del 2021 (continuación)

Cadenamiento (km)	Tramo	Documento / Riesgo de proyecto	Consolidación	Indicaciones de proyecto	Plano AB	Mejoras Para cumplir con proyecto
21+820 22+900	Ermita Mexicaltzin go	1.- PMDF-10-EST-612000-III-0035-05411-M-00 21+820 al 22+900	Rige consolidación	1.- C.E y R.S El documento indica que el modelo y análisis realizado considera la presencia de cubeta estructural. Sin embargo, en la conclusión se establece que el revestimiento único de dovelas es suficiente, sin sustento de cálculo.	C.E	OK
		2.- PMDF-10-MS-612235-III-0076-06031-M 21+820 al 22+900.		22+400		
		3.- PMDF-11-EST-612000-III-0095-10395-M-00 21+800 al 22+900		S.D		
		4.- PMDF-11-MS-612000-III-0096-10396-M-00 21+800 al 22+900		22+400 0	Agregar C.E.	
		5.- PMDF-10-EST-612000-III-0066-05445-M-00 21+851 al 22+900		22+900 0	(S.C. 22+400)	

C.E Cubeta Estructural
R.S Revestimiento Secundario
S.D Solo Dovelas

Tabla 2.3.1. Resumen de la revisión de la información proporcionada por ICA del túnel dovelado al 21 de julio del 2021
(continuación)

Cadenamiento (km)	Tramo	Documento / Riesgo de proyecto	Consolidación	Indicaciones de proyecto	Plano AB	Mejoras Para cumplir con proyecto
22+900 24+900	Eje Central Ermita	1.- PMDF-10-EST-612000-III-0051-05426-M-00 22+900 al 24+900 2.-PMDF-11-EST-612000-III-0083-51683-M-00 23+900 al 24+900 3.- PARAM_ GEOT _TUNEL_ Z_D_L_12_ (30_MARZ_10) (ZH4) 4.- PMDF-11-EST-612000-III-0013-50678-M-00 22+900 al 23+530 5.-PMDF-11-EST-612000-III-0015-50680-M-00 23+530 al 23+900	Rige consolidación NAF 3.0 m	1.- El documento indica que el modelo y análisis realizado considera la presencia de cubeta estructural. Sin embargo, en la conclusión se establece que el revestimiento único de dovelas es suficiente, sin sustento de cálculo. 2.- El documento PMDF-11-EST-612000-III-0083-51683-M-00, reemplaza al documento, PMDF-10-EST-612000-III-0051-05426-M-00, solo para el tramo 23+900 al 24+900. 3.- Memoria geotécnica recomienda realizar monitoreo para verificar hipótesis de diseño a largo plazo. 4.- C.N.E El documento PMDF-11-EST-612000-III-0083-51683-M-00, reemplaza al documento, PMDF-10-EST-612000-III-0051-05426-M-00, solo para el tramo 23+900 al 24+900. 5.- C.N.E El documento PMDF-11-EST-612000-III-0083-51683-M-00, reemplaza al documento, PMDF-10-EST-612000-III-0051-05426-M-00, solo para el tramo 23+900 al 24+900.	S.D 22+900 23+900	Agregar C.E
					S.D 23+900 24+900	ok

C.E Cubeta Estructural
R.S Revestimiento Secundario
S.D Solo Dovelas



Tabla 2.3.1. Resumen de la revisión de la información proporcionada por ICA del túnel dovelado al 21 de julio del 2021 (continuación)

Cadenamiento (km)	Tramo	Documento / Riesgo de proyecto	Consolidación	Indicaciones de proyecto	Plano AB	Mejoras Para cumplir con proyecto
24+900 26+775	20 noviembre Zapata P. Venados	1.- PMDF-10-EST-612000-III-0061-05439-M-00 Dovelas especiales con un refuerzo estructural para evitar agrietamientos. 2.- PMDF-10-MS-612000-III-0116-06067-M-01 3.- PMDF-11-EST-612000-III-0076-05459-M-00 25+305 al 26+774	No	1.- S.D 1. El documento indica que el modelo y análisis realizado considera la presencia de cubeta estructural. Sin embargo, en la conclusión se establece que el revestimiento único de dovelas es suficiente, sin sustento de cálculo.	S.D 24+900 26+775	Agregar C.E

C.E Cubeta Estructural
R.S Revestimiento Secundario
S.D Solo Dovelas



Tabla 2.3.1. Resumen de la revisión de la información proporcionada por ICA del túnel dovelado al 21 de julio del 2021 (continuación)

Cadenamiento (km)	Tramo	Documento / Riesgo de proyecto	Consolidación	Indicaciones de proyecto	Plano AB	Mejoras Para cumplir con proyecto
26+771 28+070	Mixcoacs Insurgentes 20 noviembre	D12.- PMDF-09-EST-612000-II-0025-00000-M-A DD-4.- PMDF-09-MS-612000-III-0037-03270-D-00	No Zona I y II Túnel sobre toba	S.D Solo Dovelas Se recomienda realizar monitoreo para verificar hipótesis de diseño a largo plazo.	S.D 26+771 1 28+070 0	OK, Inyectar si hay tema de asentamientos de via por filtraciones del manto colgado (26 +700 al 27+100)

C.E Cubeta Estructural
R.S Revestimiento Secundario
S.D Solo Dovelas

Tabla 2.3.1. Resumen de la revisión de la información proporcionada por ICA del túnel dovelado al 21 de julio del 2021 (continuación)

Cadenamiento (km)	Tramo	Documento / Riesgo de proyecto	Consolidación	Indicaciones de proyecto	Plano AB	Mejoras Para cumplir con proyecto	
24+850 (túnel de conexión)	Eje central P. Venados	<ol style="list-style-type: none"> 1.- PMDF-11-MS-612255-III-0272-06214-P-00 2.- PMDF-11-MS-612255-III-0288-51430-M-00. 3.- PMDF-12-EST-612255-IV-0044-06944-P-AB. 4.- PMDF-12-EST-612255-IV-0045-06945-P-AB. 5.- PMDF-12-MS-612255-III-0318-05474-B-00. 6.- PMDF-11-EST-612000-III-0050-06950-M-00 <p>Se solicita memoria de cálculo para el túnel dovelado en esta conexión.</p>	Rige consolidación	<ol style="list-style-type: none"> 1.- Plano indica que el túnel deberá contar con revestimiento definitivo y cubeta estructural. 2.- En el documento se solicita la revisión a largo plazo del sistema túnel principal – túnel de conexión, esquemas presentados consideran cubeta y secundario. 3.- Plano AB, indica cubeta estructural, corroborar en campo mediante cala en balasto. 4.- Plano AB, ya no indica cubeta e indica la colocación de anclas sobre las dovelas, información de planos AB no es coincidente. 5.- Boletín muestra esquemas con revestimiento secundario, cubeta y trabe de borde. 6.- La memoria de cálculo general para la conexión, considera la colocación de cubeta estructural 	S.D	24+850	Revisar si se cuenta con C.E, y adicionar si no tiene

C.E Cubeta Estructural
R.S Revestimiento Secundario
S.D Solo Dovelas



Tabla 2.3.1. Resumen de la revisión de la información proporcionada por ICA del túnel dovelado al 21 de julio del 2021 (continuación)

Cadenamiento (km)	Tramo	Documento / Riesgo de proyecto	Consolidación	Indicaciones de proyecto	Plano AB	Mejoras Para cumplir con proyecto
23+353 (túnel de conexión)	Ermita Eje central	1.- PMDF-11-EST-612245-III-0002-06902-P-00. 2.- PMDF-11-MS-612245-III-0228-06171-P-01. 3.- PMDF-11-MS-612245-III-0283-51425-M-01 3.- PMDF-11-MS-612245-III-0345-53883-M-00. 4.- PMDF-12-EST-612245-IV-0002-06902-P-AB. 5.- PMDF-12-MS-612245-III-0320-05476-B-01 6.- PMDF-11-EST-612000-III-0050-06950-M-00 Se solicita memoria de cálculo para el túnel dovelado en esta conexión.	Rige consolidación	1.- Se indica cubeta no estructural de menor altura (1.1 m), y anclas sobre las dovelas ubicadas en el perímetro del túnel de conexión. 2.- Plano indica que el túnel deberá contar con revestimiento definitivo y cubeta estructural. 3.- Documento muestra la colocación de revestimiento secundario y cubeta estructural, 3.- Evalúa cargas sobre el túnel, no concluye nada sobre el comportamiento del túnel, indica que las cargas serán empleadas en memoria estructural. 4.- Plano AB, no indica cubeta e indica la colocación de anclas sobre las dovelas. 5.- Boletín muestra esquemas con revestimiento secundario, cubeta y trabe de borde. 6.- La memoria de cálculo general para la conexión, considera la colocación de cubeta estructural	S.D	Revisar si se cuenta con C.E, y adicionar si no tiene

C.E Cubeta Estructural
 R.S Revestimiento Secundario
 S.D Solo Dovelas



2.4 REVISIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL TÚNEL EN CUATRO ZONAS CRÍTICAS, EMPLEANDO MODELOS NUMÉRICOS TRIDIMENSIONALES

En este apartado se presenta la revisión del comportamiento del túnel en cuatro zonas críticas, empleando modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas, considerando las condiciones encontradas durante la construcción, comparándolas con las que prevalecen actualmente para establecer la pertinencia del comportamiento del túnel, ante condiciones de carga estática (i.e. sostenida), y de esta forma asegurar un desempeño adecuado a largo plazo. Se seleccionaron cuatro zonas de análisis, mismas que se presentan en la Figura 2.4.1. Asimismo, en la Tabla 2.4.1. se presenta el cadenamiento y características de cada zona analizada. Es importante mencionar que la parte subterránea de la denominada Línea 12, atraviesa por las tres zonas geotécnicas prevalecientes en la Ciudad de México, y área conurbada (i.e. lago, transición, y lomas). Asimismo, las arcillas de la ciudad de México están sujetas a la consolidación regional, asociada a la extracción de agua del subsuelo, y esta urbe se encuentra en una zona altamente sísmica.



Figura 2.4.1. Ubicación de los túneles tramos analizados.



Tabla 2.4.1. Túnel tramo analizado

No.	Tramo	Cadenamiento, km	Observaciones
A	Mexicaltzingo – Ermita	21+150	Zona geotécnicamente desfavorable, cobertura 7.5 m, reporte de filtraciones al interior del túnel, y asentamientos máximos durante la construcción (50 mm).
B	Eje Central – Ermita	21+800	Zona de túnel con dovelas, ubicada a 140m de una zona de gran filtración de agua y gran humedad en todo el perímetro de la sección
C	Mexicaltzingo – Ermita Dovelas	22+400	Zona del túnel con revestimiento único de dovelas y terracería
D	20 noviembre – Insurgentes	27+100	Zona del túnel con revestimiento único de dovelas y terracería

J

2.4.1 Análisis de la Sección A Pk. 21+150

La caracterización de las condiciones geotécnicas de la sección A, se realizó con base en la información de campo y laboratorio proporcionada por ICA. La Figura 2.4.2 presenta el perfil de suelo, la distribución pesos volumétricos, la resistencia al corte, y el número de golpes de la prueba de penetración estándar, SPT, en función de la profundidad, incluyendo la descripción de cada estrato para las secciones de análisis.

En el perfil estratigráfico detallado de la sección A (Figura 2.4.2) se puede apreciar que existe un relleno superficial de 1.4 m de espesor. Por debajo de este estrato y hasta los 19 m de profundidad se encuentra una capa de arcilla muy blanda con contenidos de agua que varían en un rango de 25 a 450 % e índices de plasticidad comprendidos entre 25 y 390 %. La resistencia al corte no drenada, s_u , de esta arcilla se encuentra entre 5 y 40 kPa. A partir de los 19 m y hasta los 29 m de profundidad, se tiene un estrato de arcilla consistente (s_u entre 55 y 80 kPa). El

contenido de agua de este estrato varía en un rango de 10 a 220 %. Por debajo de este estrato y hasta la máxima profundidad explorada (50 m) se encontraron arenas arcillosas muy densas con número de golpes del SPT mayores a 60. En la Tabla 2.4.2 se presentan las propiedades mecánicas de resistencia y deformabilidad para la zona en estudio.

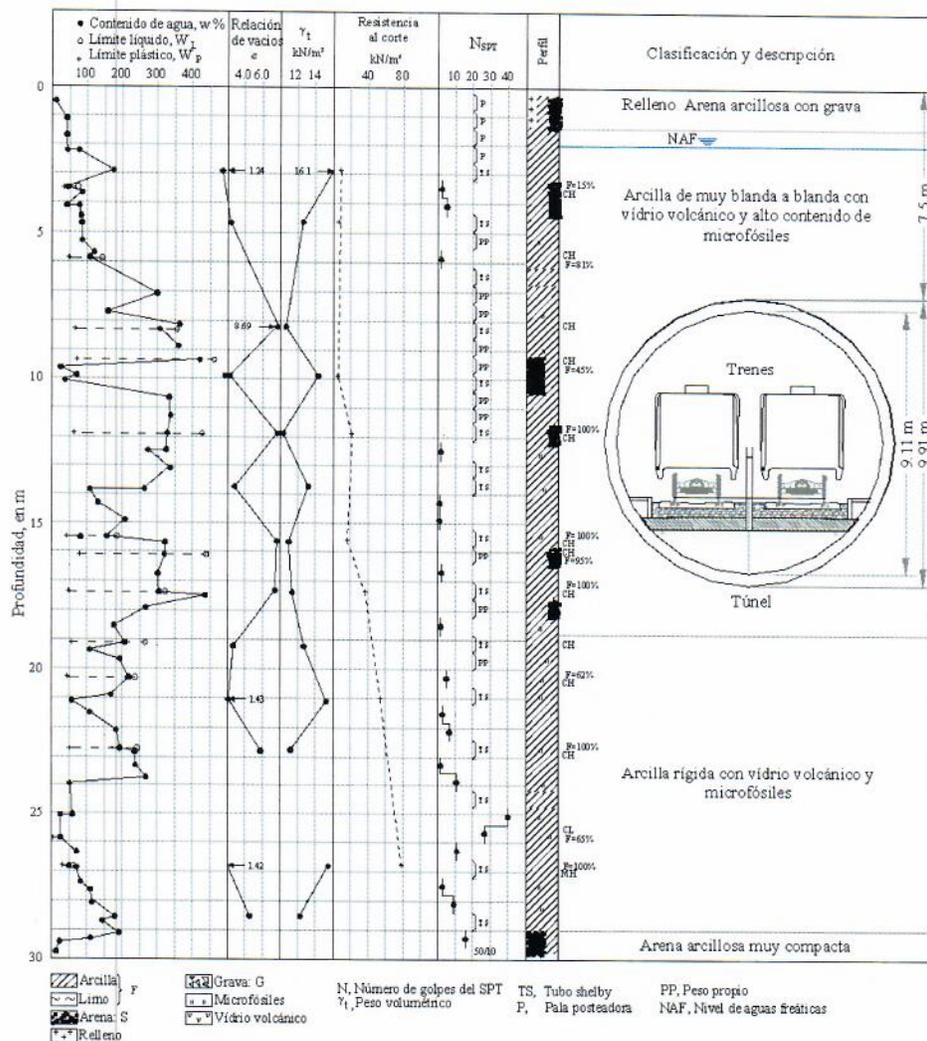


Figura 2.4.2. Perfil de suelo de la sección A.



Tabla 2.4.2. Propiedades mecánicas de resistencia y deformabilidad para la zona en estudio

Profundidad [m]	Límites de Atterberg			Peso volumétrico γ [t/m ³]	Prueba triaxial UU		Resistencia a la compresión simple q_u [kPa]	Relación de vacíos, e	w %	G_s -	E [kPa]
	w_L %	w_P %	IP		c_u [kPa]	ϕ [°]					
1.75							41	1.35	120	2.54	3532
4.43	80	40	40				47	2.1	80	2.45	1668
8.18	350	55	295	10.6	32	0	22	8.69	97	2.23	2256
9.94				14.0			41	2.21	212	2.67	785
11.89	450	75	375	10.4	42	4	53	8.66	232	2.25	3257
13.76				13.0	42	4	114	2.78	259	2.47	5003
15.65	200	50	150	12.7	57	2	87	4.48	132	2.4	6063
17.34	310	50	260	11.1	49	8	176	7.28	147	2.38	5199
19.39	260	60	200	12.5	13	7	76	2.88	271	2.33	17168
21.06				15.2			108	1.4	179	2.42	4169
22.79	250	50	200	11.1	88	7	134	5.91	81	2.3	13371
26.81	60	40	20	14.4	163	13	192	1.62	23	2.45	14323
28.77				12.8	80	13	381	2.88	36	2.48	13763

- w_L : Límite líquido
- w_P : Límite plástico
- IP: Índice de plasticidad
- ϕ : Ángulo de fricción interna
- w: Contenido de agua
- G_s : Densidad de sólidos
- E: Módulo de elasticidad

La sección transversal del túnel construida en la zona A se presenta en la Figura 2.4.3. (PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00), misma que consiste en una sección circular de 9.91 m de diámetro, y un recubrimiento a base de dovelas prefabricadas y cubeta estructural. Esta sección fue considerada para el modelado numérico.

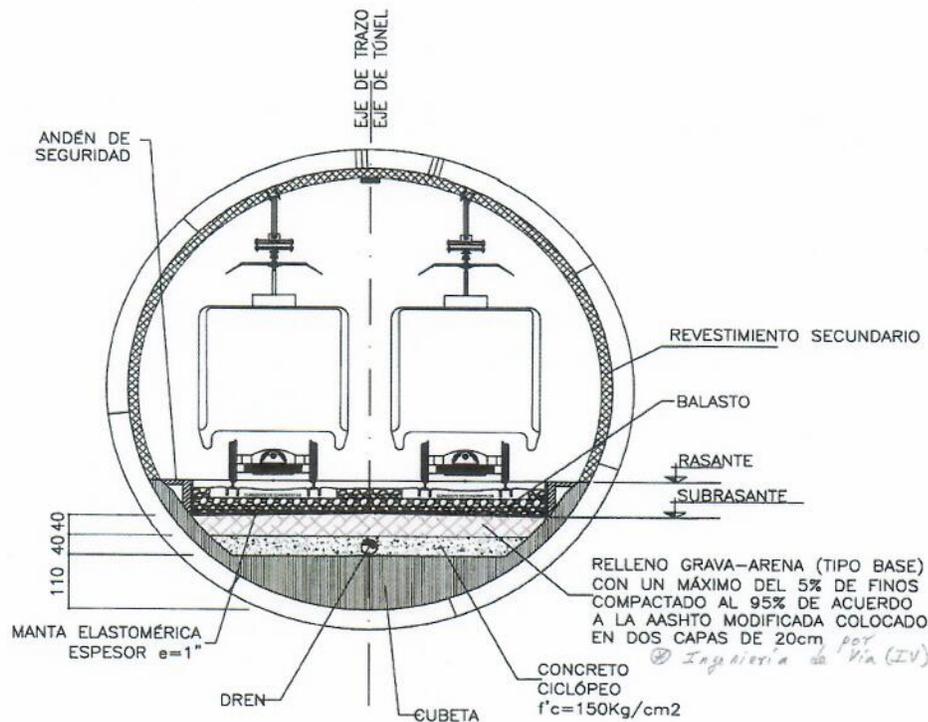


Figura 2.4.3. Sección transversal construida en la zona A (PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00).

Modelo numérico tridimensional de diferencias finitas

Se desarrolló un modelo numérico tridimensional de diferencias finitas con el software FLAC^{3D} del sistema túnel-suelo, considerando las juntas longitudinales y transversales, y el sistema de machihembrado, de acuerdo a los planos as built. La flexibilidad en la zona de juntas longitudinales, que es variable y función de la rotación de los segmentos de dovelas, fue tomada en cuenta reduciendo los módulos de elasticidad E_i en esas zonas, y calibrando la flexibilidad global del sistema de anillos utilizando las mediciones de convergencias y divergencias registradas por la diseñadora ICA, al término de la construcción de la sección. El comportamiento de los geomateriales se consideró gobernado por una ley esfuerzo-deformación elasto-plástica con un criterio de falla Mohr-Coulomb, para tener una mejor eficiencia en los tiempos de cálculo de las simulaciones. Para modelar las

dovelas y juntas del túnel se utilizaron elementos elásticos tipo SHELL, y para el suelo circundante se utilizaron elementos sólidos. Las dovelas y sus juntas, así como la rotación de los segmentos de las dovelas, se modelaron con base en lo presentado en el documento 2-081118_IMM_ML12-D-SEG-FW-02_CONCEPT_ESP (Figura 2.4.4). La Figura 2.4.5 presenta la vista general del modelo numérico tridimensional de diferencias finitas, así como el modelado de las dovelas.

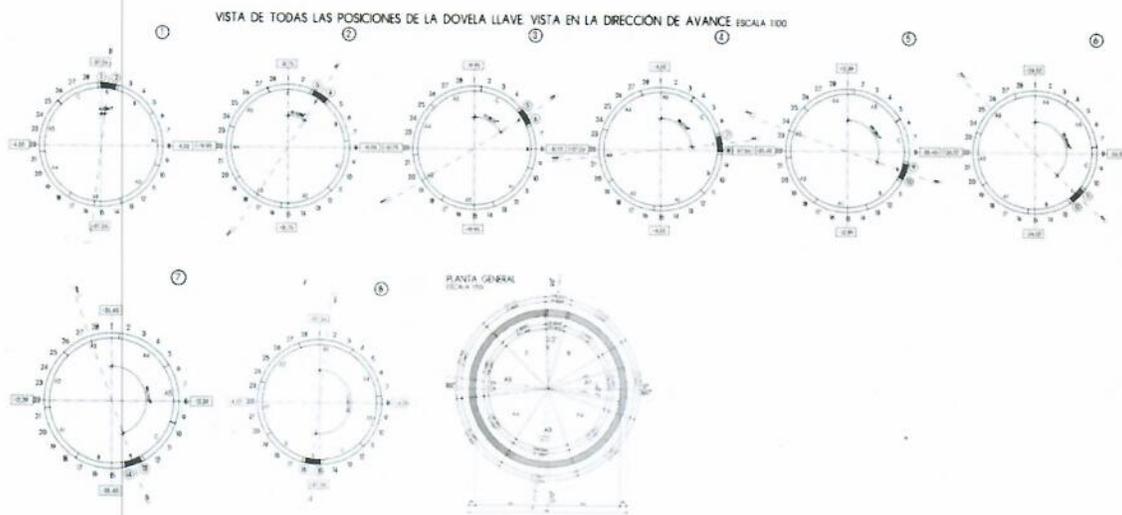


Figura 2.4.4. Rotación de los segmentos de las dovelas (2-081118_IMM_ML12-D-SEG-FW-02_CONCEPT_ESP).

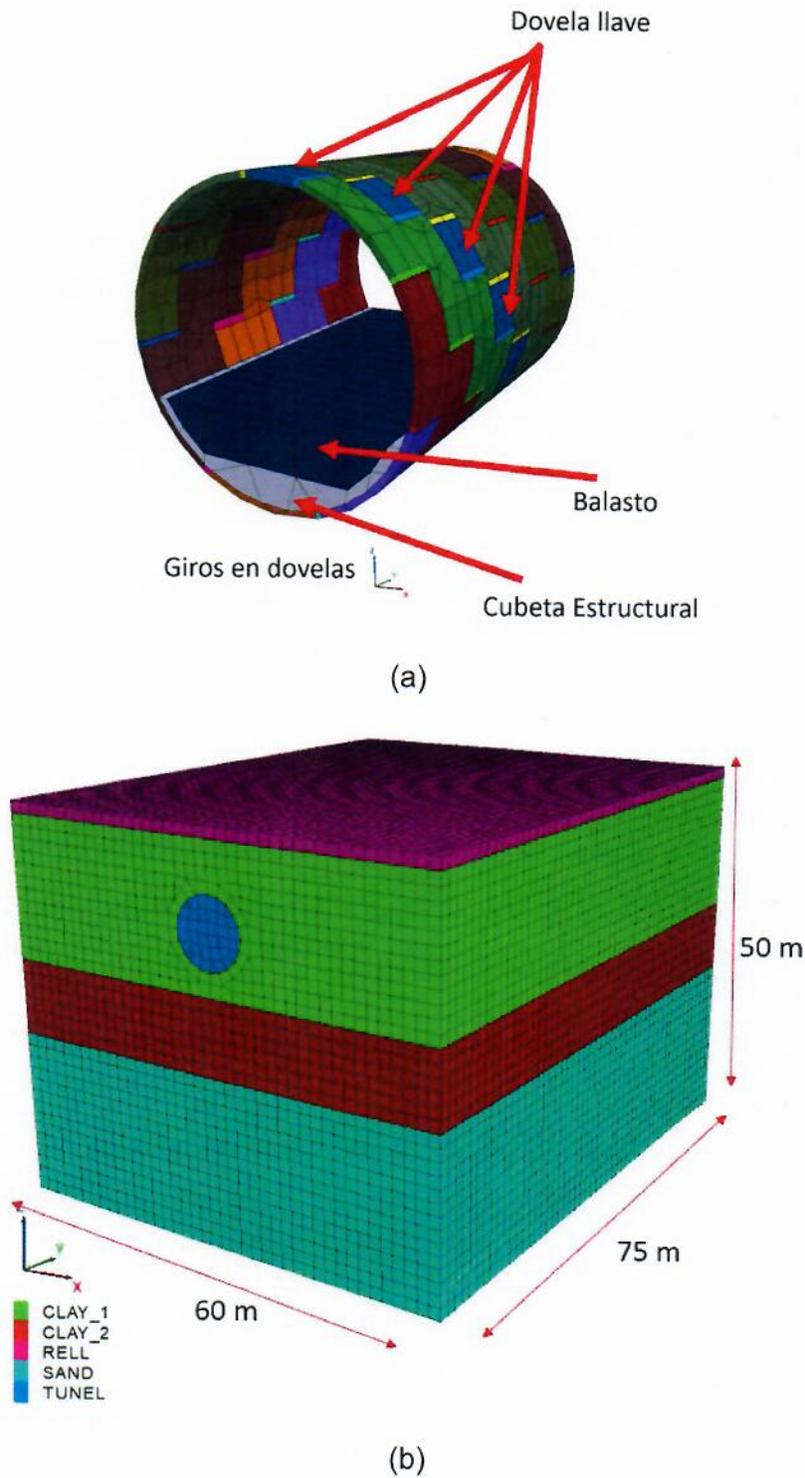


Figura 2.4.5. Modelo numérico tridimensional de diferencias finitas de la sección A (a) modelado de dovelas y (b) vista general del modelo.

En la Figura 2.4.6 se presentan las mediciones al interior del túnel que fueron utilizadas para la calibración de la flexibilidad global del sistema de anillos a través de un proceso iterativo de ajuste de E_i , hasta reducir el error entre lo medido y calculado. En las Figuras 2.4.7 a 2.4.8 se presentan la comparación de las deformaciones medidas y calculadas, observándose una buena capacidad predictiva del modelo numérico. Asimismo, la Figura 2.4.9. muestra la comparación de asentamientos superficiales calculados mediante la simulación numérica, y los medidos durante la construcción.

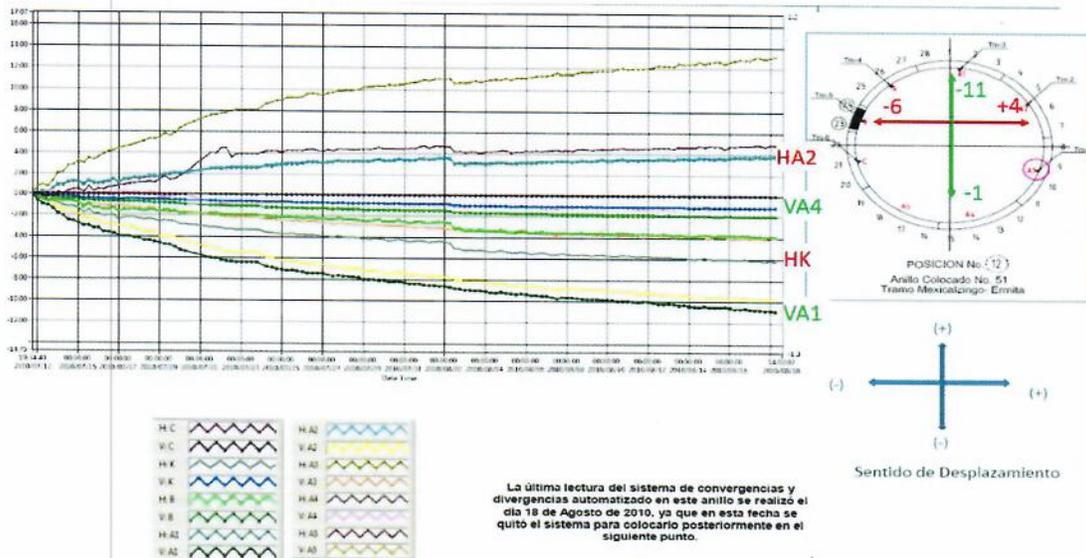


Figura 2.4.6. Deformaciones internas del túnel.

Contorno de desplazamientos (m)

Shell X-Displacement

Deformed Factor: 50

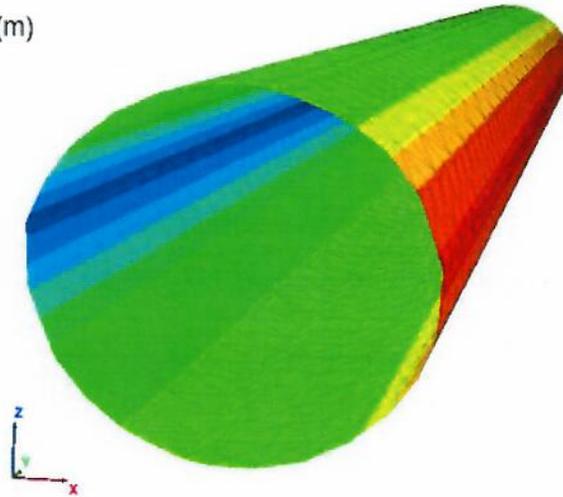
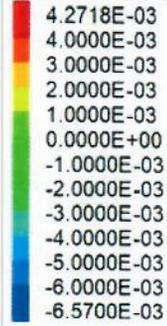


Figura 2.4.7. Deformaciones transversales calculadas mediante la simulación numérica.

Contorno de desplazamientos (m)

Shell Z-Displacement

Deformed Factor: 50

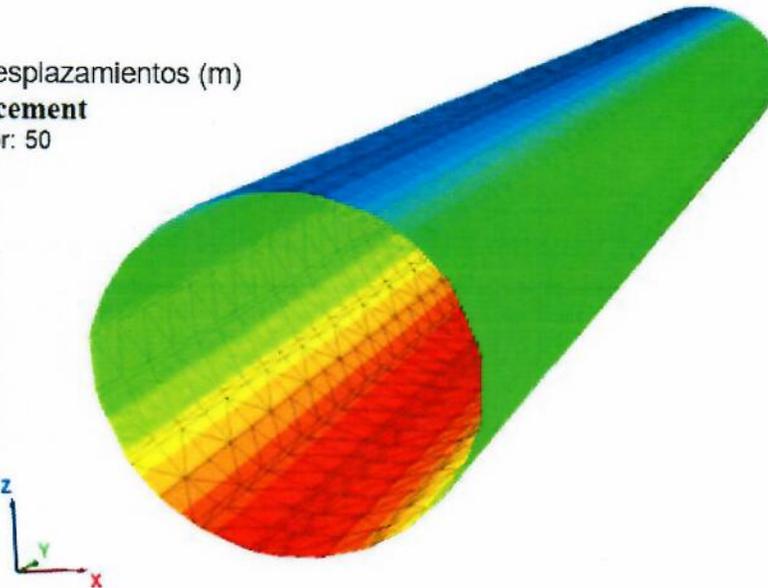
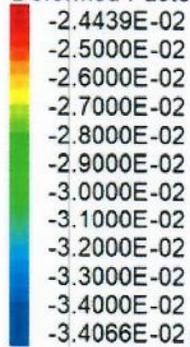


Figura 2.4.8. Deformaciones verticales calculadas mediante la simulación numérica.

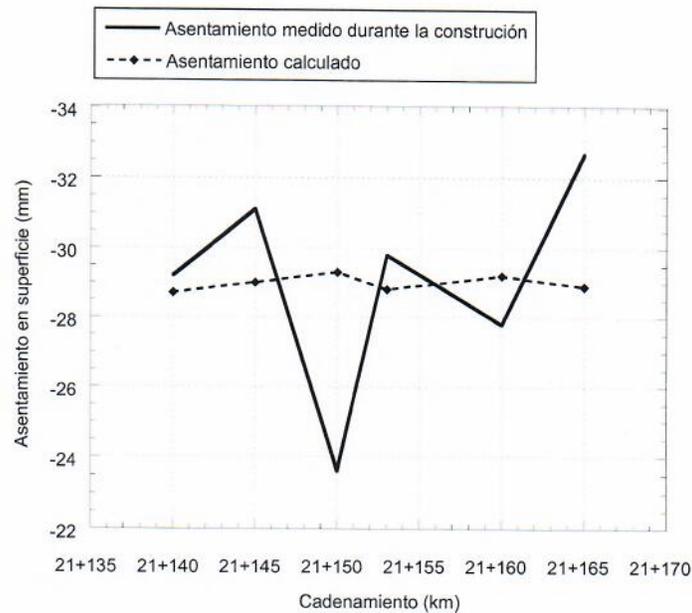


Figura 2.4.9. Comparación de asentamientos superficiales calculados mediante la simulación numérica, y los medidos durante la construcción.

2.4.2 Análisis de la Sección B Pk. 21+800

La caracterización de las condiciones geotécnicas de la sección B del tramo de túnel de la Línea 12 del metro, se realizó con base en la información de campo y laboratorio proporcionada por ICA. La Figura 2.4.10 muestra el perfil de suelo, la distribución de pesos volumétricos, la resistencia al corte, y el número de golpes de la prueba de penetración estándar, SPT, en función de la profundidad, incluyendo la descripción de cada estrato para las secciones de análisis.

En la sección B (Figura 2.4.10) se encontró un relleno superficial de arcilla arenosa de 2 m de espesor. Debajo de este estrato y hasta los 9 m aproximadamente, se tiene una capa de arcilla de consistencia muy blanda a blanda con contenidos de agua bajos que varían en un rango de 40 a 100 % e índices de plasticidad comprendidos entre 10 y 90 %. La resistencia no drenada, s_u , de esta arcilla es de 15 kPa. A partir de los 9 m de profundidad y hasta los 23 m aproximadamente, se encontró un estrato de arcilla de consistencia blanda con contenidos de agua altos

que varían entre 150 y 300 %. Aquí la resistencia de la arcilla aumenta, obteniendo valores de 65 y 90 kPa. Desde los 23 m y hasta la máxima profundidad explorada (89 m) se encontró arena arcillosa de compacta a muy compacta con número de golpes del SPT superiores a 60. En la Tabla 2.4.3 se presentan las propiedades mecánicas de resistencia y deformabilidad para la zona en estudio.

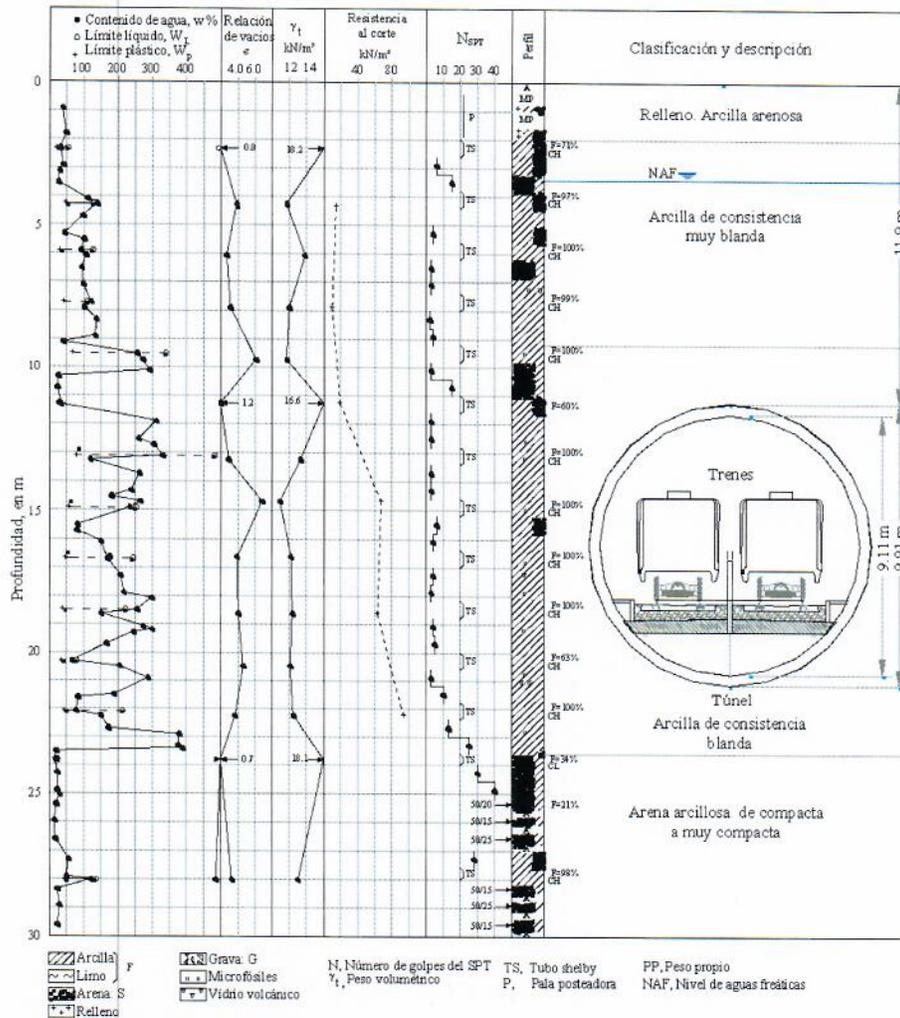


Figura 2.4.10. Perfil de suelo de la sección B.

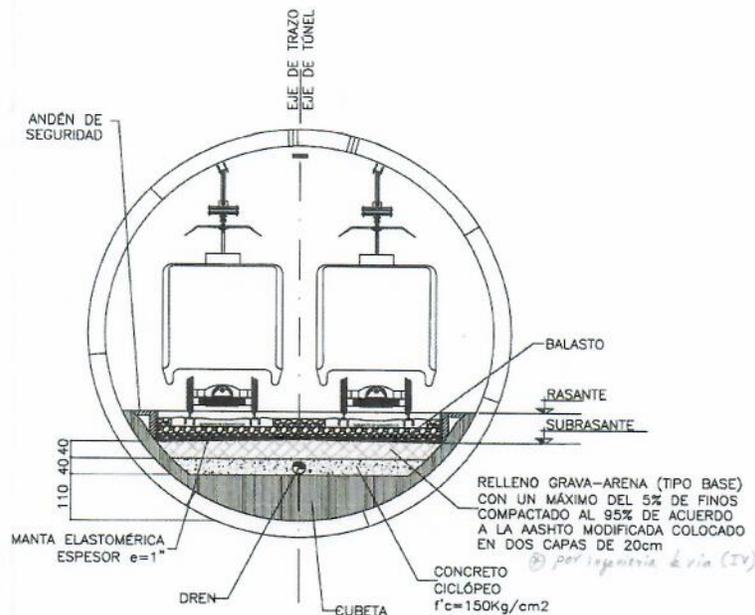


Tabla 2.4.3. Propiedades mecánicas de resistencia y deformabilidad para la zona en estudio

Profundidad [m]	Límites de Atterberg			Peso volumétrico γ [t/m ³]	Prueba triaxial UU		Resistencia a la compresión simple q_u [kPa]	Relación de vacíos, e	w %	G_s -	E [kPa]
	w_L %	w_P %	IP		c_u [kPa]	ϕ [°]					
2.54	86	45	41	13.8	15	9	6	4.84	80	-	2700
4.33	81	36	45	13.3	10	11	30	2.40	77	2.47	3300
6.24	117	43	74	11.6			18	4.47	105	2.30	1400
9.85	495	81	414	10.8			41	8.59	329	2.39	2400
11.69	369	75	294	11.1	30	11	73	6.37	269	2.25	4900
13.42	326	67	259	11.2			100	6.14	238	2.35	5000
15.30	179	44	135	11.4			66	4.35	161	2.34	4000
17.11	331	77	254	11.6	70	0	152	6.43	254	2.18	6300
18.68	249	66	183	12.1	100	4	156	4.69	198	2.38	8600
20.73	233	55	178	13.5	120	8	142	2.62	94	2.52	10100
25.98	67	27	40	15.1			178	1.82	65	2.59	7400
36.20	46	20	26	18.6	200	27	363	0.57	18	2.50	43900

- w_L : Límite líquido
- w_P : Límite plástico
- IP: Índice de plasticidad
- ϕ : Ángulo de fricción interna
- w: Contenido de agua
- G_s : Densidad de sólidos
- E: Módulo de elasticidad

La sección transversal del túnel construida en la zona B se presenta en la Figura 2.4.11. (PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00), misma que consiste en una sección circular de 9.91 m de diámetro, y un recubrimiento a base de dovelas prefabricadas y cubeta estructural. Esta sección fue considerada para el modelado numérico correspondiente a esta zona.



Modelo numérico tridimensional de diferencias finitas

Se llevó a cabo un modelo numérico tridimensional de diferencias finitas con el software FLAC^{3D} para evaluar el comportamiento de esta sección ante carga estática, tomando en cuenta los efectos de hundimiento regional a largo plazo. El comportamiento de los geomateriales se consideró gobernado por una ley esfuerzo-deformación elasto-plástica con un criterio de falla Mohr-Coulomb. Para modelar las dovelas y juntas del túnel se utilizaron elementos tipo SHELL, y para el suelo circundante se utilizaron elementos sólidos. Las dovelas y sus juntas, así como la rotación de los segmentos de las dovelas, se modelaron con base en lo presentado en el documento 2-081118_IMM_ML12-D-SEG-FW-02_CONCEPT_ESP (Figura 2.4.4). La Figura 2.4.12 presenta la vista general del modelo numérico tridimensional de diferencias finitas, así como el modelado del revestimiento para esta zona.

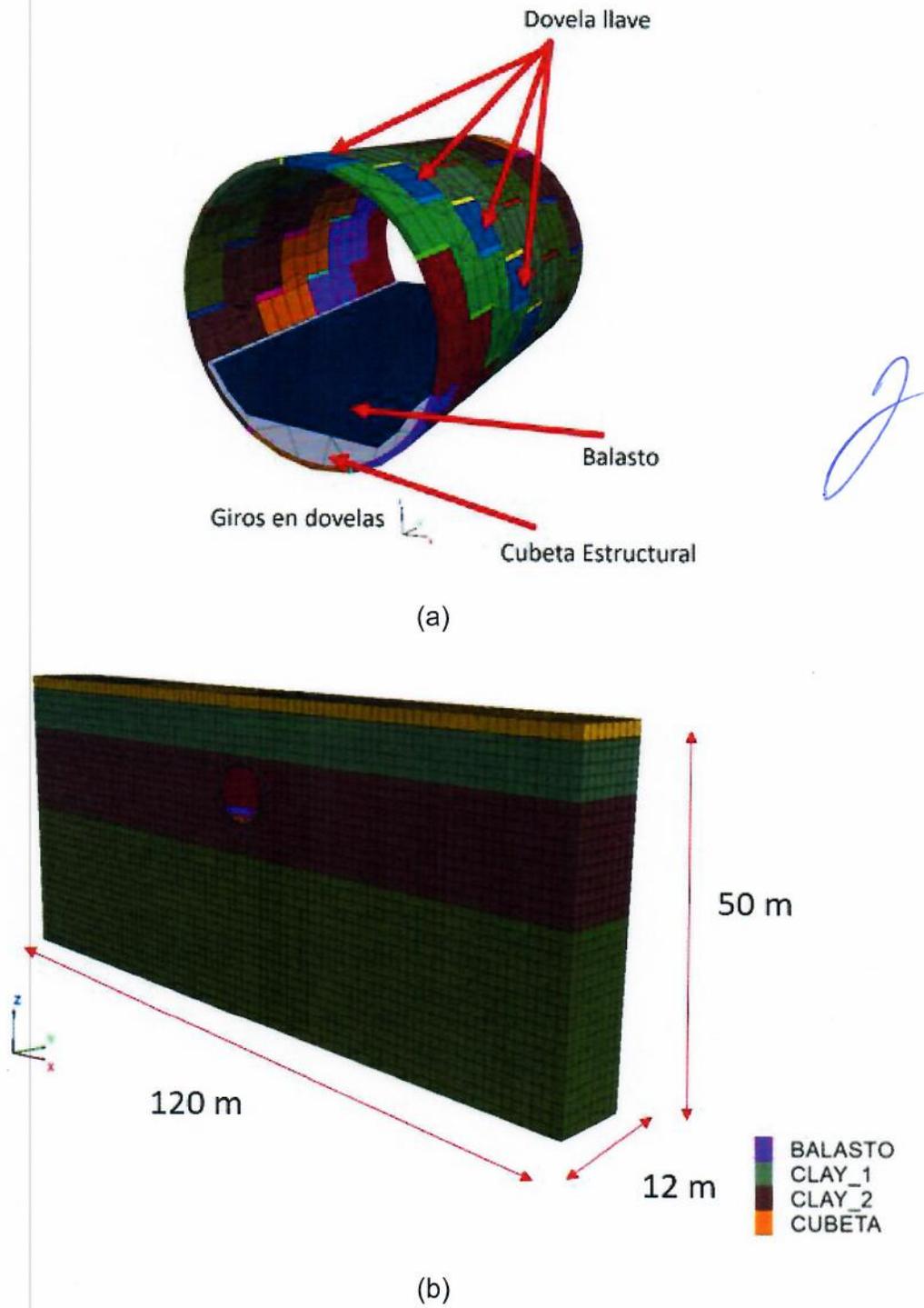


Figura 2.4.12. Modelo numérico tridimensional de diferencias finitas de la sección B (a) modelado del revestimiento y (b) vista general del modelo

Hundimiento regional

Para establecer la tasa de hundimiento regional al año, se consideró el documento presentado en la Figura 2.4.13 (PMDF-11-MS-612000-III-0094-10394-M-00), el cual, para esta zona toma en cuenta una tasa de hundimiento de 3.1 cm/ año con base en mediciones llevadas a cabo en el sitio. Cabe mencionar que es recomendable monitorear este parámetro ya que existen inconsistencias con los asentamientos por año reportados por (Auvinet et al., 2017) (Figura 2.4.14), y los análisis son muy sensibles a este parámetro. Asimismo, la Tabla 2.4.4 presenta los asentamientos calculados para las diversas etapas de análisis consideradas en este estudio.

2.1.2 Hundimiento regional

El Instituto de Ingeniería de la UNAM realizó un estudio del hundimiento regional a lo largo del tramo de la Línea 12, en especial en cada una de las estaciones. El estudio se basa en las nivelaciones realizadas por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACM), entre 1983 y 2005.

En las Fig 2.2 se presenta, de manera puntual, las velocidades de hundimiento en cm/seg medidas en el tramo de estudio (entre las estaciones Eje Central y Mexicalzingo)

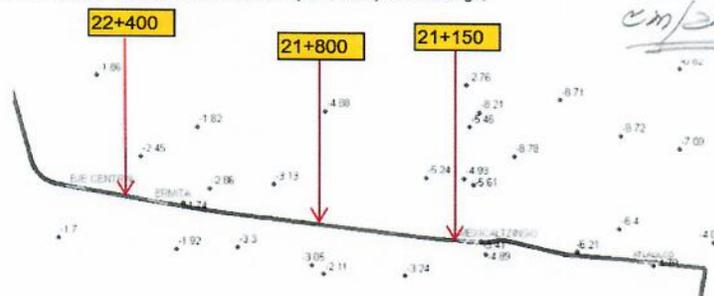


Figura 2.2 Velocidades de hundimiento en el tramo Eje Central-Atisco, en cm/año
(Instituto de Ingeniería, 2010)

En general se observa que la velocidad de hundimiento crece hacia el Nororiente, desde valores de 1.7cm/año (estación Eje Central) hasta un máximo de 8.78cm/año. Sin embargo, a lo largo del trazo, el máximo es de 5.4cm/año, que se ubica al oriente de la estación de Mexicalzingo.

Figura 2.4.13. Asentamientos medidos en la zona de estudio (PMDF-11-MS-612000-III-0094-10394-M-00)

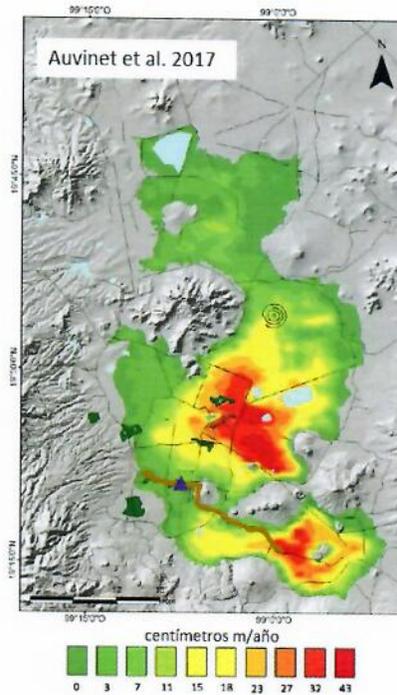


Figura 2.4.14. Mapa de las tasas de hundimiento regional (Auvinet et al., 2017).

Tabla 2.4.4. Asentamientos calculados para distintas etapas de análisis

Año	Velocidad del hundimiento regional (cm/año)	0 años (2008)	10 años (2018)	13 años (2021)	20 años (2028)	30 años (2038)	Asentamiento máximo estimado
Hundimiento Regional Sección B (m) 21+800	3.0	0	0.30	0.40	0.60	0.90	1.20 m para 38 años (2046)

Estimación del abatimiento de presiones de poro con el tiempo.

Para estimar el abatimiento de las presiones de poro con el tiempo, se utilizó la solución de diferencias finitas para la consolidación unidimensional, partiendo de la ecuación diferencial de la teoría de consolidación de Terzaghi:



$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

Donde:

u	Presión de poro a una cierta profundidad (ton/m ²)
t	Tiempo de consolidación (años)
z	Profundidad a la cual se estima el valor de u (m)
C_v	Coefficiente de consolidación (m ² /años)

Para encontrar una solución, se utilizó una expansión de la ecuación diferencial usando el teorema de Taylor (Budhu, 2010), obteniendo para ambos lados de la ecuación:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (u_{i,j+1} - u_{i,j}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{(\Delta z)^2} (u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) \quad (3)$$

Donde:

i	Número de fila en la malla de diferencia finitas
j	Número de columna en la malla de diferencia finitas

Para aplicar la solución, se establece una malla en donde el eje horizontal representa el número de divisiones en el tiempo, y el eje vertical el número de divisiones del espesor del estrato. Para aplicar la solución mostrada, se toma la suposición de que los cambios en la presión de poro entre un nodo y otro son lineales, lo cual es razonable si los incrementos son pequeños. Substituyendo las ecuaciones (2) y (3), en la ecuación (1) se obtiene:

$$u_{i,j+1} = u_{i,j} + \frac{C_v \Delta t}{(\Delta z)^2} (u_{i-1,j} - 2u_{i,j} + u_{i+1,j}) \quad (4)$$

No obstante, la ecuación (4) sólo es aplicable para los nodos que no se encuentran en la frontera, si es que el flujo se considera en un solo sentido, y para los nodos

ubicados en la frontera donde no es permitido el flujo, $u_{i+1,j}$ se considera como el espejo de $u_{i-1,j}$ y por tanto la ecuación (4) se modifica como:

$$u_{i,j+1} = u_{i,j} + \frac{C_v \Delta t}{(\Delta z)^2} (2u_{i-1,j} - 2u_{i,j}) \quad (5)$$

Para que el método converja, se debe de establecer un número suficiente de divisiones en la malla de diferencias finitas (Fig. 2.4.15). Como criterio de convergencia se ha establecido que $\frac{C_v \Delta t}{(\Delta z)^2} < 0.5$ (Das, 2008), siendo Δt el número de división en el tiempo y Δz el número de divisiones en el espesor del estrato.

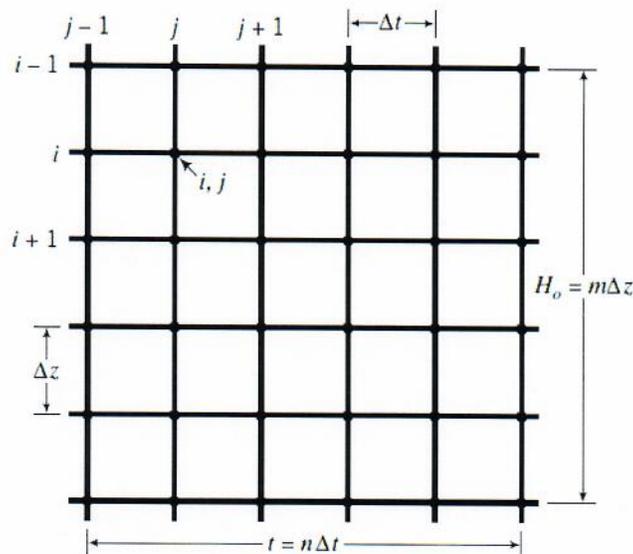


Figura 2.4.15 Esquema de la malla de diferencias finitas utilizada en el análisis (Budhu, 2010).

Para obtener las curvas de distribución de presión de poro con la profundidad para diferentes periodos de tiempo (isócronas), se consideró como condición inicial las mediciones realizadas en el año 2008 en la estación SPC 2-2. Con el objetivo de simular que el abatimiento de las presiones de poro es generado principalmente por la extracción de agua mediante pozos profundos, se consideró que el flujo

únicamente ocurre a través del estrato inferior de arena, por lo que la parte superior se simuló como frontera impermeable, de manera que la ecuación (5) fue implementada para los nodos superiores de la malla de diferencias finitas. Para los análisis en cuestión se utilizó un valor de $C_v = 0.002089 \text{ cm}^2/\text{años}$ y para cumplir con el criterio de convergencia se utilizó un valor de $\Delta t = 0.05 \text{ años}$. En la Figura 2.4.16. se muestran las distribuciones de presión de poro con la profundidad para cada periodo de tiempo, y para cada caso de análisis, obtenidas mediante la metodología descrita anteriormente.

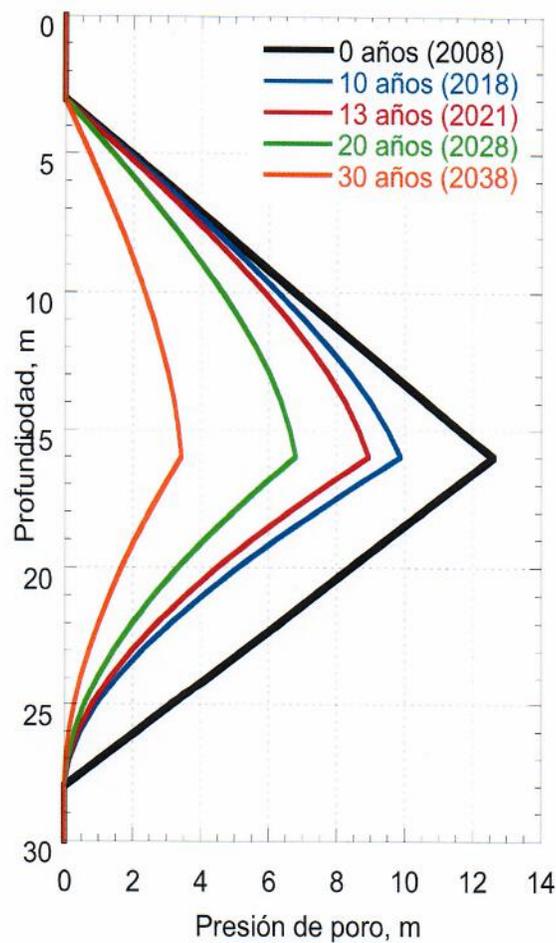


Figura 2.4.16. Isócronas obtenidas en el análisis de consolidación unidimensional para el sitio B



Simulación del hundimiento regional

Para establecer las condiciones a largo plazo de los sitios analizados, se llevó a cabo en primera instancia una metodología iterativa mediante columnas de suelo simuladas con el software FLAC^{3D}, donde se buscó replicar los asentamientos esperados en campo libre para los periodos de tiempo establecidos, de acuerdo con la tasa de hundimiento estimada para la zona de estudio.

La metodología empleada consta de los siguientes pasos (Mayoral et al., 2017): 1) Determinación de las condiciones de esfuerzo inicial según las mediciones de presión de poro. 2) Definición de las condiciones de esfuerzo para los diferentes periodos de tiempo, según las isócronas mostradas en la Figura 2.4.16, estimadas a partir de la teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi. 3) Determinación del coeficiente de variación volumétrica, m_v , de acuerdo con la variación de los esfuerzos efectivos de confinamiento, $\sigma'_c = \sigma_c - U$, para los estratos de arcilla presentes en las secciones críticas estudiadas. 4) Cálculo de asentamientos para cada periodo de tiempo considerado, empleando la solución analítica proporcionada por la teoría de consolidación unidimensional de Terzaghi (ecuación 6).

$$\Delta H = m_v \sigma'_v H_0 \tag{6}$$

Donde:

m_v

Coficiente de variación volumétrica (m²/ton)

σ'_v

Esfuerzo vertical efectivo medio, en el estrato de arcilla (ton/m²) $\sigma'_v =$

$$\sigma_v - U$$

H_0

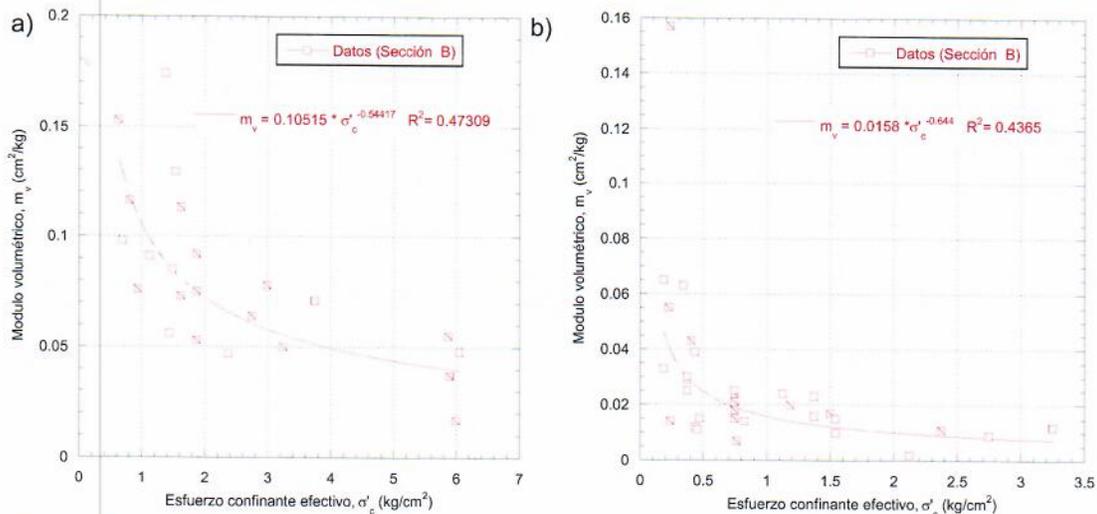
Espesor inicial del estrato de arcilla (m)

ΔH

Cambio de espesor del estrato de arcilla correspondiente (m)

El parámetro m_v se caracterizó con base en una serie de pruebas de consolidación unidimensional, realizadas en muestras inalteradas obtenidas en las formaciones de arcilla presentes en las secciones críticas analizadas. Los resultados obtenidos se muestran en las gráficas de la Figura 2.4.17. Cada valor de m_v se relaciona con

el valor de esfuerzo medio efectivo de confinamiento aplicado, σ'_c , para establecer la variación m_v con la variación de dicho esfuerzo y a través del método de mínimos cuadrados se ajustaron curvas de regresión según los datos experimentales obtenidos. Este procedimiento se llevó a cabo tanto para los m_v de la rama virgen, como para los m_v de la rama de recompresión, de las curvas de compresibilidad. En las gráficas de la Figura 2.4.17 se pueden observar las curvas obtenidas, así como sus ecuaciones correspondientes.



Para el cálculo de los asentamientos en campo libre, se llevaron a cabo simulaciones mediante el software FLAC^{3D}, donde se utilizó un procedimiento desacoplado, lo cual permitió una reducción en el tiempo de cálculo (Mayoral et al., 2019). Una vez realizados los pasos 1 a 4, descritos anteriormente, se llevó a cabo la resolución de los modelos numéricos para cada caso, con el fin de replicar los asentamientos esperados para cada tiempo de consolidación. Para esto, se implementó una subrutina en FLAC^{3D}, con la cual se impone incrementalmente el estado de esfuerzos asociado a cada tiempo de consolidación, de acuerdo con las isócronas representadas en las Figuras 2.4.16, para cada disminución esperada de la presión intersticial, debido a la extracción de agua, el m_v se asigna de manera automática a cada elemento en el modelo de acuerdo con las ecuaciones de

regresión de la Figura 2.4.17, y el asentamiento correspondiente del suelo se calcula usando la expresión (6) en cada elemento del modelo, utilizando la formulación de grandes deformaciones disponible en FLAC^{3D}. De esta manera, se simularon tanto los cambios en la compresibilidad del suelo como los cambios en la configuración de los estratos de arcilla durante el hundimiento regional, debido a la extracción de agua. En la Figura 2.4.18, se muestran las columnas de suelo simuladas en FLAC^{3D} para la sección B, donde se puede observar que las condiciones estimadas representan acertadamente los asentamientos esperados para cada periodo de tiempo establecido, de acuerdo con la tasa de hundimiento anual establecida para los sitios en estudio.

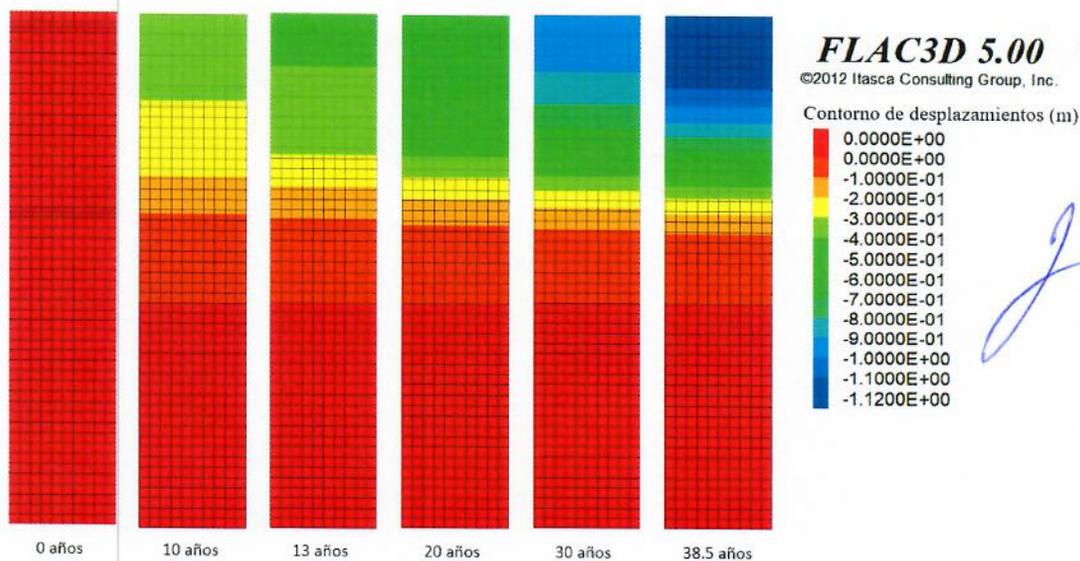


Figura 2.4.18. Asentamientos esperados para cada periodo de tiempo mediante las columnas de suelo simuladas en FLAC^{3D} para el sitio B.

Análisis de resultados

Para la sección de análisis B, se proporcionaron mediciones de asentamientos en superficie, mismos que sirvieron para calibrar el modelo numérico de esta sección (Figura 2.4.19). La Figura 2.4.20 presenta las comparaciones de los asentamientos calculados y medidos en el cadenamiento 21+770 mismo que se encuentra a 30 metros de la sección analizada, por lo que los asentamientos se consideran válidos para la calibración de esta sección de análisis.

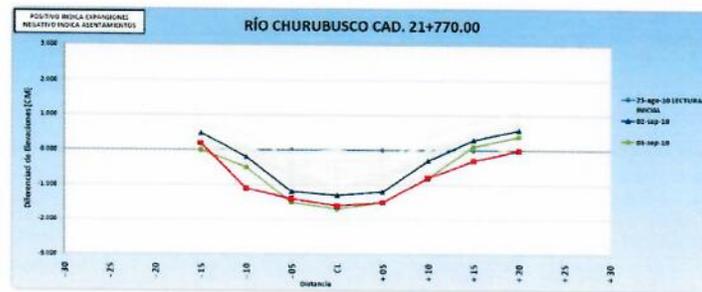


Figura 2.4.19. Asentamientos medidos en superficie para el cadenamiento 21+770

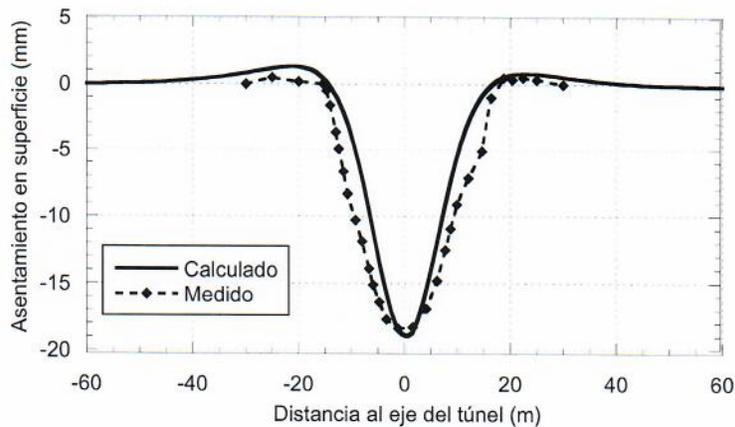
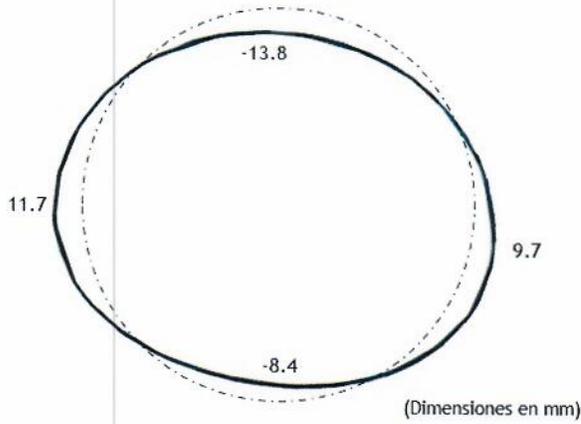


Figura 2.4.20. Comparación de asentamientos calculados y medidos

Las Figuras 2.4.21 a 2.4.25 presentan los desplazamientos al interior del túnel para cada tiempo de análisis. En las mismas figuras se presenta la sección original del túnel, y la deformada para el tiempo de análisis correspondiente. Asimismo, las Figuras 2.4.26 y 2.4.27 presentan los elementos mecánicos para cada condición de análisis, mismos que son afectados por un factor de carga de 1.1 para proyectarlos en el diagrama de interacción de la sección B en estudio. La Figura 2.4.28 presenta el diagrama de interacción nominal, el factorizado por 1.5 con base en la recomendación hecha por la ITA (ITAtch, 2016), y el reducido por factores de resistencia (NTC, 2017), donde se puede observar que el túnel tiene un comportamiento aceptable tomando en cuenta las consideraciones de asentamientos por año establecidos para esta zona. Δr es el desplazamiento relativo en superficie entre el campo libre y el terreno ubicado justamente arriba de la clave del túnel.

Deformaciones por Consolidación a 10 años

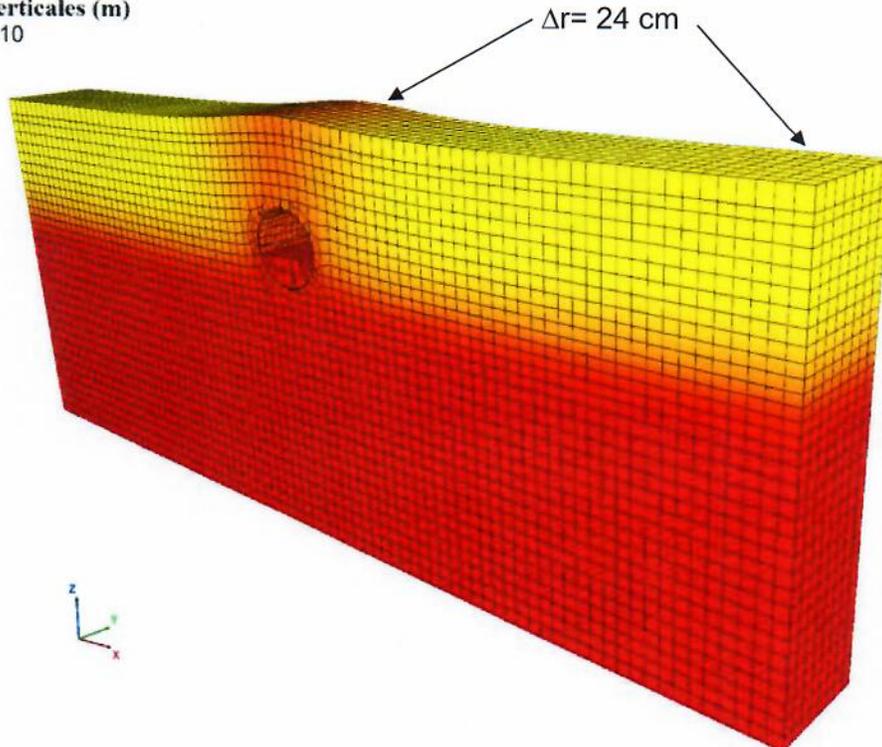
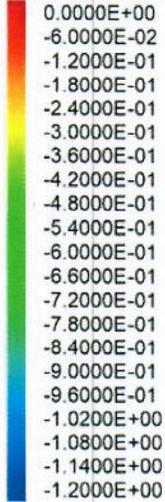


Sección original - - - - -
Sección deformada ———

Dovelas deformadas

Desplazamientos verticales (m)

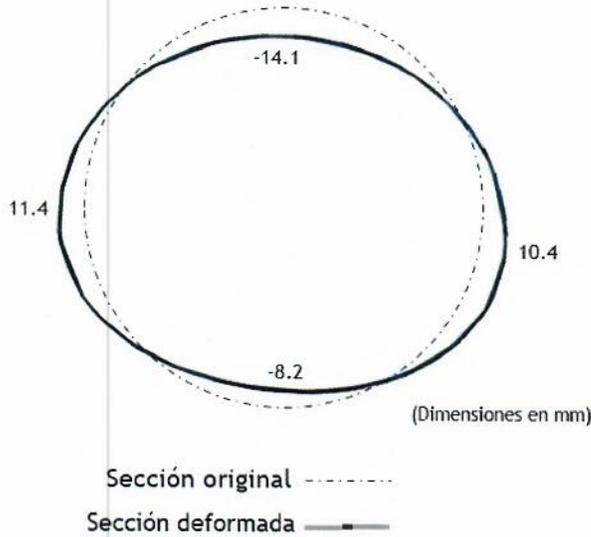
Deformed Factor: 10



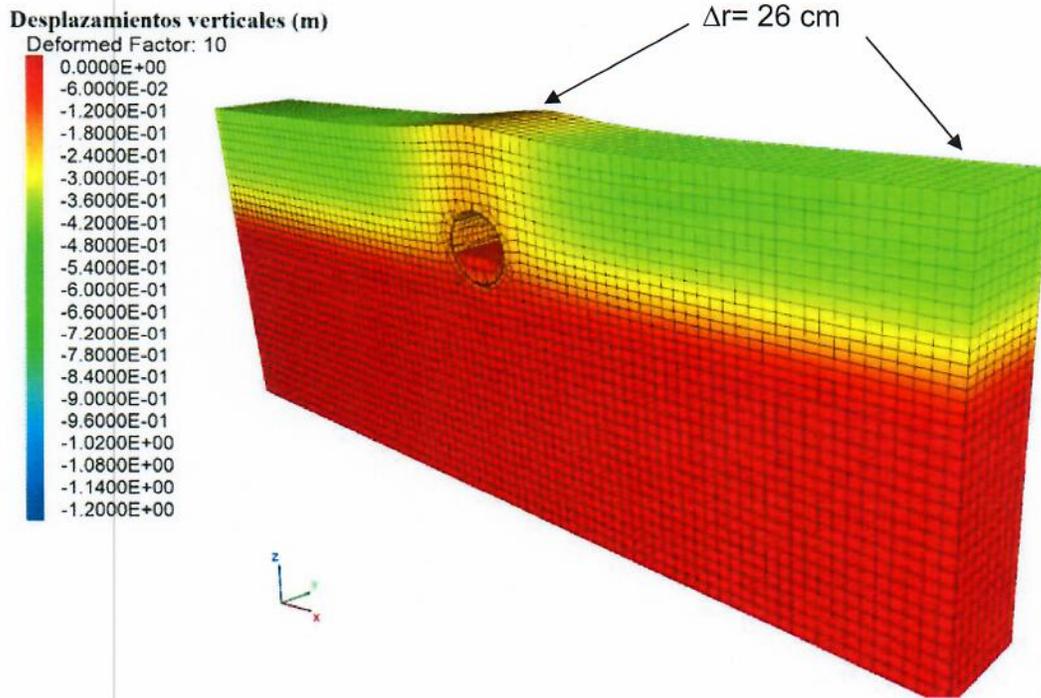
Malla deformada

Figura 2.4.21. Desplazamientos verticales para la consolidación a 10 años.

Deformaciones por Consolidación a 13 años



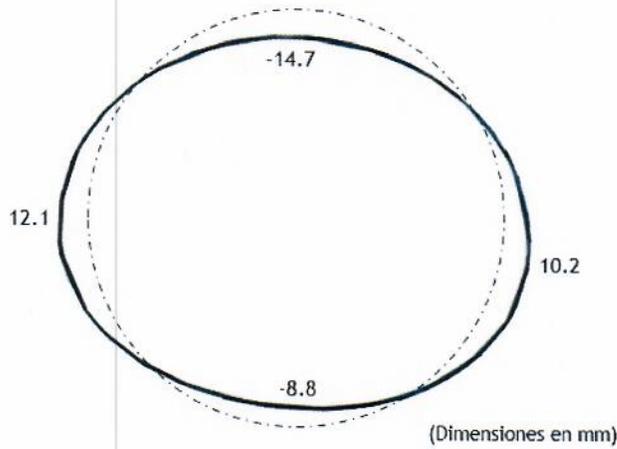
Dovelas deformadas



Malla deformada

Figura 2.4.22. Desplazamientos verticales para la consolidación a 13 años.

Deformaciones por Consolidación a 20 años

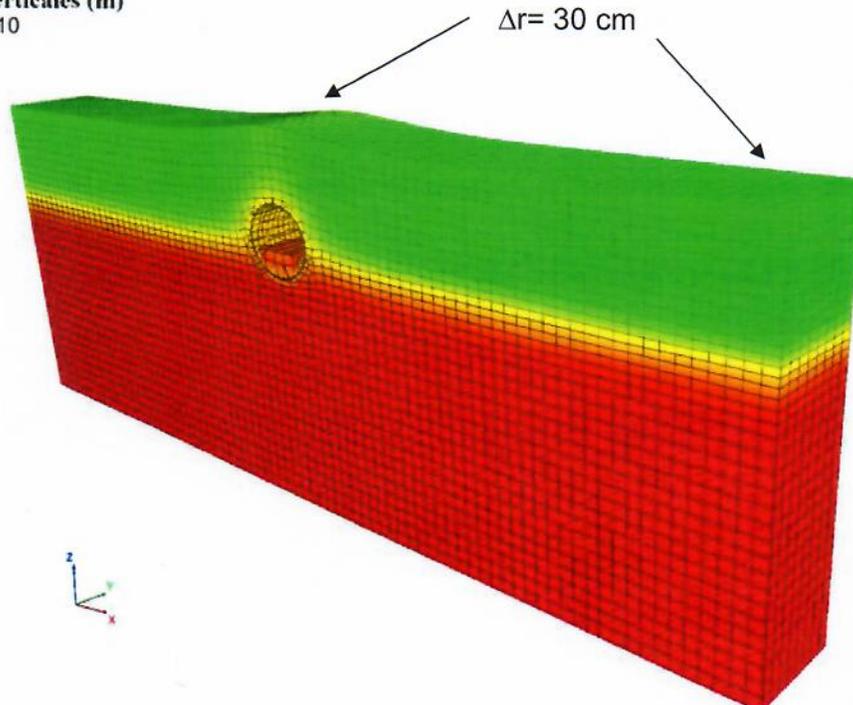
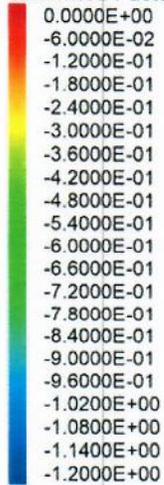


Sección original - - - - -
Sección deformada ———

Dovelas deformadas

Desplazamientos verticales (m)

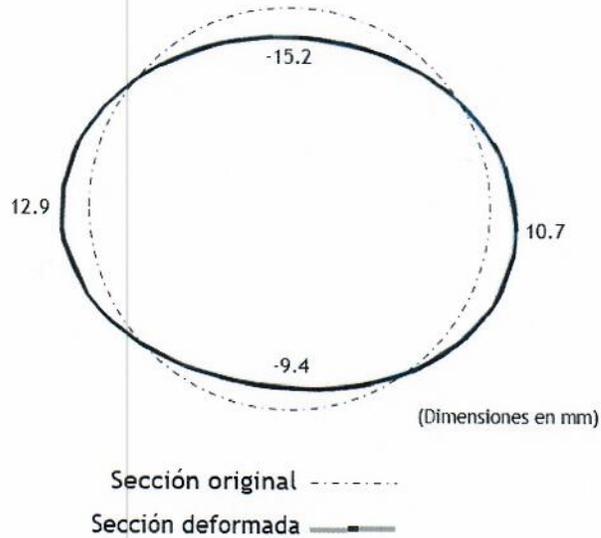
Deformed Factor: 10



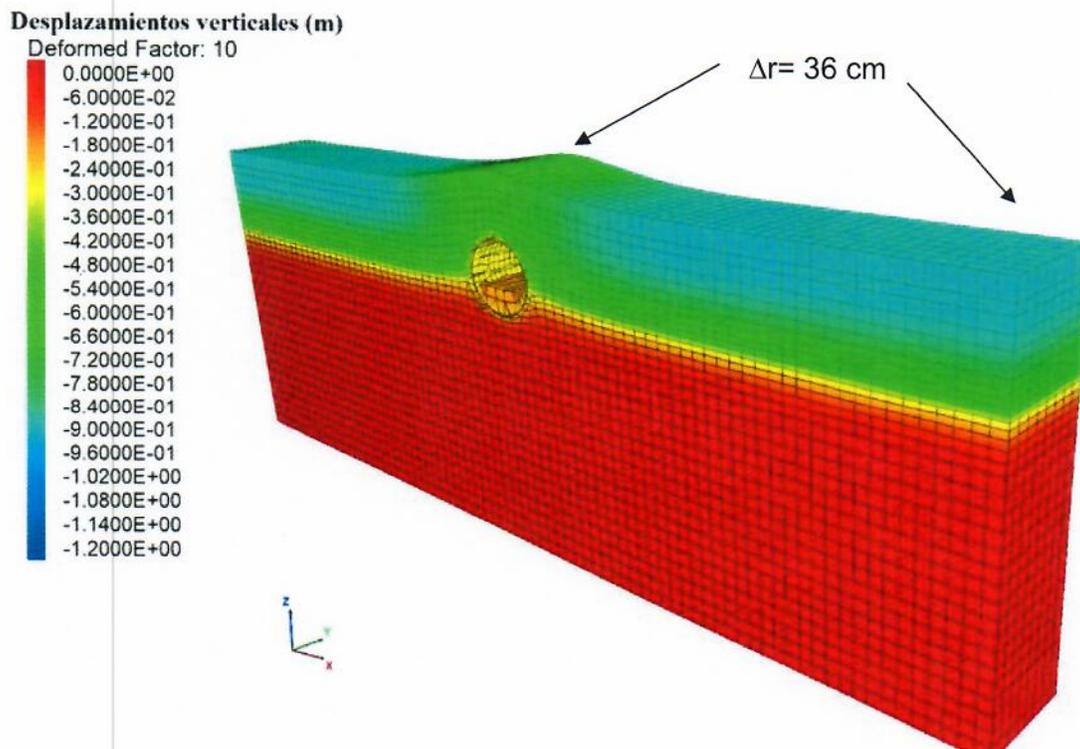
Malla deformada

Figura 2.4.23. Desplazamientos verticales para la consolidación a 20 años.

Deformaciones por Consolidación a 30 años



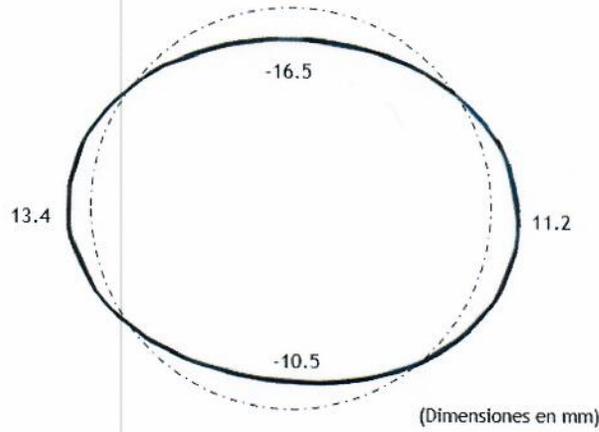
Dovelas deformadas



Malla deformada

Figura 2.4.24. Desplazamientos verticales para la consolidación a 30 años.

Deformaciones por Consolidación a 38 años

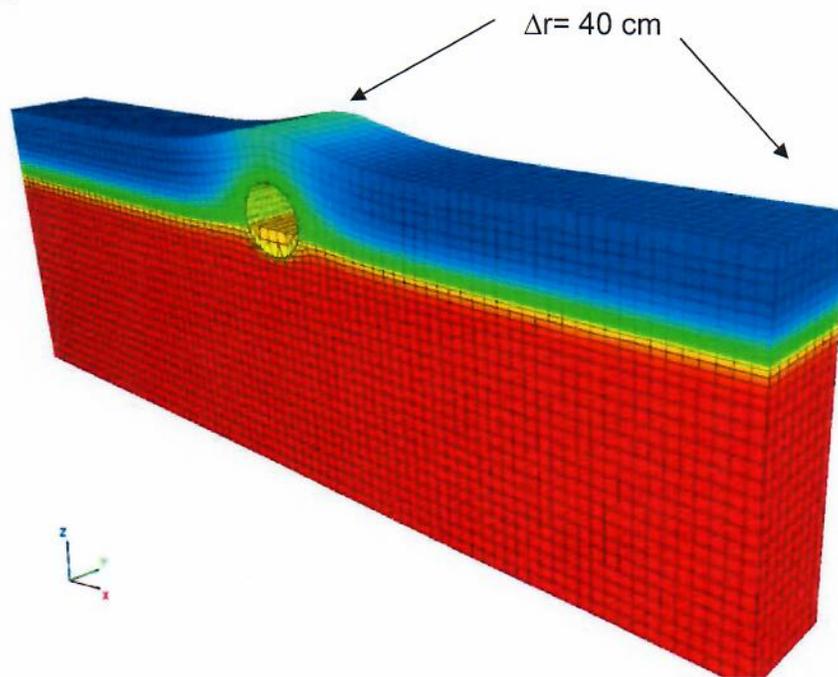
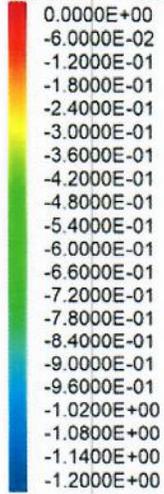


Sección original - - - - -
Sección deformada ———

Dovelas deformadas

Desplazamientos verticales (m)

Deformed Factor: 10



Malla deformada

Figura 2.4.25. Desplazamientos verticales para la consolidación a 38 años.

Elementos mecánicos

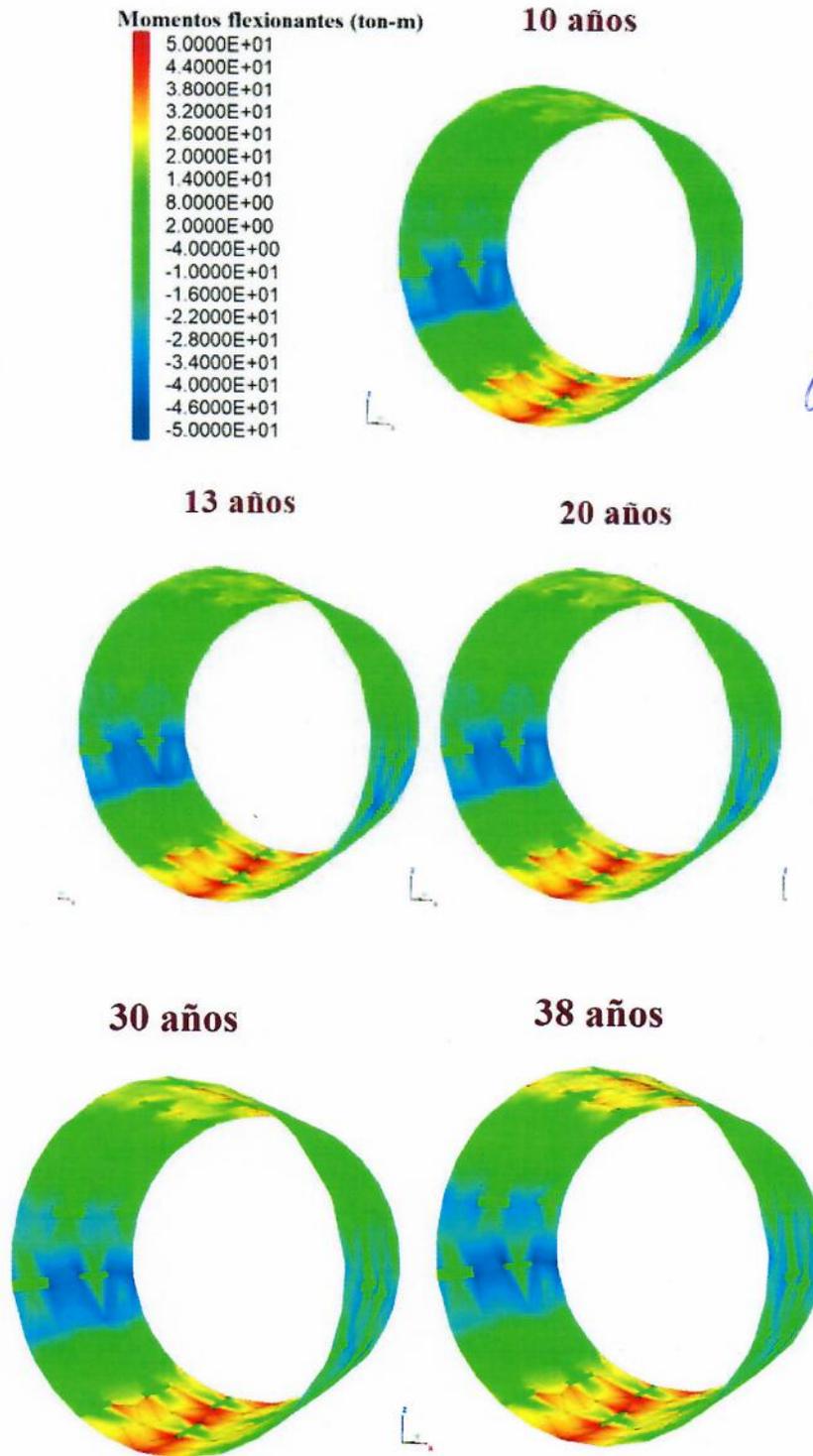


Figura 2.4.26. Elementos mecánicos para la sección de análisis

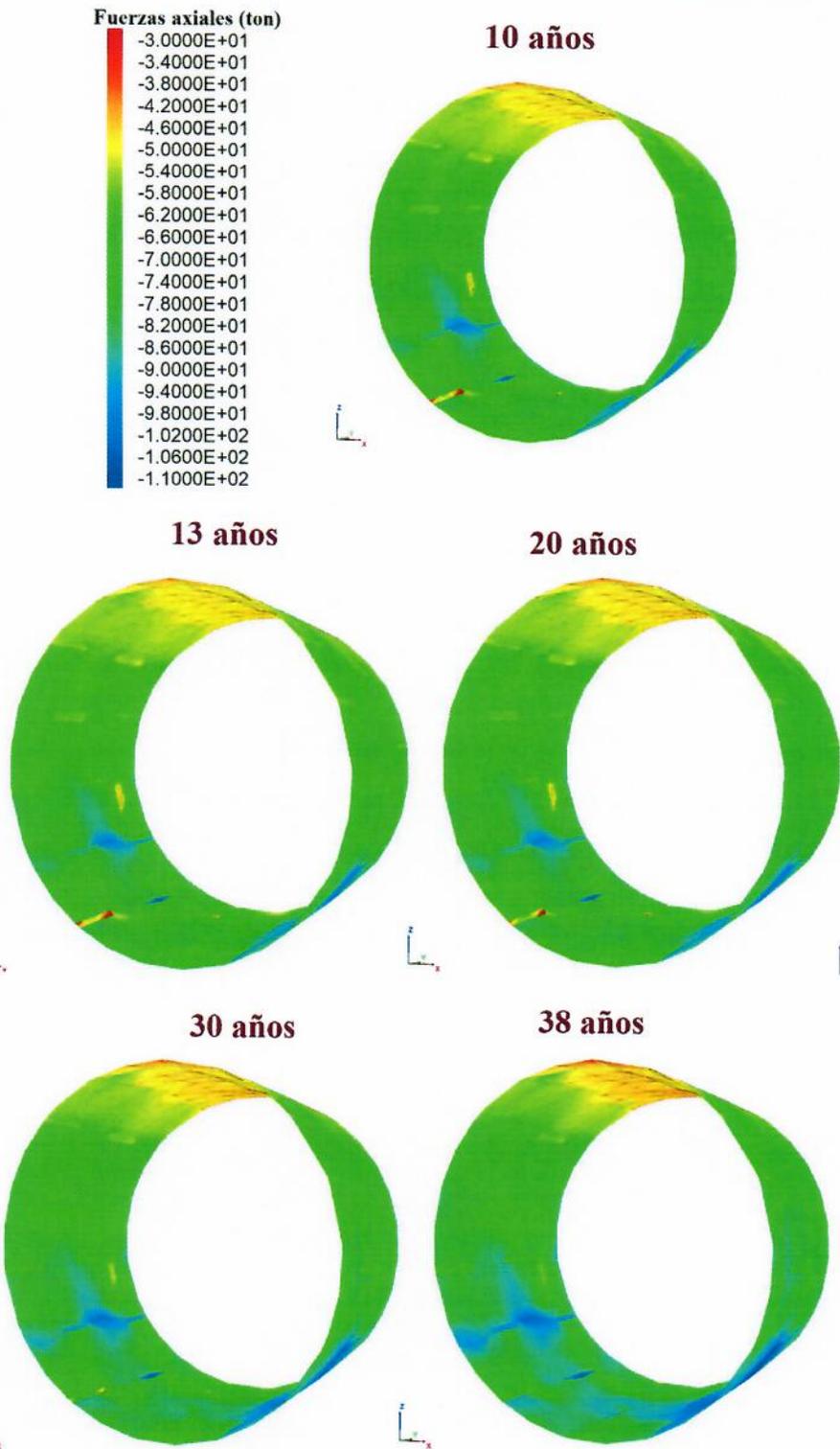


Figura 2.4.27. Elementos mecánicos para la sección de análisis

Distribución de elementos mecánicos a 38 años

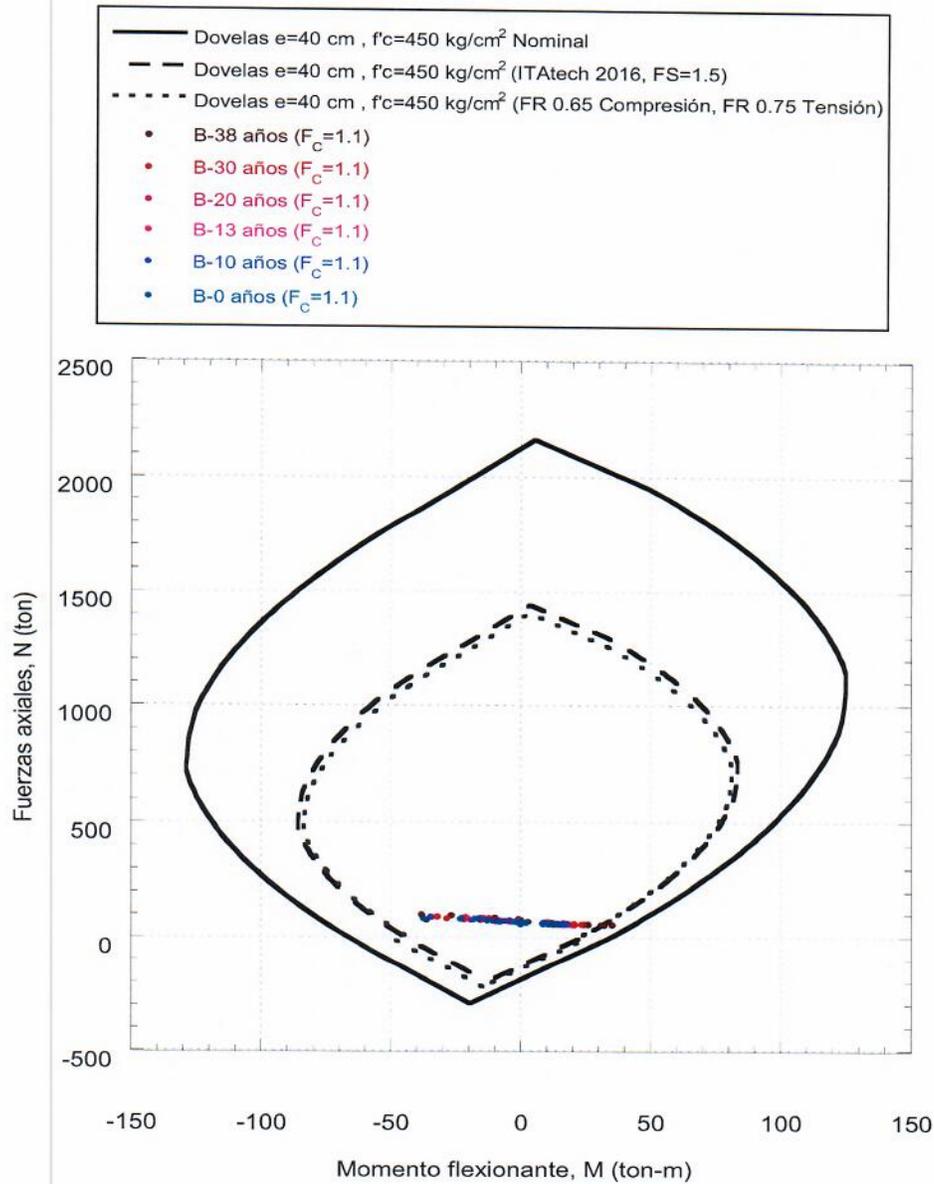


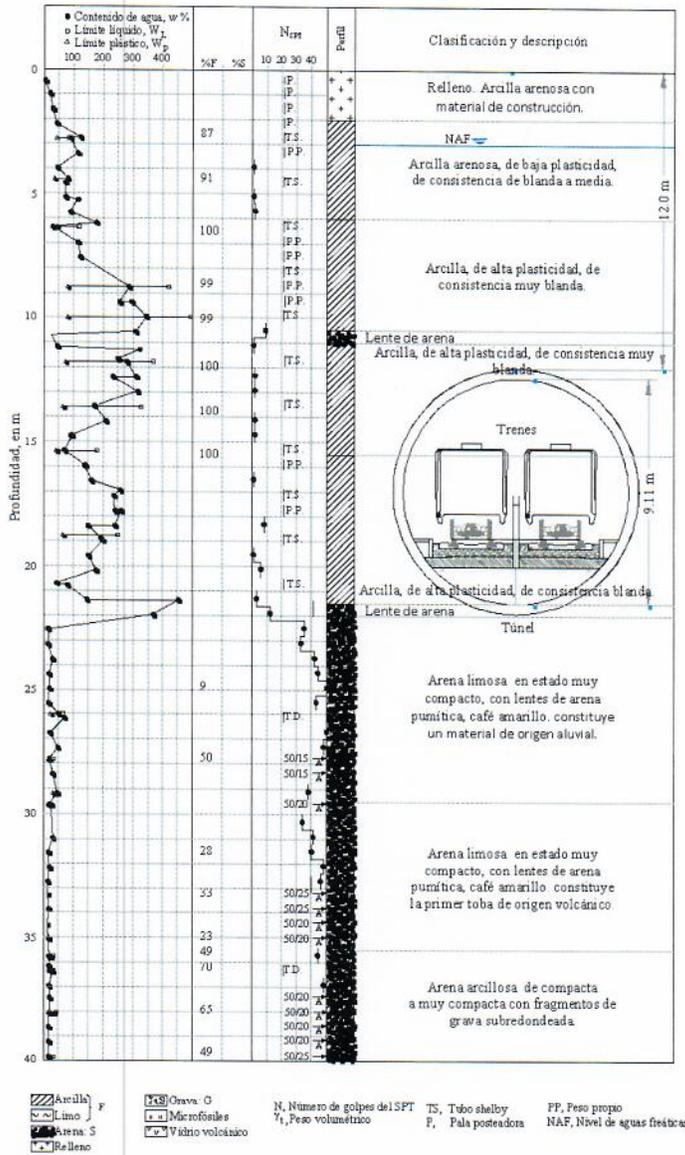
Figura 2.4.28. Diagramas de interacción nominal, factorizado por 1.5 (ITAtch, 2016), y reducido por factores de resistencia (NTC, 2017).



2.4.3 Sección C Pk. 22+400

La caracterización de las condiciones geotécnicas de la sección C del tramo de túnel de la Línea 12 del metro, se realizó con base en la información de campo y laboratorio proporcionada por ICA. La Figura 2.4.29 muestra el perfil de suelo, la distribución pesos volumétricos, la resistencia al corte, y el número de golpes de la prueba de penetración estándar, SPT, en función de la profundidad, incluyendo la descripción de cada estrato para las secciones de análisis.

En el perfil estratigráfico detallado de la sección C (Figura 2.4.29) se puede apreciar que existe un relleno superficial de 2.0 m de espesor. Por debajo de este estrato y hasta los 21.5 m de profundidad se encuentra una capa de arcilla muy blanda con contenidos de agua que varían en un rango de 30 a 290 %. A partir de los 21.5 m y hasta la profundidad de exploración, se tiene un estrato de arena limosa en estado muy compacto, con lentes de arena pumítica de origen aluvial y volcánico. En la Tabla 2.4.5 se presentan las propiedades mecánicas de resistencia y deformabilidad para la zona en estudio.



8

Figura 2.4.29. Perfil de suelo de la sección C

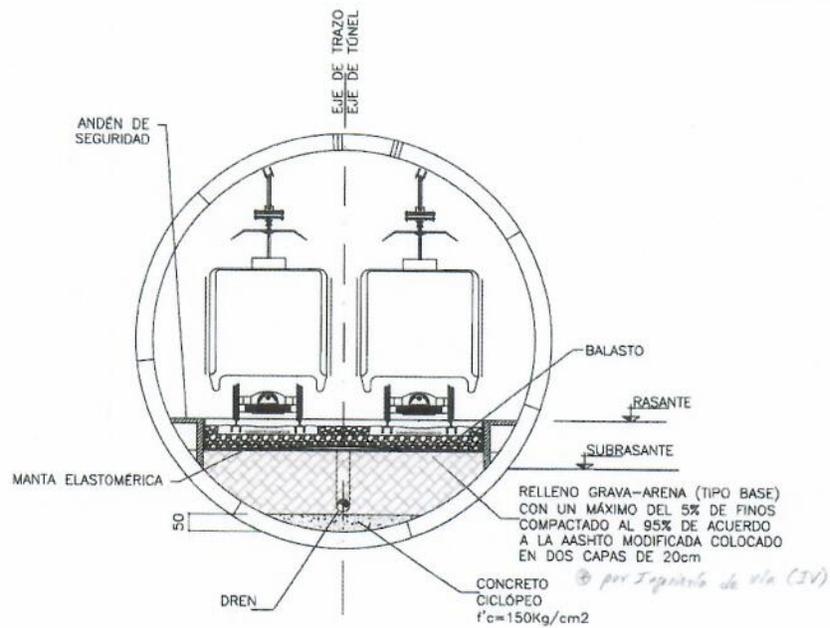


Tabla 2.4.5. Propiedades mecánicas de resistencia y deformabilidad para la zona en estudio.

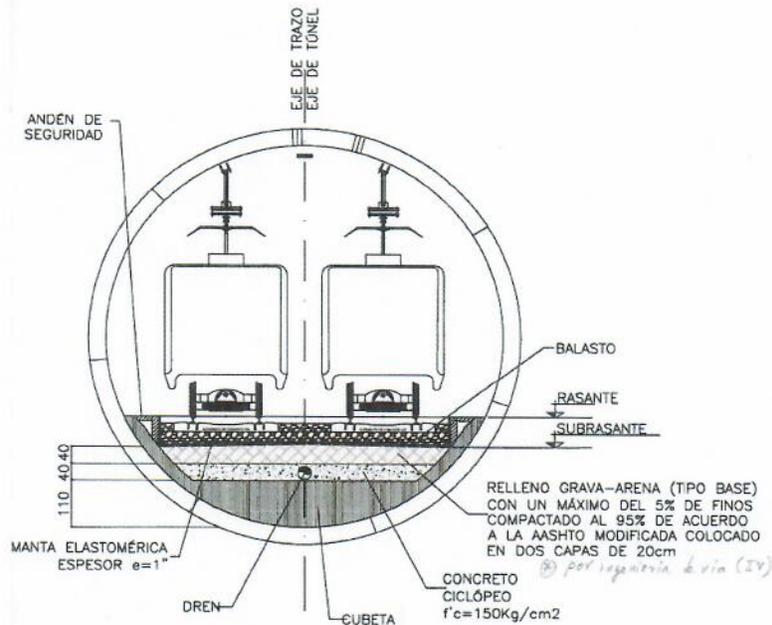
Profundidad [m]	Peso volumétrico γ [t/m ³]	Prueba triaxial UU		Relación de vacíos, e	w %	v -	E [kPa]
		c_u [kPa]	ϕ [°]				
2.0	1.65	2.5	10	-	50	0.3	350
6.0	1.38	1.2	12	2.4	80	0.33	340
10.5	1.09	2.1	0	7.46	290	0.33	205
11.0	1.8	0.0	34	-	30	0.3	2000
15.5	1.09	2.1	0	7.46	290	0.33	205
21.5	1.17	3.9	5	3.94	175	0.33	390
22.0	1.8	0.0	34	-	30	0.3	2000
29.5	1.75	6.0	32	-	20	0.3	4000
35.5	1.78	8.0	32	-	20	0.3	6800
43.0	1.8	10.0	32	-	20	0.3	8000
50.0	1.8	9.0	32	-	20	0.3	7000

- ϕ : Ángulo de fricción interna
- w : Contenido de agua
- v : Densidad de sólidos
- E: Módulo de elasticidad

La sección transversal del túnel construida en la zona C se presenta en la Figura 2.4.30a. (PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00), misma que consiste en una sección circular de 9.91 m de diámetro, y un recubrimiento a base de dovelas prefabricadas sin cubeta estructural. Esta sección fue considerada para el análisis. Asimismo, para este caso en particular, la sección fue analizada sin cubeta y con cubeta estructural, para establecer el comportamiento a largo plazo del túnel, y la aportación de este elemento estructural en el desempeño del túnel. La Figura 2.4.30b presenta la sección con cubeta considerada en el análisis.



(a)



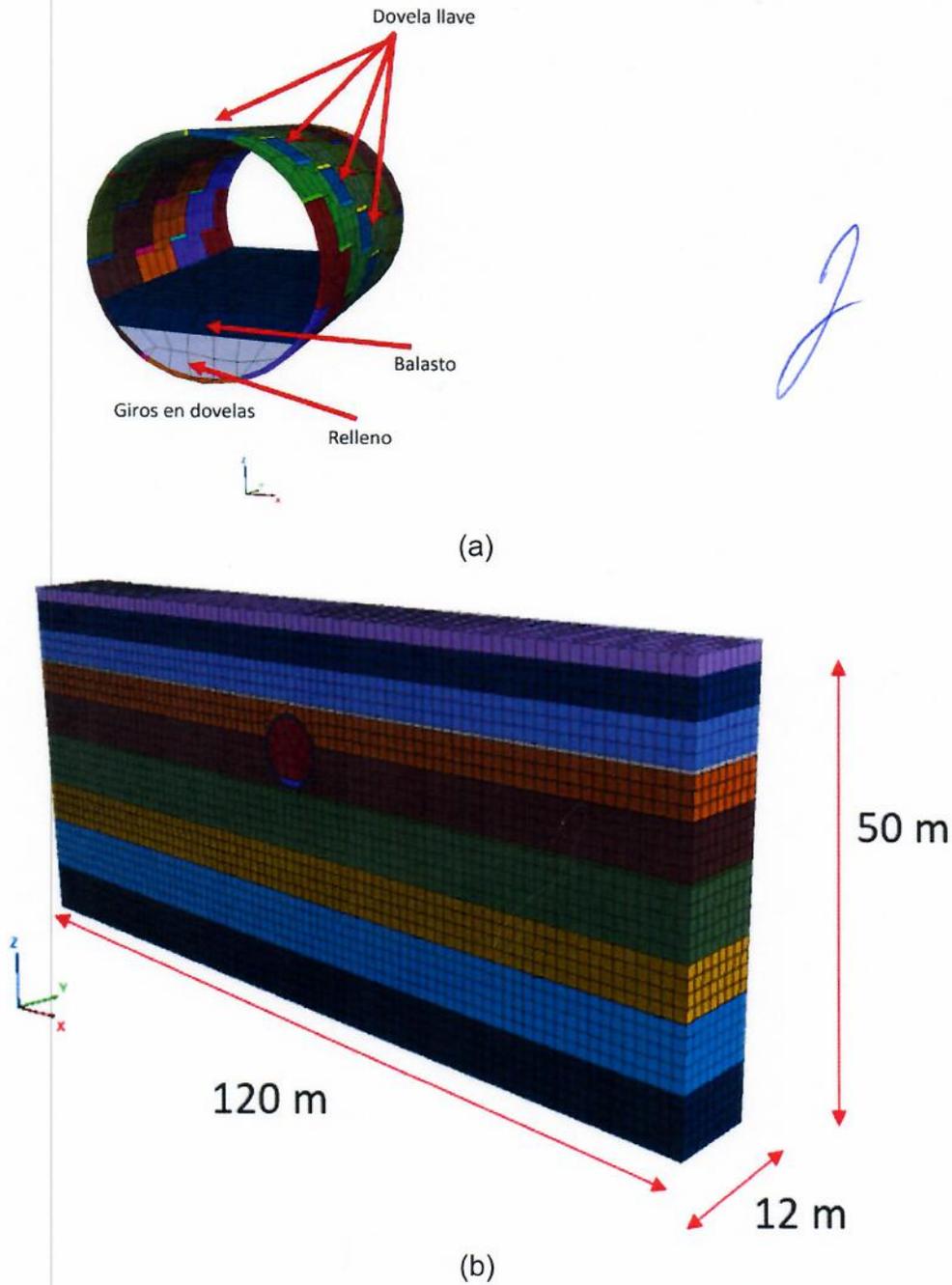
(b)

Figura 2.4.30. (a) Sección transversal C construida (PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00), (b) Sección transversal con cubeta estructural.



Modelo numérico tridimensional de diferencias finitas

Se llevó a cabo un modelo numérico tridimensional de diferencias finitas con el software FLAC^{3D} para evaluar el comportamiento de esta sección ante carga estática, tomando en cuenta los efectos de hundimiento regional a largo plazo. El comportamiento de los geomateriales se consideró gobernado por una ley esfuerzo-deformación elasto-plástica con un criterio de falla Mohr-Coulomb. Para modelar las dovelas y juntas del túnel se utilizaron elementos tipo SHELL, y para el suelo circundante se utilizaron elementos sólidos. Para esta sección se modelaron las condiciones con cubeta estructural y sin cubeta para resaltar la aportación de este elemento estructural en el desempeño del túnel a largo plazo. Las dovelas y sus juntas, así como la rotación de los segmentos de las dovelas, se modelaron con base en lo presentado en el documento 2-081118_IMM_ML12-D-SEG-FW-02_CONCEPT_ESP (Figura 2.4.4). La Figura 2.4.31 presenta la vista general del modelo numérico tridimensional de diferencias finitas, así como el modelado de las dovelas.





Hundimiento regional

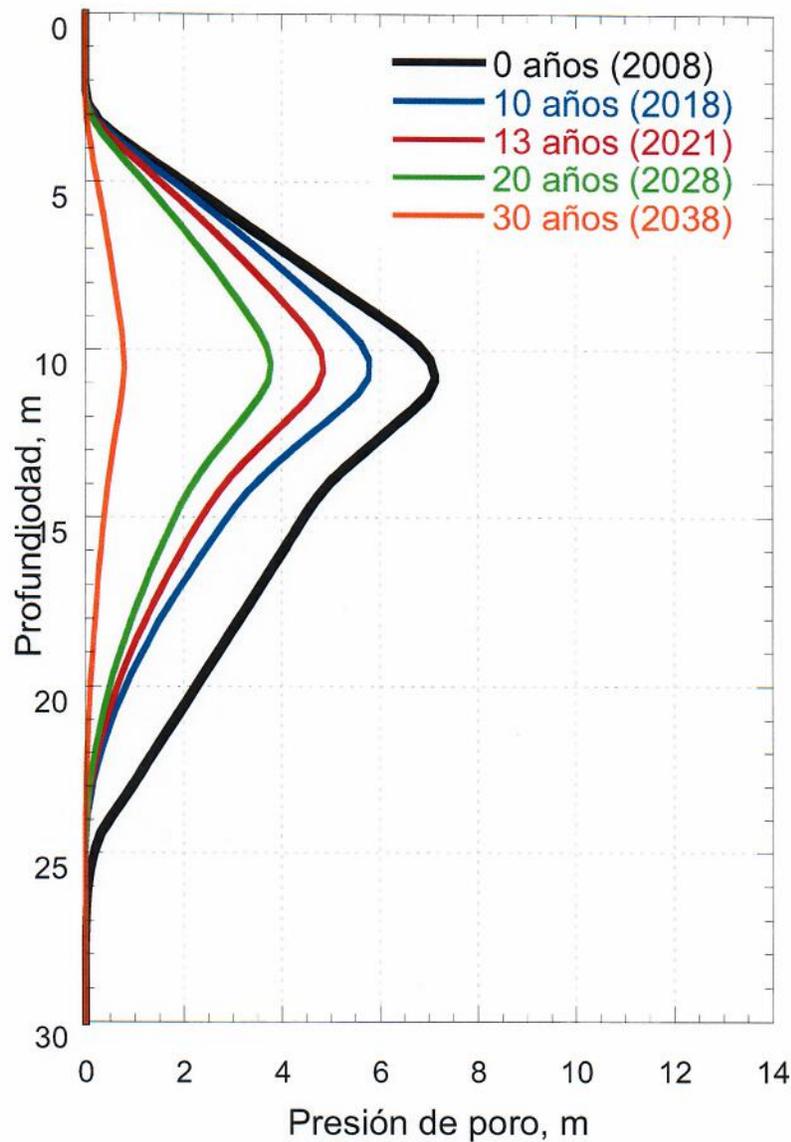
Para establecer la tasa de hundimiento regional al año, se consideró el documento presentado en la Figura 2.4.13, el cual, para esta zona considera una tasa de hundimiento de 2.0 cm/ año con base en mediciones llevadas a cabo en el sitio. La Tabla 2.4.6 presenta los asentamientos calculados para las diversas etapas de análisis consideradas en este estudio.

Tabla 2.4.6 Asentamientos calculados para distintas etapas de análisis

Año	Velocidad del hundimiento regional (cm/año)	0 años (2008)	10 años (2018)	13 años (2021)	20 años (2028)	30 años (2038)	Asentamiento máximo estimado
Hundimiento Regional Sección C (m) 22+400	2.0	0	0.20	0.26	0.40	0.60	0.65 m para 32 años (2042)

Estimación del abatimiento de presiones de poro con el tiempo.

Para estimar el abatimiento de las presiones de poro con el tiempo, se utilizó la metodología presentada para la sección B de análisis. En la Figura 2.4.32 se muestran las distribuciones de presión de poro con la profundidad para cada periodo de tiempo, y para cada caso de análisis.



2

Figura 2.4.32. Isócronas obtenidas en el análisis de consolidación unidimensional para el sitio C

Simulación del hundimiento regional

Para establecer las condiciones a largo plazo de los sitios analizados, se siguió la metodología presentada para la sección B de análisis. En la Figura 2.4.33 se

presenta la variación del coeficiente m_v en el sitio estudiado para a) la rama virgen y b) la rama de recompresión.

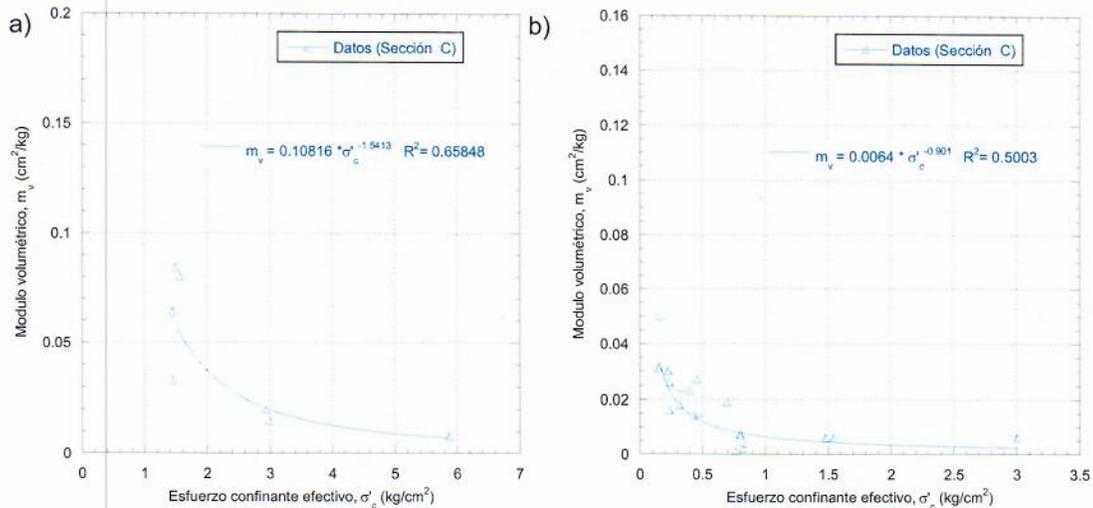


Figura 2.4.33. Variación del coeficiente m_v en el sitio estudiado para a) la rama virgen y b) la rama de recompresión.

En la Figura 2.4.34, se muestran las columnas de suelo simuladas en FLAC^{3D} para la sección C, donde se puede observar que las condiciones estimadas representan acertadamente los asentamientos esperados para cada periodo de tiempo establecido, de acuerdo con la tasa de hundimiento anual establecida para los sitios en estudio.

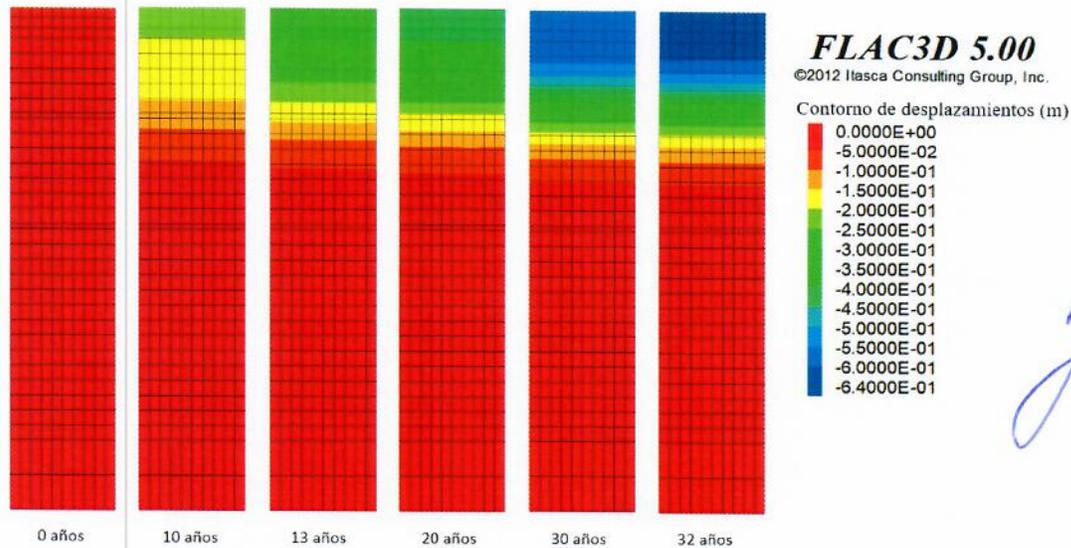
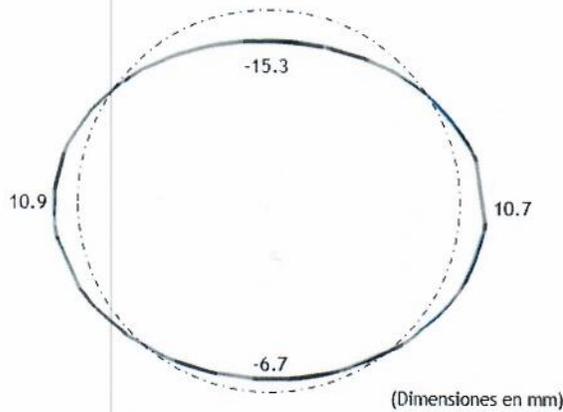


Figura 2.4.34. Asentamientos esperados para cada periodo de tiempo mediante las columnas de suelo simuladas en FLAC^{3D} para el sitio C.

Análisis de resultados

A continuación, se presentan los desplazamientos al interior del túnel para cada tiempo de análisis sin considerar la cubeta (Figuras 2.4.35 a 2.4.39). En las mismas figuras se presenta la sección original, y la deformada para el tiempo de análisis correspondiente. Asimismo, las Figuras 2.4.40 y 2.4.41 presentan los elementos mecánicos para cada condición de análisis, mismos que son afectados por un factor de carga de 1.1 para proyectarlos en el diagrama de interacción de la sección C en estudio. La Figura 2.4.42 presenta el diagrama de interacción nominal, el factorizado por 1.5 con base en la recomendación hecha por la ITA (ITAtch, 2016), y el reducido por factores de resistencia (NTC, 2017), donde se puede observar que las combinaciones máximas de momento flexionante y carga axial caen dentro o sobre la línea de diagrama de interacción factorizado, con un factor de seguridad de 1.5, por lo que no se espera un desempeño inadecuado notorio a largo plazo ante carga sostenida. Por último, se presentan los resultados considerando la aportación de la cubeta (Figuras 2.4.43 a 2.4.45) donde se puede ver claramente el impacto positivo que tiene la cubeta estructural en la reducción de los elementos mecánicos para las condiciones de carga estática tomando en cuenta el hundimiento regional a largo plazo.

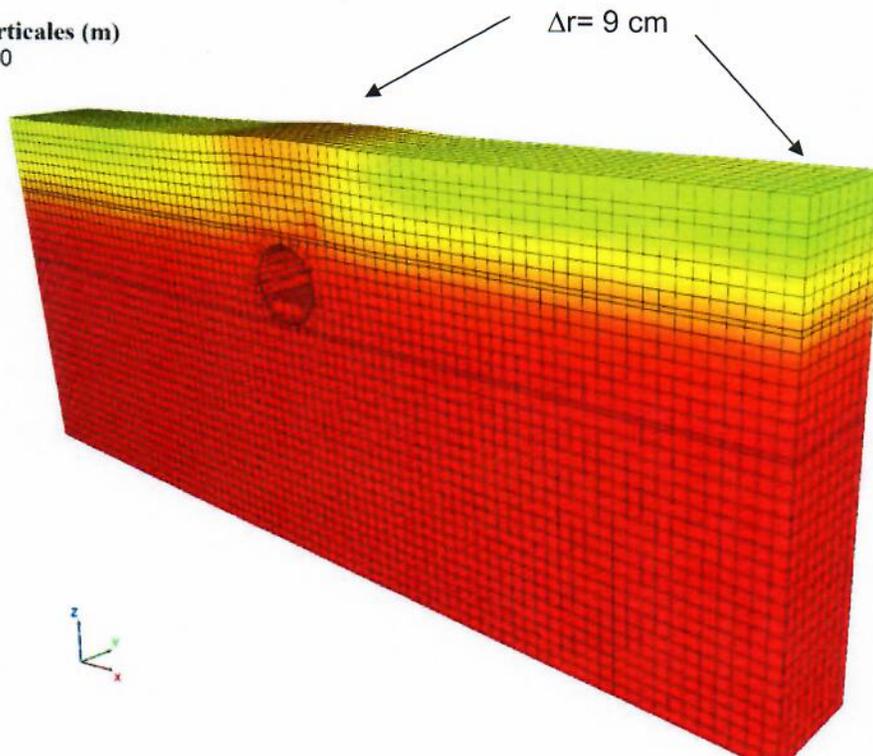
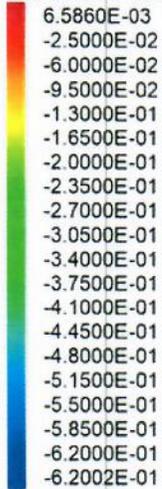
Deformaciones por Consolidación a 10 años (sin cubeta)



Sección original - - - - -
Sección deformada ———

Dovelas deformadas

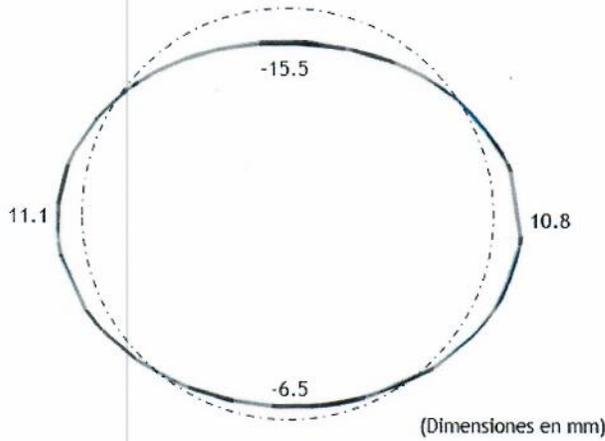
Desplazamientos verticales (m)
Deformed Factor: 10



Malla deformada

Figura 2.4.35. Desplazamientos verticales para la consolidación a 10 años.

Deformaciones por Consolidación a 13 años (sin cubeta)



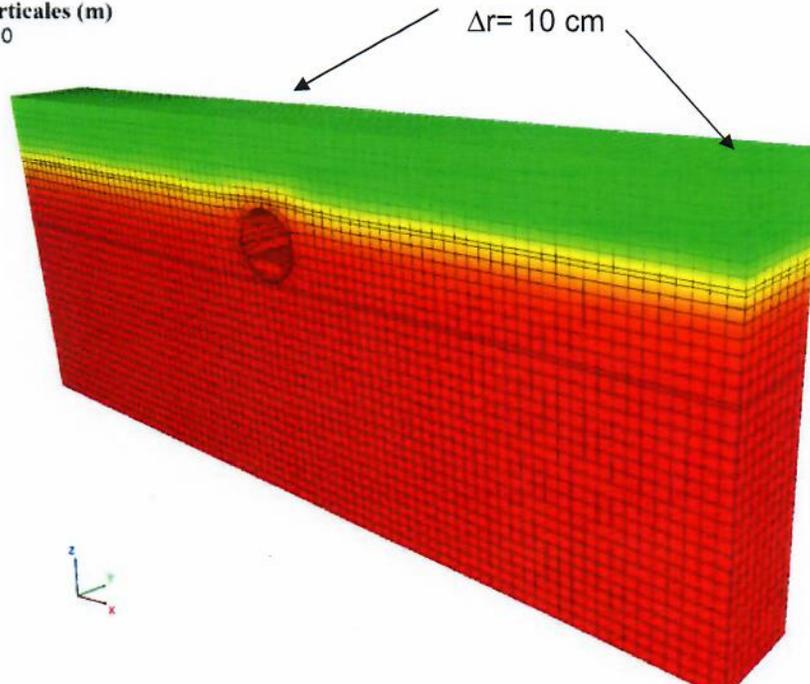
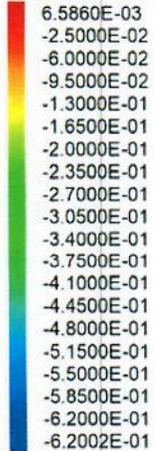
Sección original - - - - -

Sección deformada ———

Dovelas deformadas

Desplazamientos verticales (m)

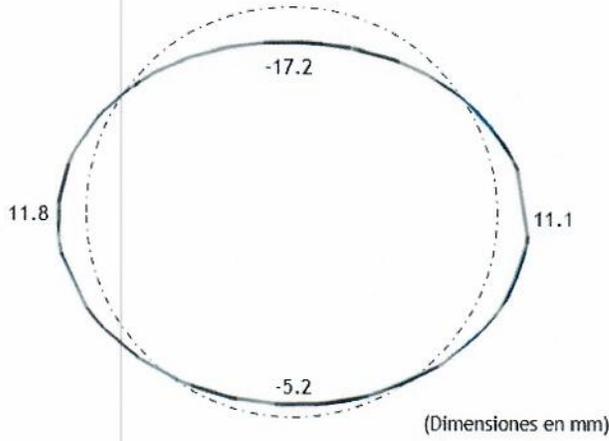
Deformed Factor: 10



Malla deformada

Figura 2.4.36. Desplazamientos verticales para la consolidación a 13 años.

Deformaciones por Consolidación a 20 años (sin cubeta)

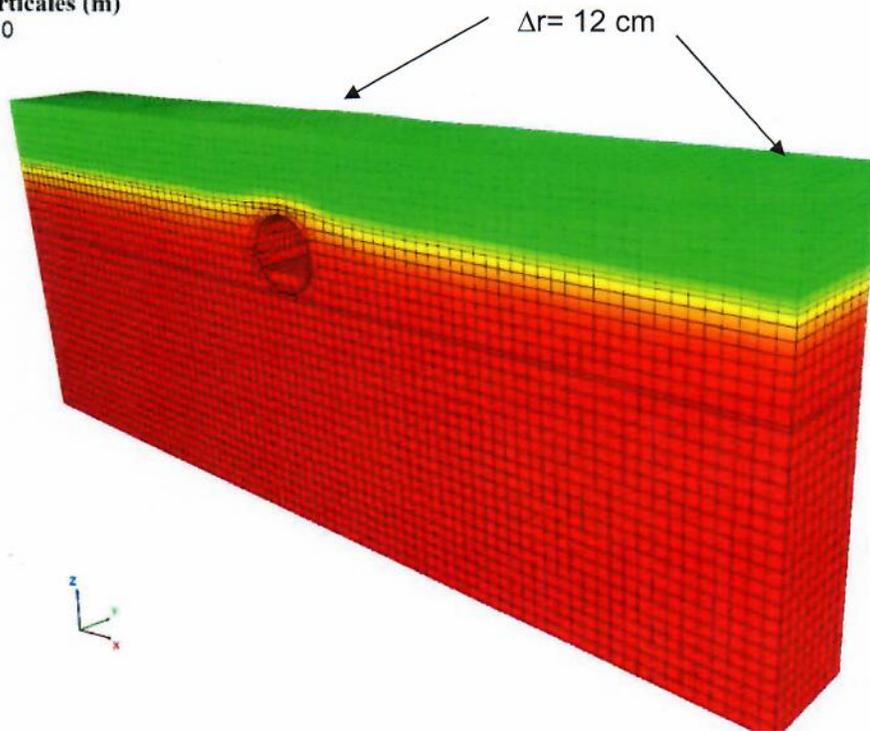
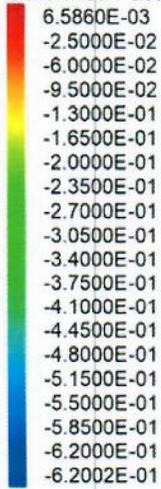


Sección original
Sección deformada ———

Dovelas deformadas

Desplazamientos verticales (m)

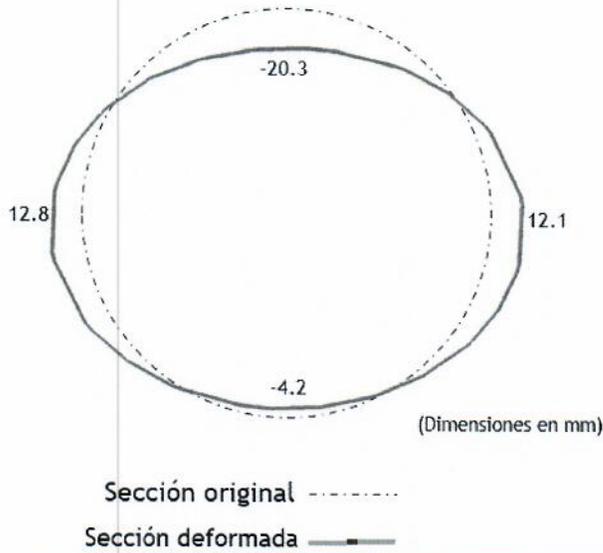
Deformed Factor: 10



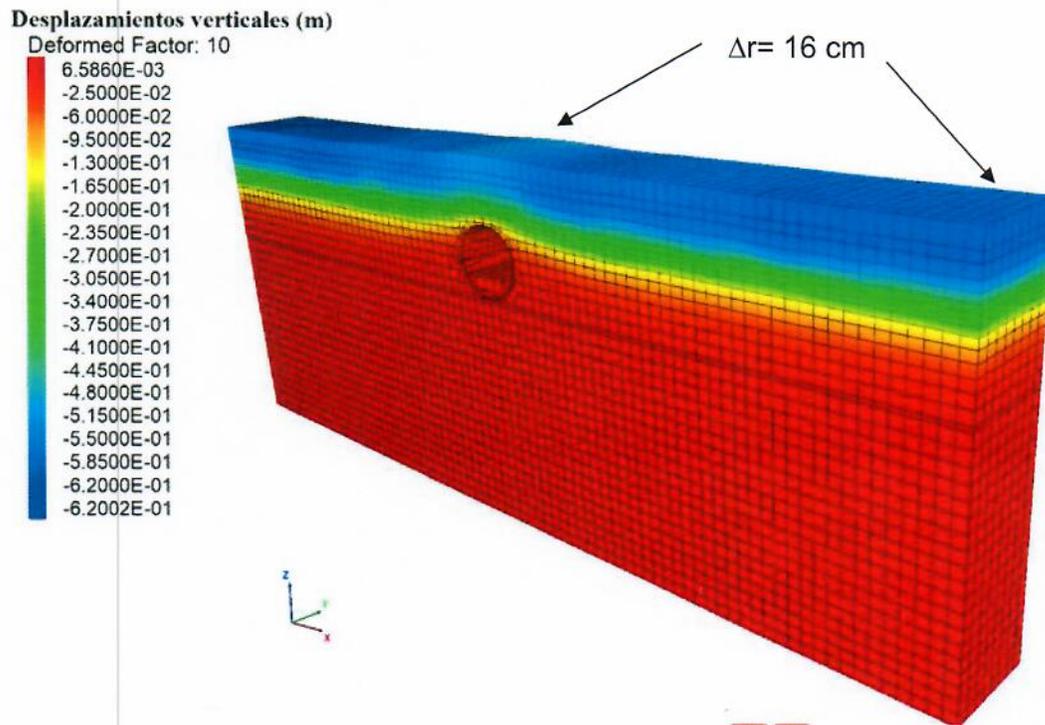
Malla deformada

Figura 2.4.37. Desplazamientos verticales para la consolidación a 20 años.

Deformaciones por Consolidación a 30 años (sin cubeta)



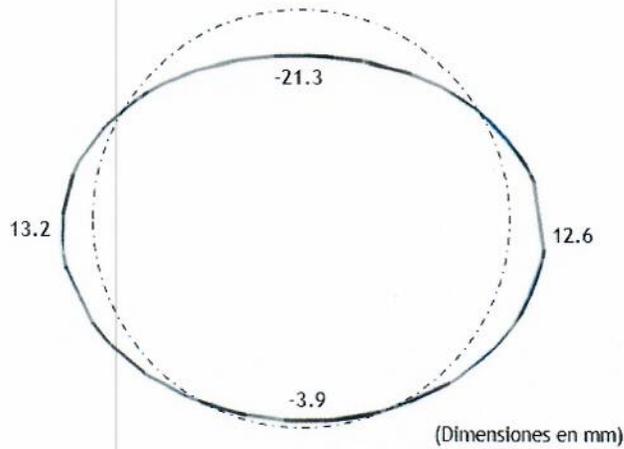
Dovelas deformadas



Malla deformada

Figura 2.4.38. Desplazamientos verticales para la consolidación a 30 años.

Deformaciones por Consolidación a 32 años (sin cubeta)

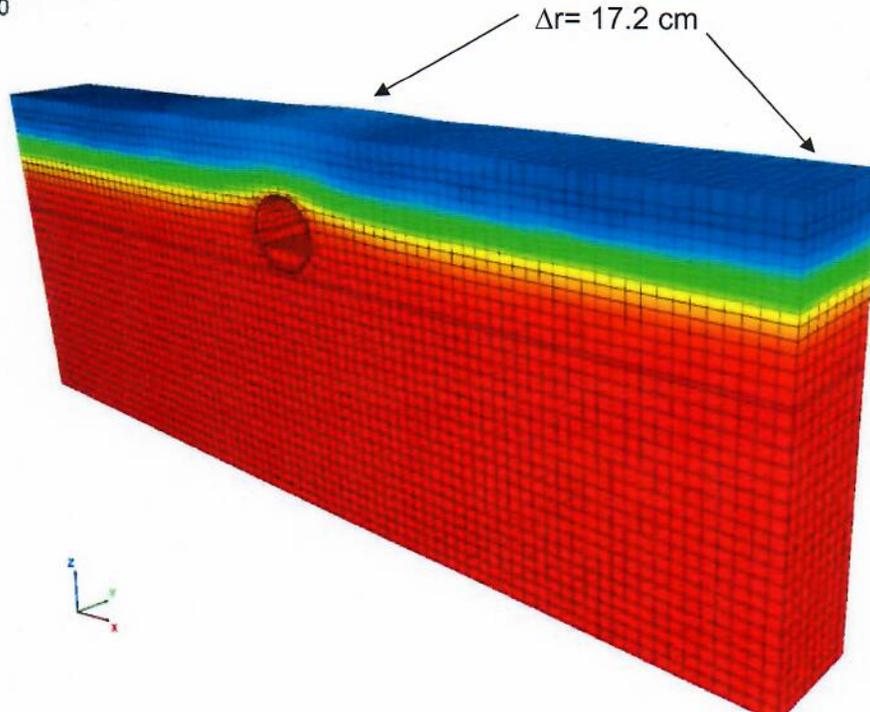
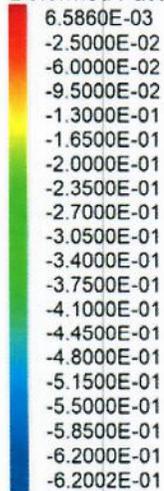


Sección original
Sección deformada ———

Dovelas deformadas

Desplazamientos verticales (m)

Deformed Factor: 10



Malla deformada

Figura 2.4.39. Desplazamientos verticales para la consolidación a 32 años.

Elementos mecánicos (sin cubeta)

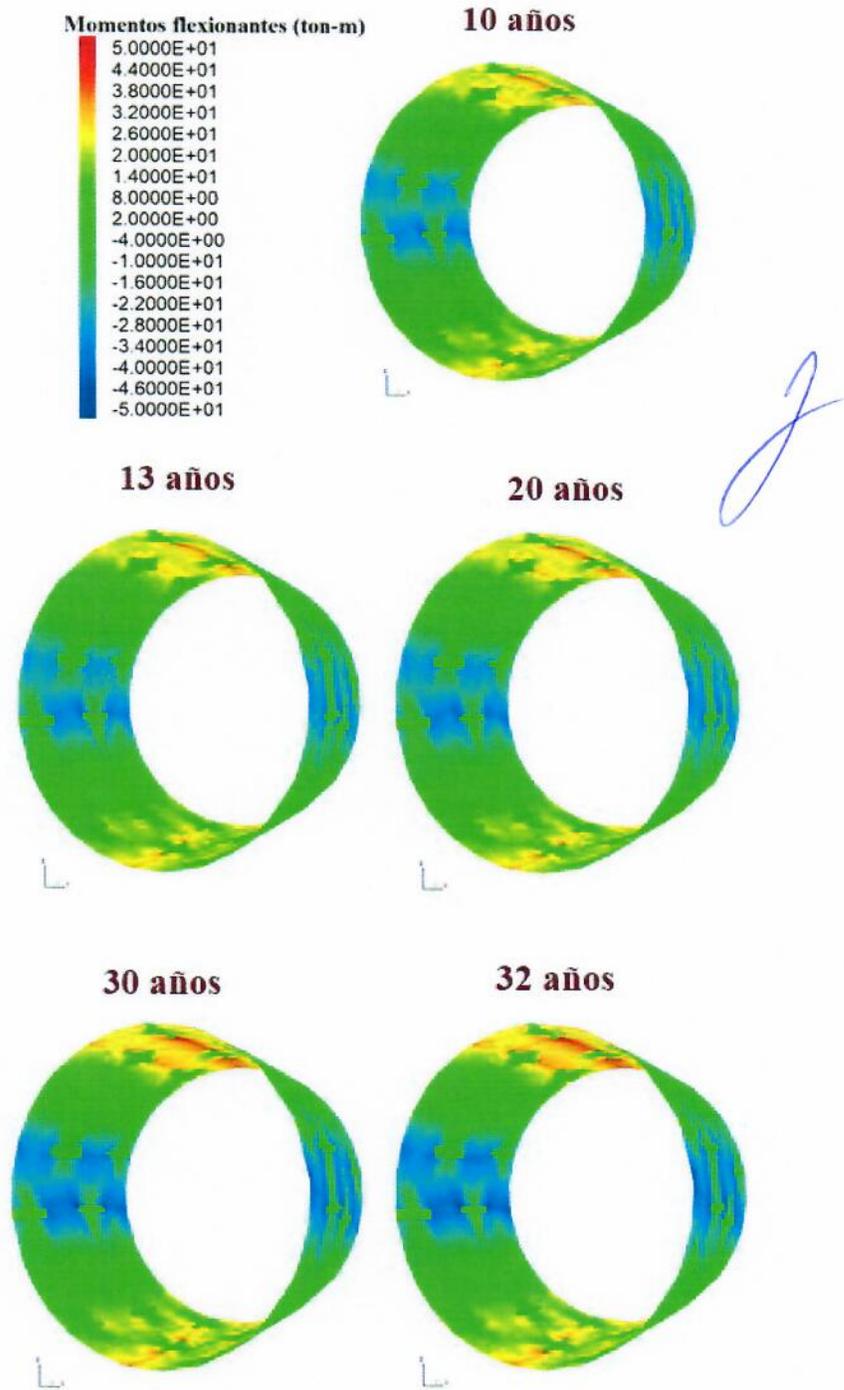


Figura 2.4.40. Elementos mecánicos para la sección de análisis C sin cubeta estructural

Fuerzas axiales (sin cubeta)

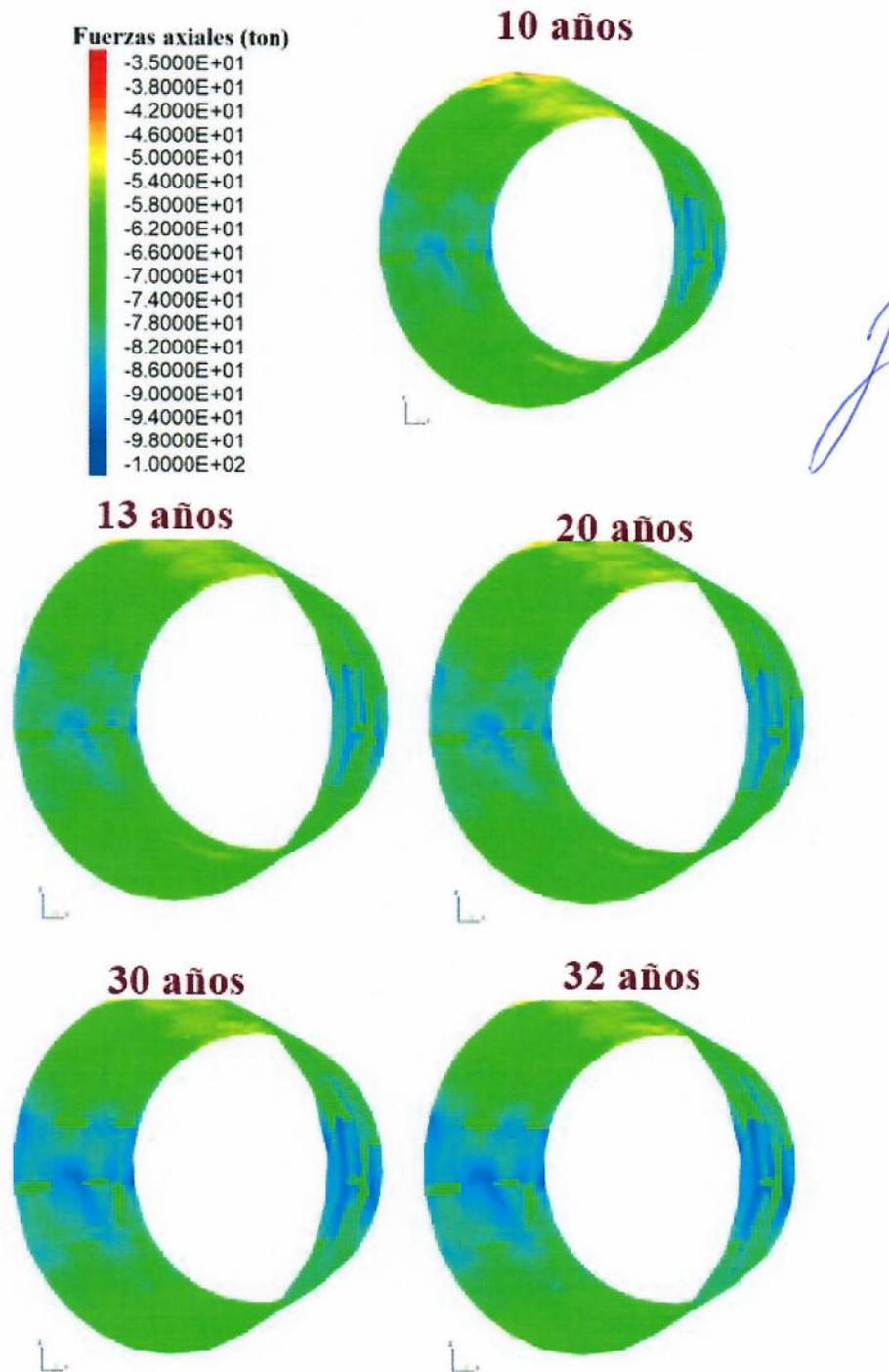


Figura 2.4.41. Elementos mecánicos para la sección de análisis C sin cubeta estructural

Diagrama de interacción con elementos mecánicos (sin cubeta)

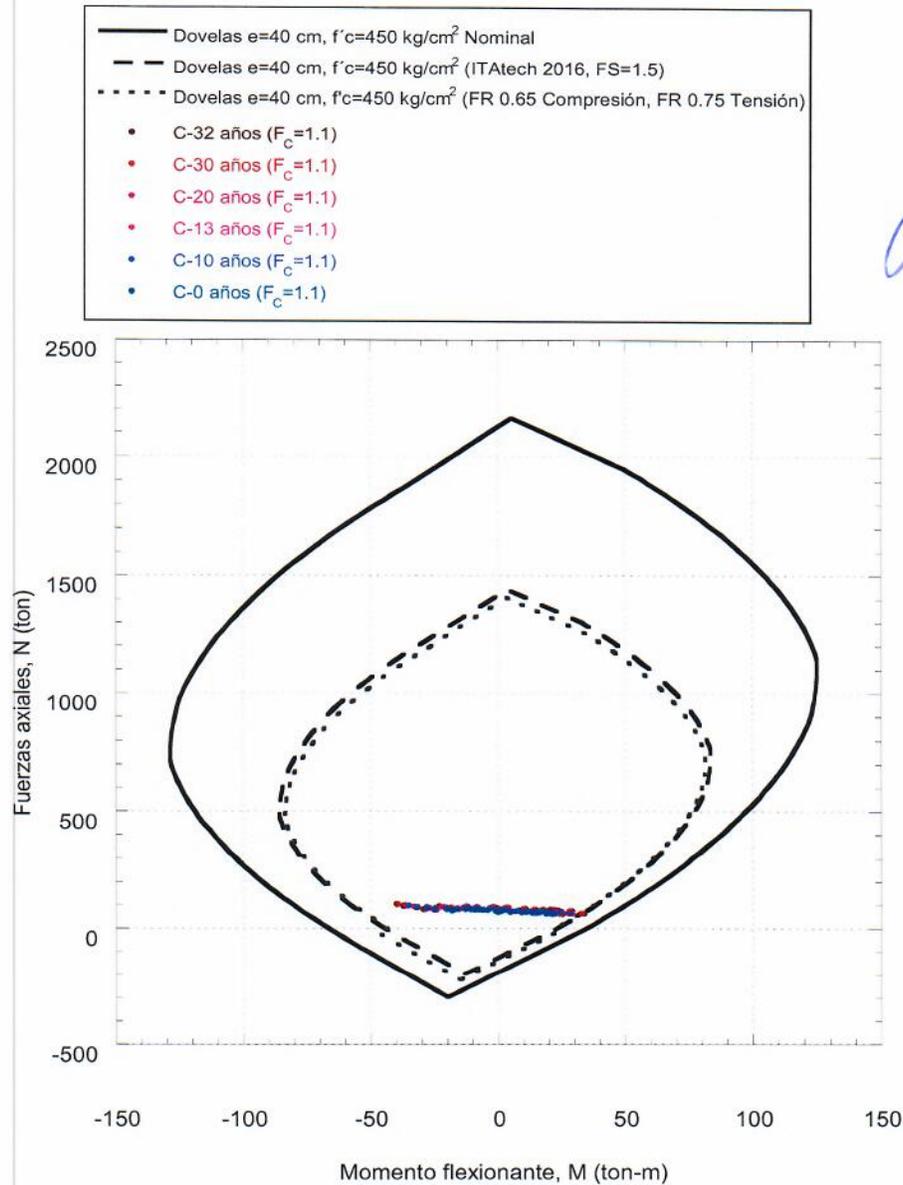
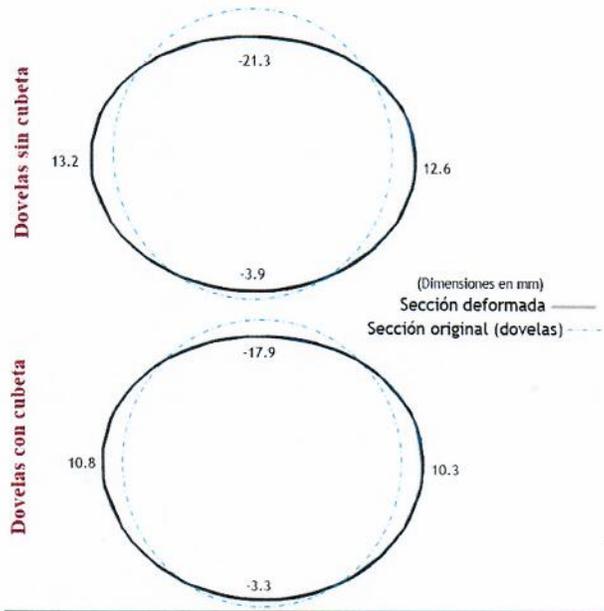


Figura 2.4.42. Diagramas de interacción nominal, factorizado por 1.5 (ITAtch, 2016), y reducido por factores de resistencia (NTC, 2017).



Desplazamientos verticales (m)

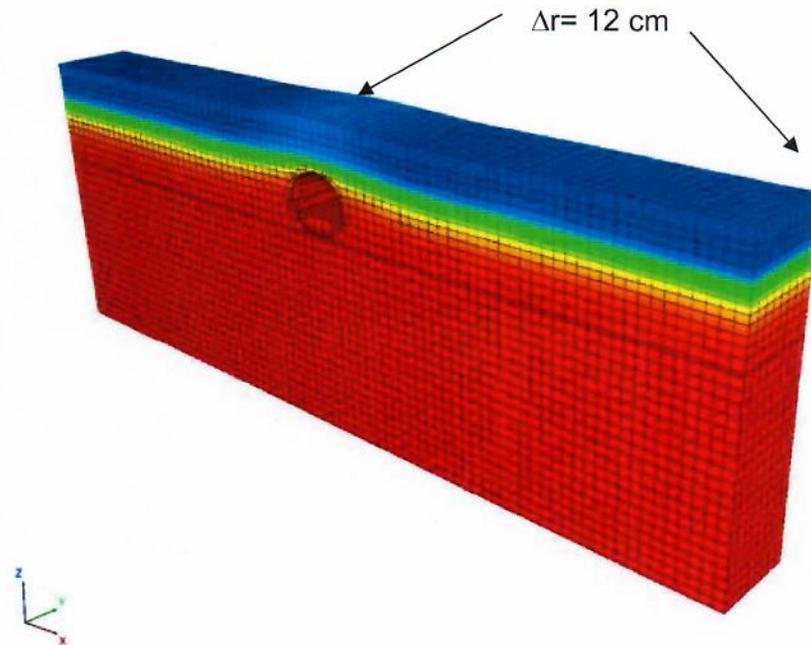
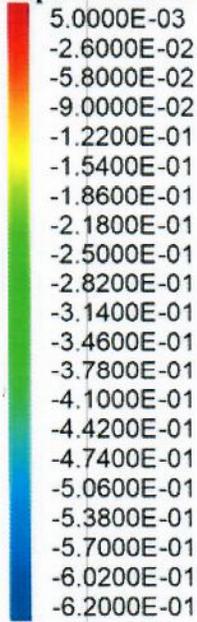


Figura 2.4.43. Comparación de deformaciones a 32 años, considerando la cubeta estructural.

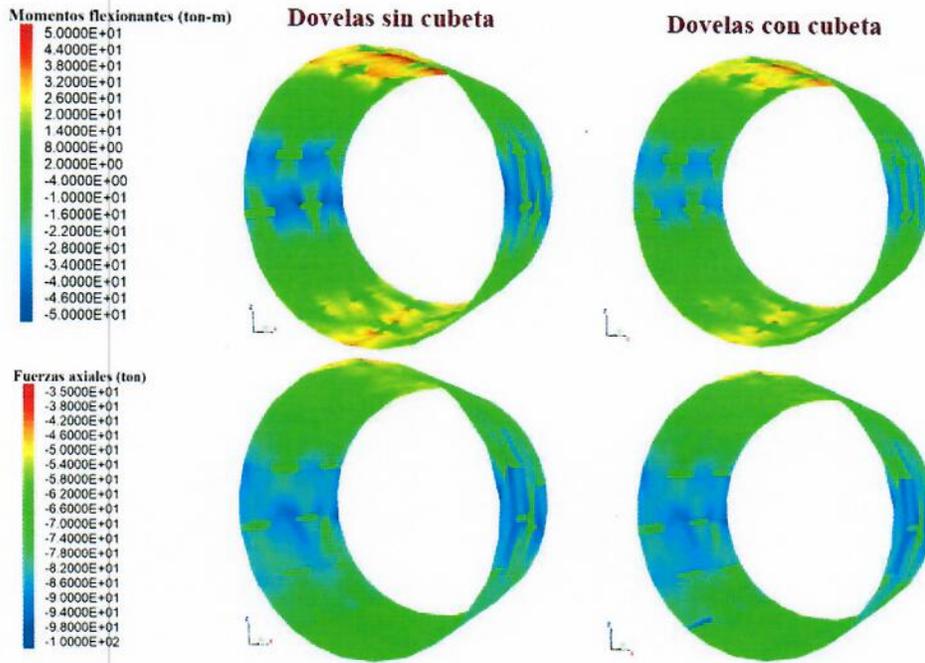


Figura 2.4.44. Comparación de elementos mecánicos a 32 años, considerando la cubeta estructural.

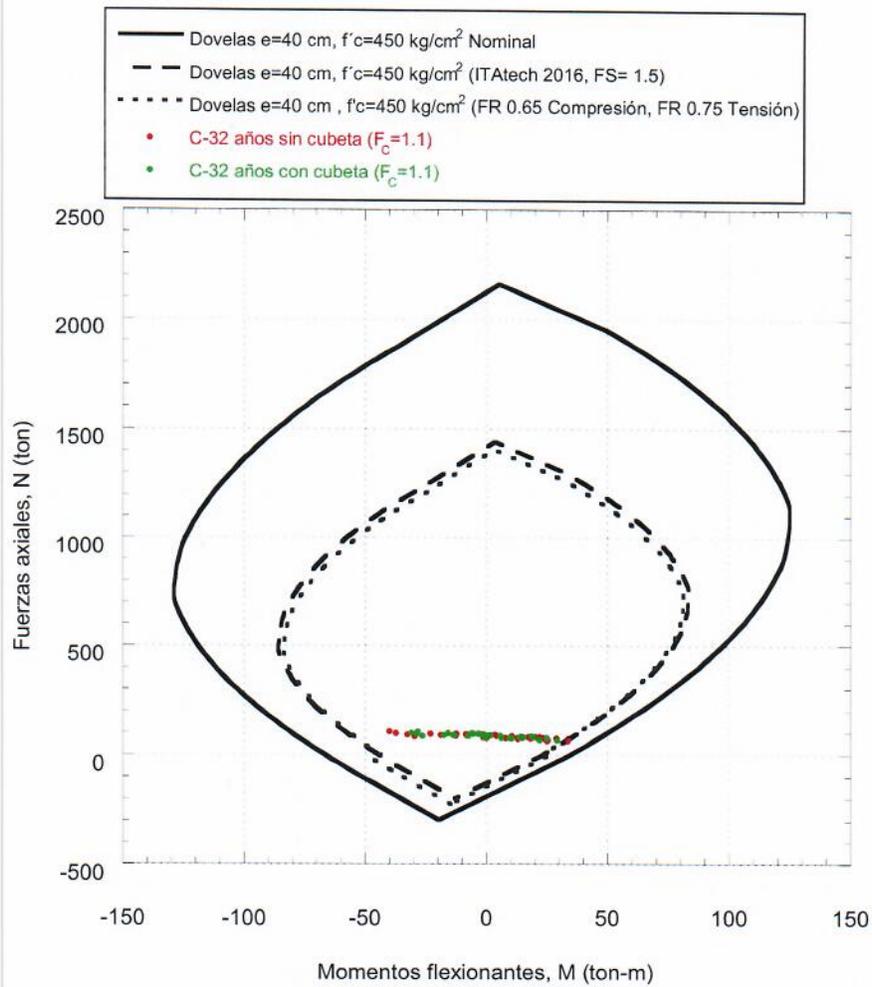


Figura 2.4.45 Diagramas de interacción nominal, factorizado por 1.5 (ITAtch, 2016), y reducido por factores de resistencia (NTC, 2017), para la sección de análisis sin y con cubeta estructural.



2.4.4 Sección D Pk. 27+100

La caracterización de las condiciones geotécnicas de la sección D del tramo de túnel de la Línea 12 del metro, se realizó con base en la información de campo y laboratorio proporcionada por ICA. En la Figura 2.4.46 se muestra el perfil de suelo, la distribución pesos volumétricos, el número de golpes de la prueba de penetración estándar, SPT, en función de la profundidad, incluyendo la descripción de cada estrato para las secciones de análisis.

En el perfil estratigráfico detallado de la sección D (Figura 2.4.46) se puede apreciar que existe un relleno superficial de 1.2 m de espesor. Por debajo de este estrato y hasta los 9 m de profundidad se encuentra un depósito aluvial conformado por arcilla arenosa de baja plasticidad y consistencia media a firme color café oscuro con fragmentos de grava y números de golpes mayores a 50. Posterior, se presenta un lente de 1 m de arcilla lacustre, con un ángulo de fricción interna de 20° y una cohesión de 39 kN/m^2 . A partir de los 10 m y hasta la profundidad de exploración, se tiene un estrato de toba volcánica conformada por arenas limosas muy compactas con fragmentos de gravas angulosas y algunos lentes de arena pumítica, con números de golpes mayores a 50. La Tabla 2.4.7 presenta los parámetros de resistencia y deformabilidad empleados en los análisis numéricos obtenidos de planos "as-built" (PMDF-12-MS-612285-IV-0007-01600-P-AB).

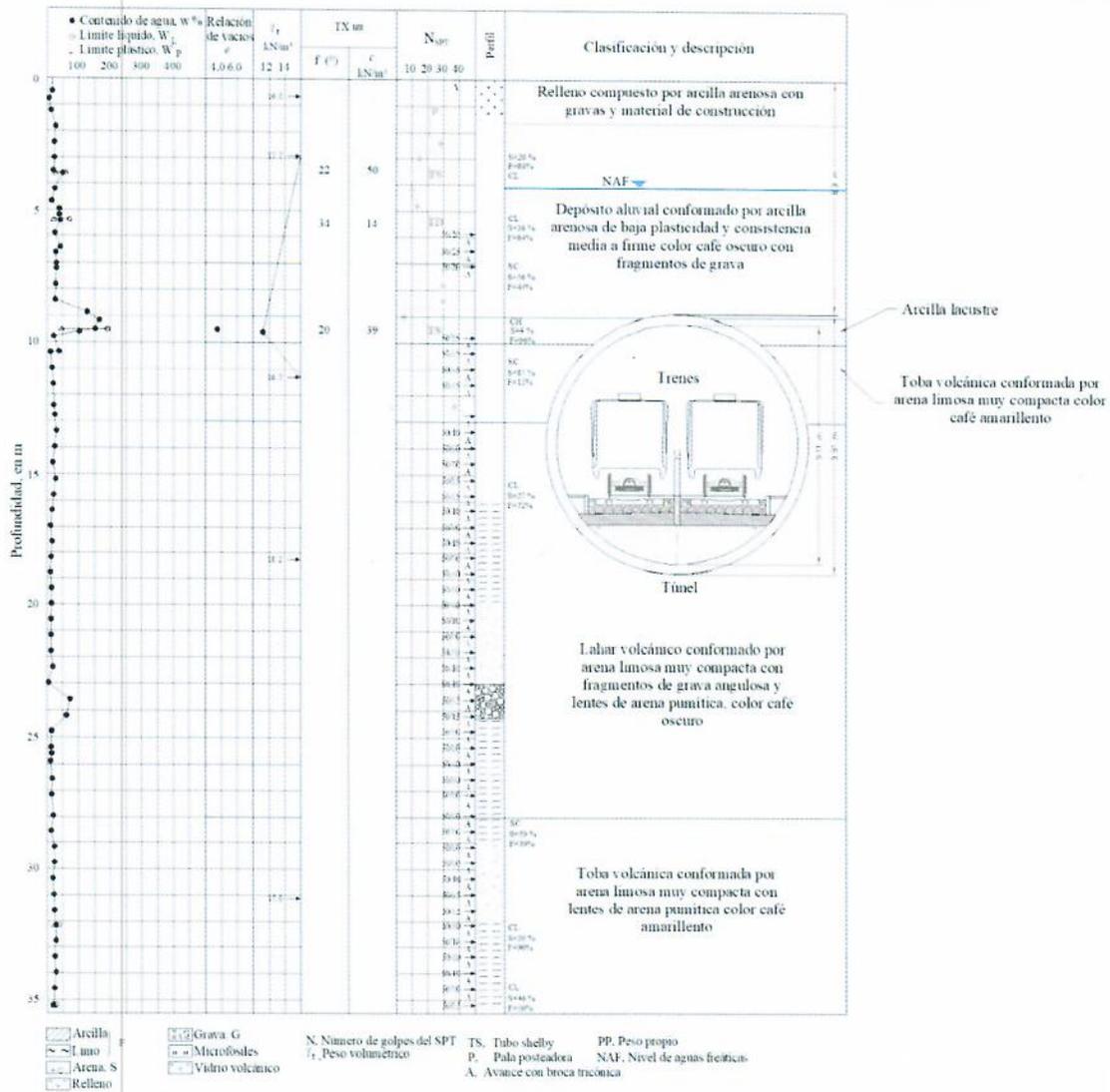


Figura 2.4.46. Perfil de suelo de la sección D.

Tabla 2.4.7. Propiedades mecánicas de resistencia y deformabilidad para la zona en estudio (PMDF-12-MS-612285-IV-0007-01600-P-AB)

Profundidad, [m]		Peso volumétrico	Parámetros de resistencia		E
De	A	γ [t/m^3]	c_u [kPa]	φ [°]	[kPa]
0.00	1.50	1.65	0.50	24	900
1.50	9.00	1.80	2.70	11	1550
9.00	10.00	1.13	3.60	5	200
10.00	13.00	1.70	6.00	27	5200
13.00	28.00	1.85	12.0	34	15000
28.00	35.00	1.73	8.00	32	7500
35.00	50.00	1.85	10.0	34	12000

- φ : Ángulo de fricción interna
- E: Módulo de elasticidad
- c_u : Resistencia al cortante no drenada

La sección transversal del túnel construida en la zona D se presenta en la Figura 2.4.47a (PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00), misma que consiste en una sección circular de 9.91 m de diámetro, y un recubrimiento a base de dovelas prefabricadas sin cubeta estructural. Esta sección fue considerada para el modelado numérico de esta zona. Adicionalmente, para este caso en particular, la sección fue analizada también considerando una cubeta con concreto fluido con un $f'c = 100$ kg/cm^2 , para cuantificar la aportación de este elemento estructural en el desempeño del túnel (Figura 2.4.47b). Adicionalmente, se llevaron a cabo análisis paralelos a estos, considerando las propiedades mecánicas de resistencia y deformabilidad del suelo presentadas por ICA (PMDF-09-EST-612000-III-0025-03521-M-00 26775-28074). En la Tabla 2.4.8 se presentan las propiedades establecidas por ICA para sus análisis.

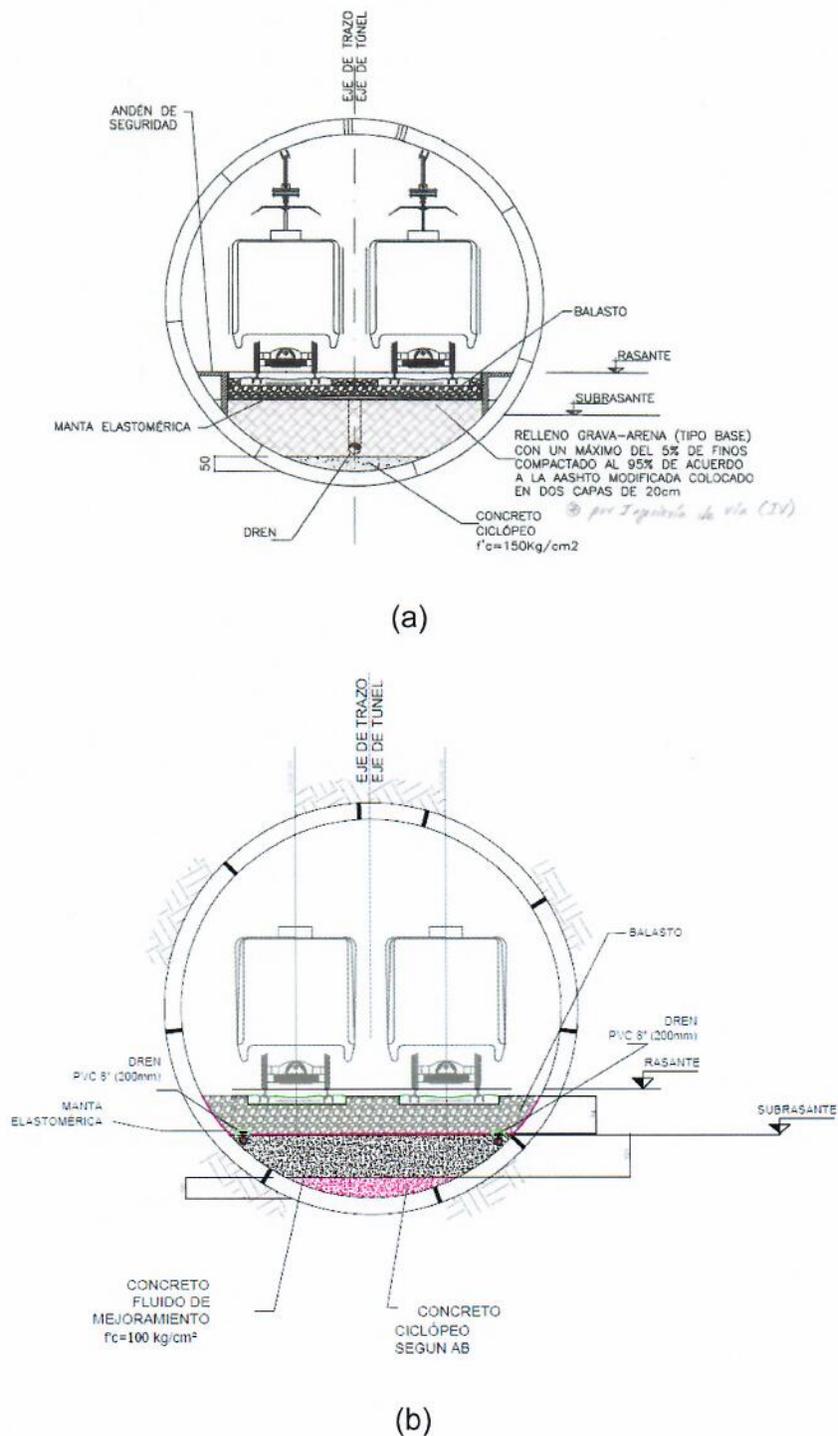


Figura 2.4.47. (a) Sección transversal D construida (PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00) y (b) sección con cubeta de relleno fluido.

Tabla 2.4.8. Propiedades mecánicas de resistencia y deformabilidad para la zona en estudio usadas por ICA (PMDF-09-EST-612000-III-0025-03521-M-00 26775-28074)

Profundidad, [m]		Peso volumétrico	Parámetros de resistencia		E
De	A	γ [t/m^3]	c_u [kPa]	φ [°]	[kPa]
0.00	1.25	-	-	-	
1.25	6.00	1.86	1.58	9.3	120
6.00	9.00	1.88	2.00	7	150
9.00	11.25	1.90	3.25	7.1	245.45
11.25	14.00	1.93	0.59	32.8	1394.29
14.00	17.00	1.95	6.43	35	1462.86
17.00	50.00	1.96	6.56	35.3	1542.86

- φ : Ángulo de fricción interna
- E: Módulo de elasticidad
- c_u : Resistencia al cortante no drenada

Modelo numérico tridimensional de diferencias finitas

Se llevaron a cabo modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas con el software FLAC^{3D} para evaluar el comportamiento de esta sección ante carga estática. El comportamiento de los geomateriales se consideró gobernado por una ley esfuerzo-deformación elasto-plástica con un criterio de falla Mohr-Coulomb. Para modelar las dovelas y juntas del túnel se utilizaron elementos tipo SHELL, y para el suelo circundante se utilizaron elementos sólidos. Para esta sección se modelaron las condiciones sin y con cubeta de relleno fluido para resaltar la aportación de este elemento estructural en el desempeño del túnel ante carga estática. Las dovelas y sus juntas, así como la rotación de los segmentos de las dovelas, se modelaron con base en lo presentado en el documento 2-081118_IMM_ML12-D-SEG-FW-02_CONCEPT_ESP (Figura 2.4.4). La Figura 2.4.48 presenta la vista general del modelo numérico tridimensional de diferencias finitas, así como el modelado de las dovelas. Asimismo, para estos análisis, se consideraron sobrecargas en superficie debidas a la presencia de edificios altos en esta zona, y a su cercanía con el trazo del túnel (6 y 22.5 ton/m² para considerar la

aportación de 2 edificios a los costados del trazo del túnel, y de 1.5 ton/m^2 sobre el trazo del túnel para considerar la carga que aportaría la Av. Félix Cuevas).

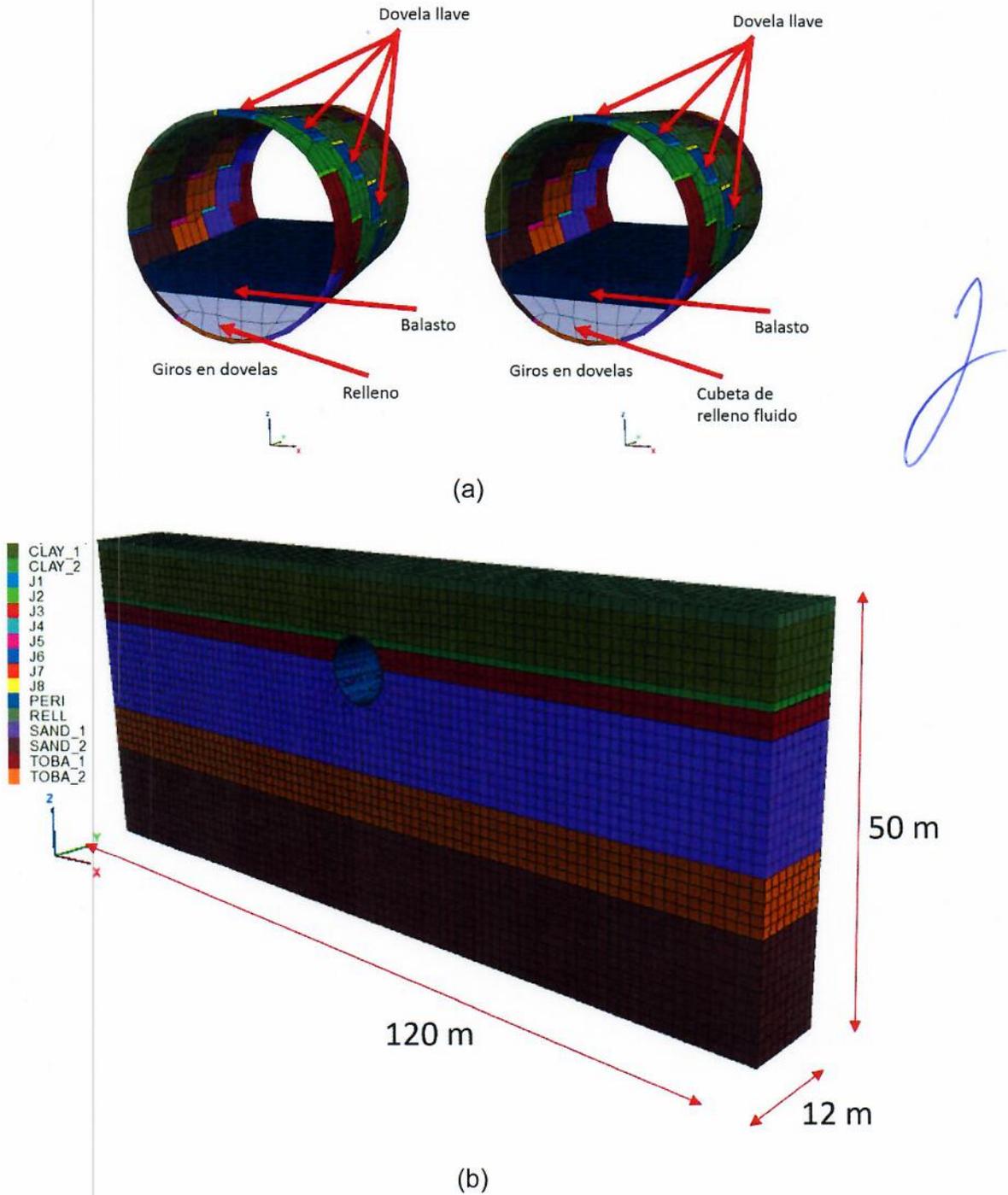


Figura 2.4.48. Modelo numérico tridimensional de diferencias finitas de la sección D (a) modelado del revestimiento y (b) vista general del modelo.

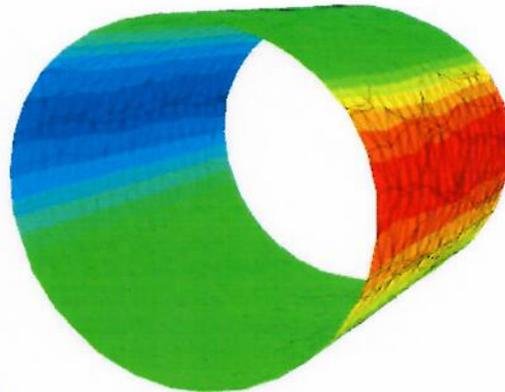
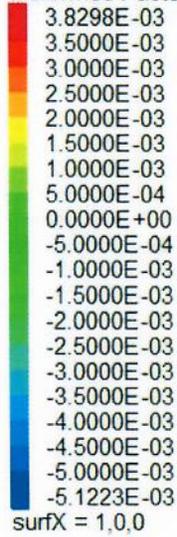


Análisis de resultados

A continuación, se presentan los desplazamientos transversales al interior del túnel para cada caso de análisis sin y con la cubeta de relleno fluido (Figuras 2.4.49 a 2.4.50). En estas figuras se comparan los casos sin y con cubeta de relleno fluido considerando las propiedades presentadas en los planos "as-built" y las presentadas por ICA, donde se pueden observar desplazamientos máximos de 0.9 cm para el caso con propiedades de planos "as-built", y de 2.5 cm para el caso con las propiedades consideradas por ICA. Asimismo, las Figuras 2.4.51 y 2.4.52 presentan la comparación de los desplazamientos verticales superficiales, y las Figuras 2.4.53 y 2.4.54 la comparación de esfuerzos verticales para los mismos casos de análisis. Finalmente, las Figuras 2.4.55 y 2.4.56 presentan los diagramas de interacción nominal, el factorizado por 1.5 con base en la recomendación hecha por la ITA (ITAttech, 2016), y el reducido por factores de resistencia (NTC, 2017), para la sección D en estudio junto con los elementos mecánicos afectados por un factor de carga de 1.1, donde se puede observar que algunas combinaciones de momento flexionante y carga axial caen en el límite del diagrama de interacción factorizado considerando las propiedades de ICA (PMDF-09-EST-612000-III-0025-03521-M-00 26775-28074). Asimismo, los elementos mecánicos obtenidos con las propiedades de planos "as-built" (PMDF-12-MS-612285-IV-0007-01600-P-AB) caen dentro del diagrama de interacción factorizado, por lo que se podría anticipar un comportamiento aceptable del revestimiento ante carga estática para esta zona.

Shell X-Displacement

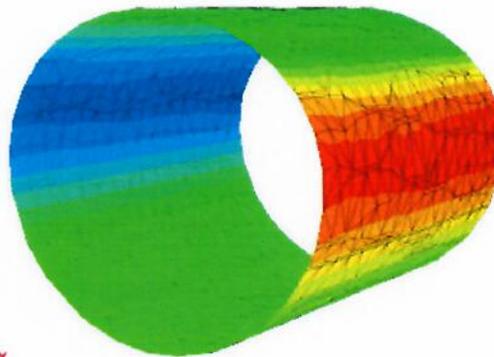
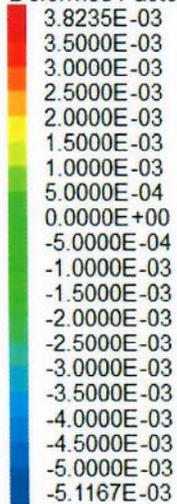
Deformed Factor: 50



(a)

Shell X-Displacement

Deformed Factor: 50

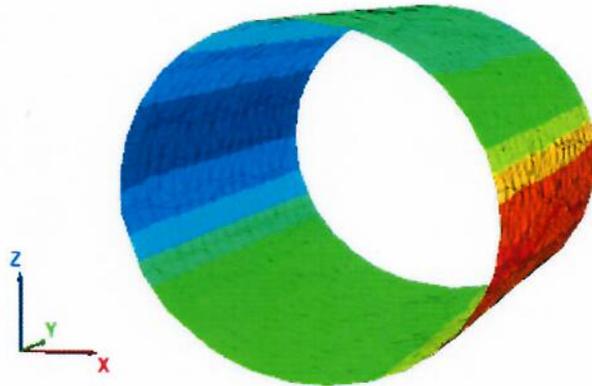
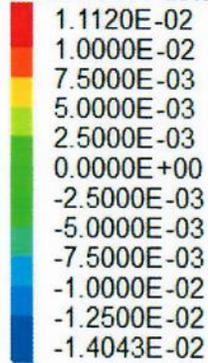


(b)

Figura 2.4.49. Desplazamientos transversales del túnel (a) sin cubeta y (b) con cubeta de relleno fluido considerando las propiedades de planos “as-built” (desplazamientos en metros).

Shell X-Displacement

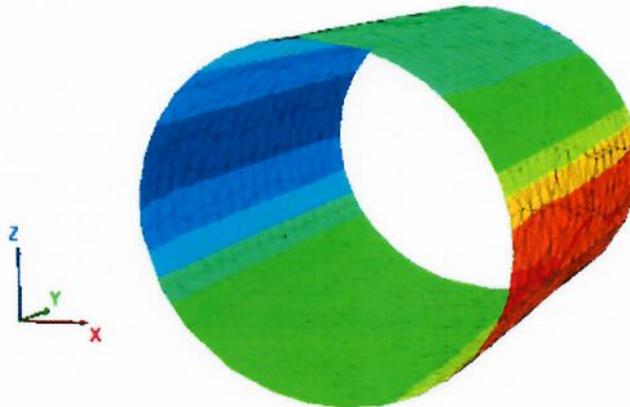
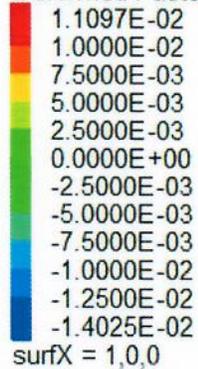
Deformed Factor: 20



(a)

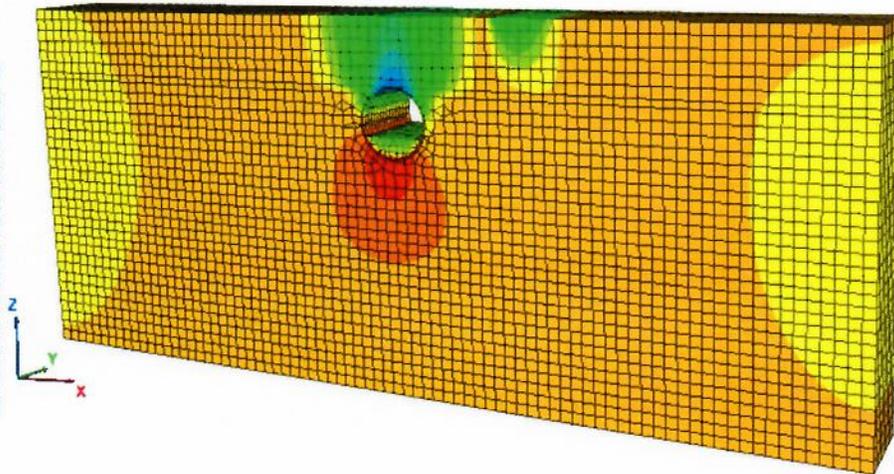
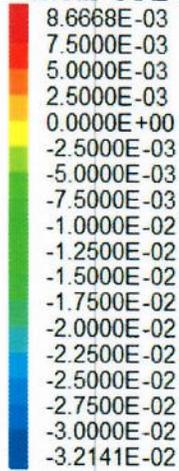
Shell X-Displacement

Deformed Factor: 20

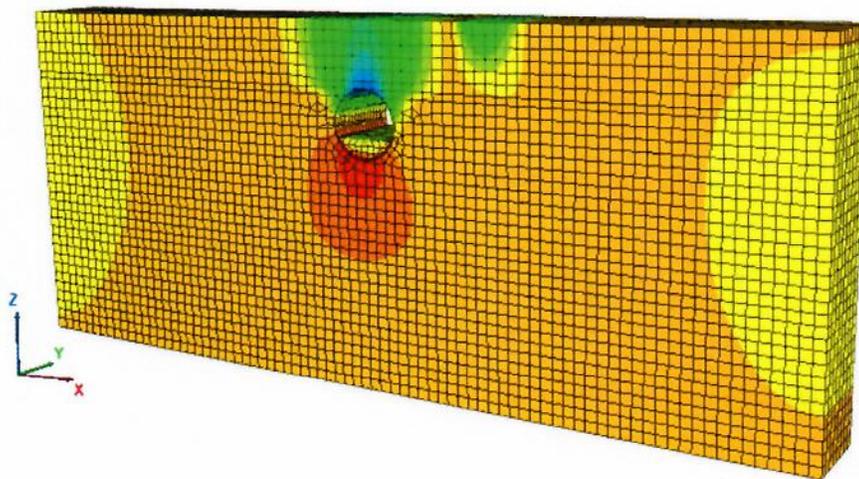
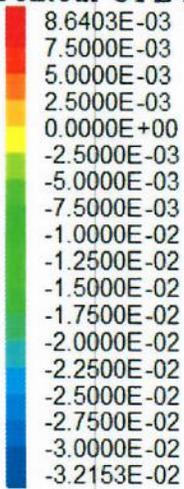


(b)

Figura 2.4.50. Desplazamientos transversales del túnel (a) sin cubeta y (b) con cubeta de relleno fluido considerando las propiedades de ICA (desplazamientos en metros).

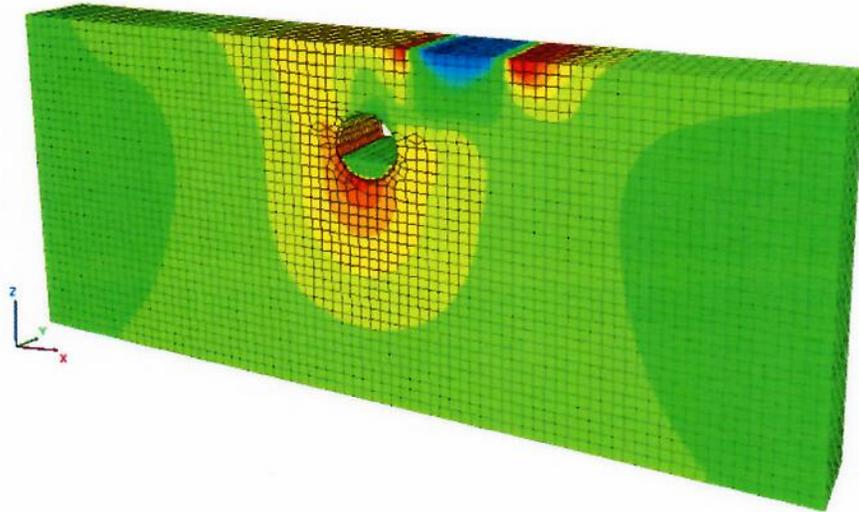
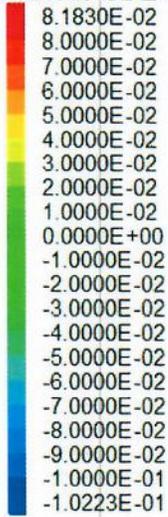
Contour Of Z-Displacement

(a)

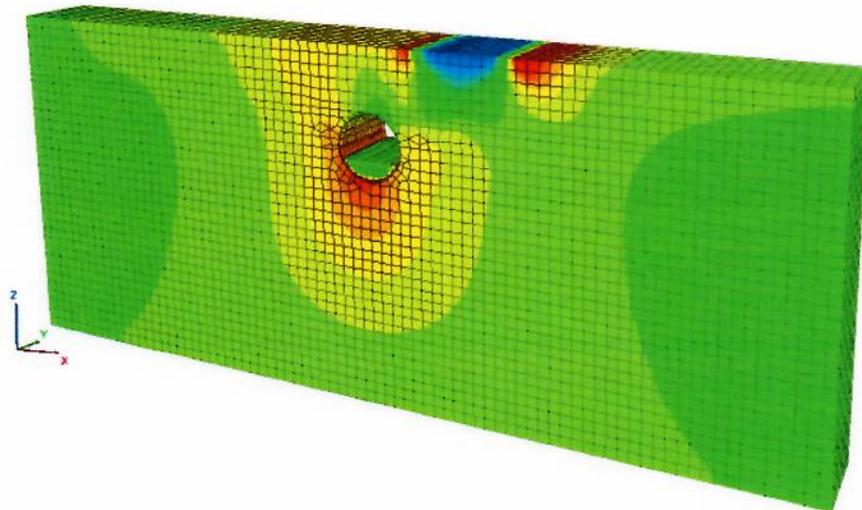
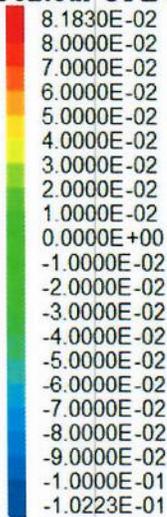
Contour Of Z-Displacement

(b)

Figura 2.4.51. Desplazamientos superficiales (a) sin cubeta y (b) con cubeta de relleno fluido considerando las propiedades de planos "as-built" (desplazamientos en metros).

Contour Of Z-Displacement

(a)

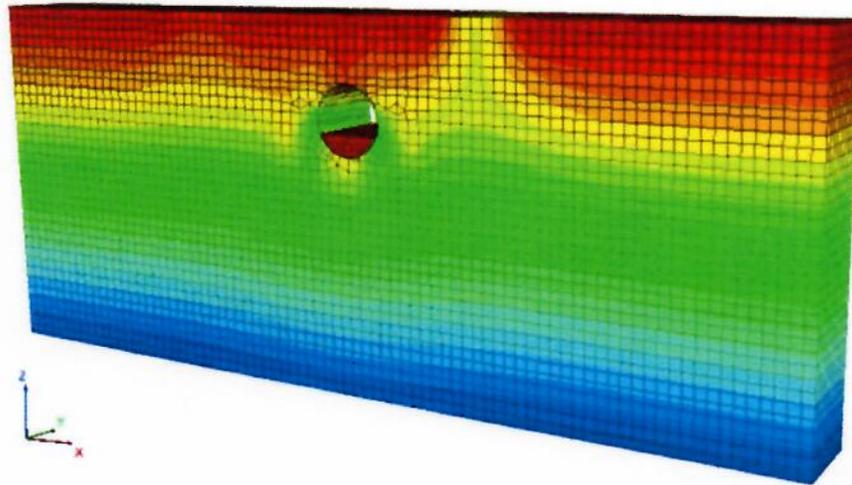
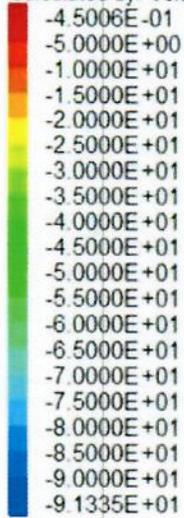
Contour Of Z-Displacement

(b)

Figura 2.4.52. Desplazamientos superficiales (a) sin cubeta y (b) con cubeta de relleno fluido considerando las propiedades de ICA (desplazamientos en metros).

Contour of ZZ-Stress

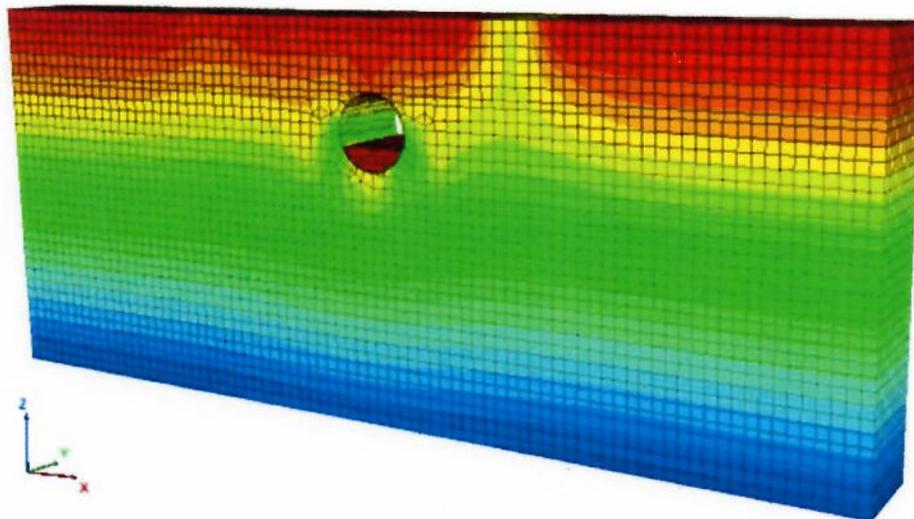
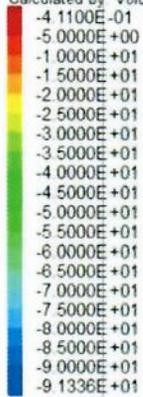
Calculated by: Volumetric Averaging



(a)

Contour of ZZ-Stress

Calculated by: Volumetric Averaging

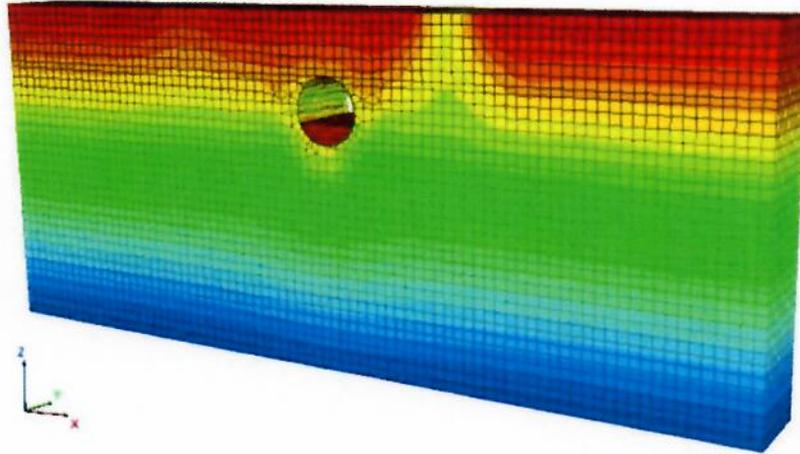
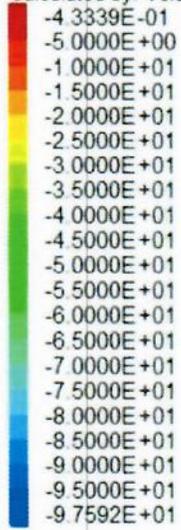


(b)

Figura 2.4.53. Esfuerzos verticales (a) sin cubeta y (b) con cubeta de relleno fluido considerando las propiedades de planos "as-built" (unidades, ton/m²).

Contour of ZZ-Stress

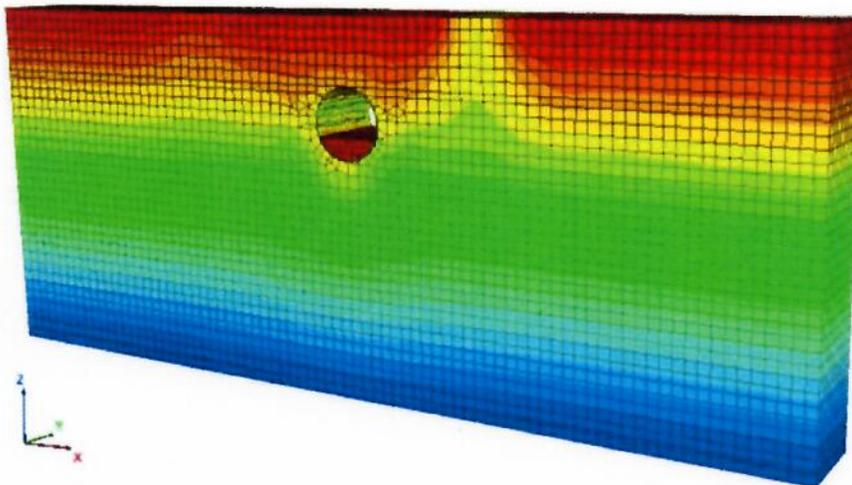
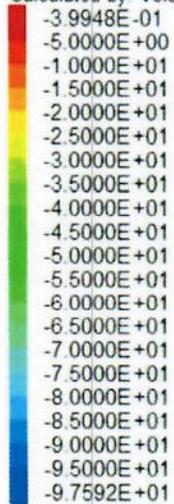
Calculated by: Volumetric Averaging



(a)

Contour of ZZ-Stress

Calculated by: Volumetric Averaging



(b)

Figura 2.4.54. Esfuerzos verticales (a) sin cubeta y (b) con cubeta de relleno fluido considerando las propiedades de ICA (unidades, ton/m^2).

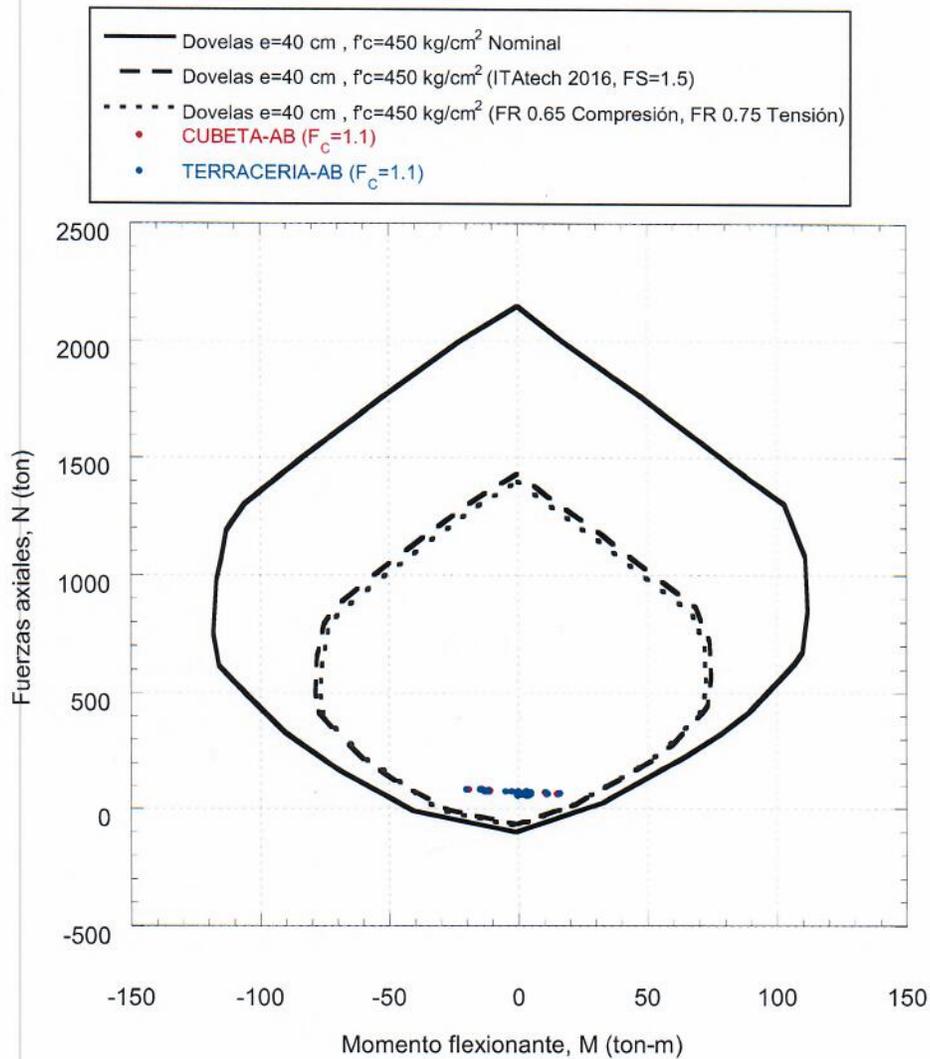


Figura 2.4.55 Diagramas de interacción nominal, factorizado por 1.5 (ITAtch, 2016), y reducido por factores de resistencia (NTC, 2017). Elementos mecánicos sin y con cubeta de relleno fluido considerando las propiedades de planos "as-built".

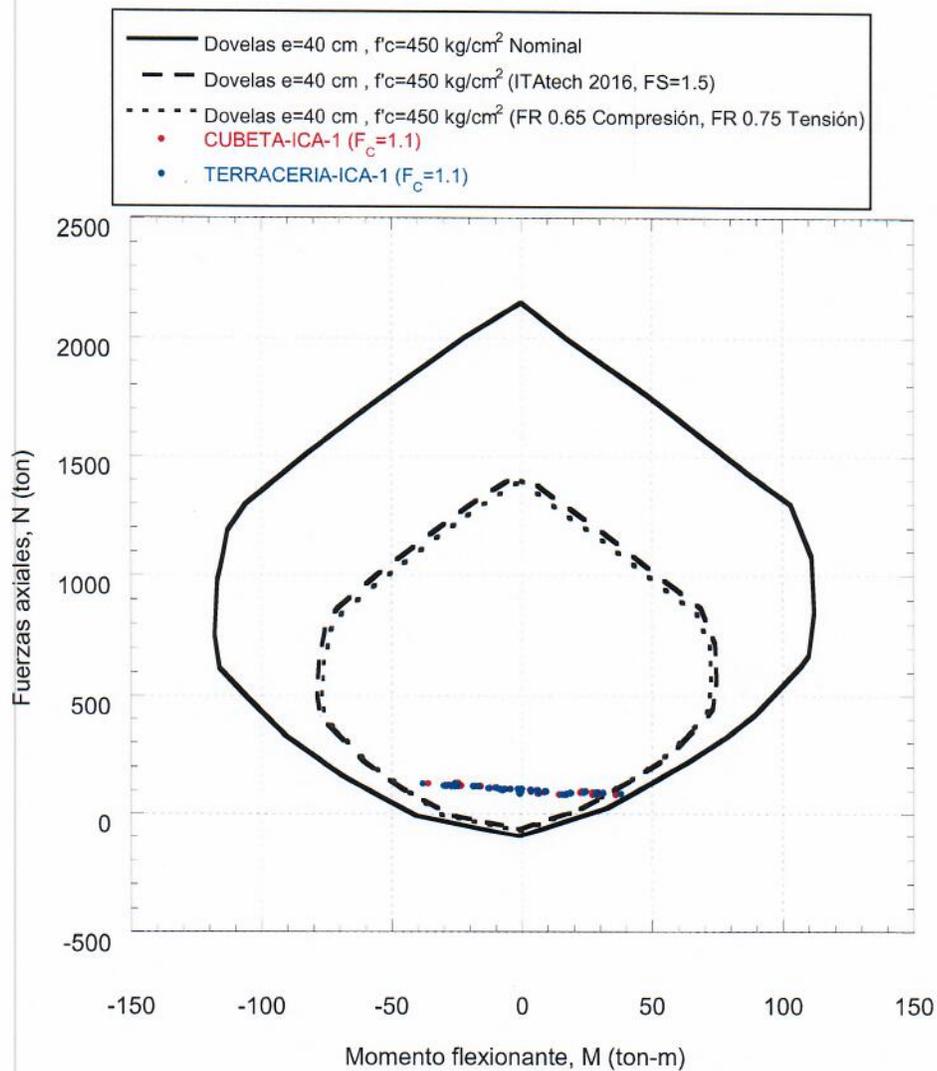


Figura 2.4.56 Diagramas de interacción nominal, factorizado por 1.5 (ITAttech, 2016), y reducido por factores de resistencia (NTC, 2017). Elementos mecánicos sin y con cubeta de relleno fluido considerando las propiedades de ICA.



2.5 COMENTARIOS REFERENTES AL MONITOREO DE SECCIONES DEL TÚNEL LLEVADAS A CABO POR EL M.I. FRANCISCO SUAREZ FINO

En este apartado se presentan los comentarios referentes a la instrumentación llevada a cabo al interior del túnel en 7 secciones con el objetivo de evaluar las deformaciones internas del revestimiento, y con ello poder establecer el nivel de desempeño del recubrimiento del túnel desde su construcción. La Tabla 2.5.1 resume los cadenamientos y estaciones de instrumentación instaladas al interior del túnel.

Tabla 2.5.1 Estaciones de instrumentación

Estación de instrumentación	Cadenamiento, km
EM-1	20+346.10
EM-2	20+443.40
EM-2a	21+150.42
EM-3a	21+660.00
EM-3	21+662.50
EM-3b	21+802.96
EM-4	23+853.0

En las estaciones de medición EM-1, EM-2, EM-2a y EM-4 se reportan alargamientos horizontales de hasta 57 cm, mismos que podrían exhibir un comportamiento inadecuado del revestimiento en estas zonas, sin embargo, estas estaciones se encuentran en una zona con revestimiento a base de concreto lanzado, por lo que en estas zonas no contamos con una superficie geométrica perfecta, lo cual hace que estas mediciones no sean representativas del comportamiento real del revestimiento. Asimismo, para las estaciones instaladas en secciones con recubrimiento a base de dovelas prefabricadas, exhiben un buen comportamiento, reportando un alargamiento transversal de hasta 3.6 cm. Cabe



mencionar que la estación de medición EM-3b coincide con la sección B analizada y presentada en el apartado 2.4 de este informe, donde se reporta un alargamiento de 3.6 cm, y lo estimado con el modelo numérico es de 2.2 cm, por lo que la capacidad predictiva del modelo numérico es adecuada. Para evaluar de manera precisa la deformación de la sección transversal del túnel, es importante contar con el monitoreo topográfico del túnel inmediatamente después de que se colocaron las dovelas, para poder descartar alguna deficiencia de origen.



GEOMETRÍA ESTACIONES DE MEDICIÓN LÍNEA 12 METRO CDMX

1. ESTACIÓN DE MEDICIÓN EM-1

CADEMIAMIENTO 20-346.1

Instrumentada en zona de dovelas con concreto lanzado.

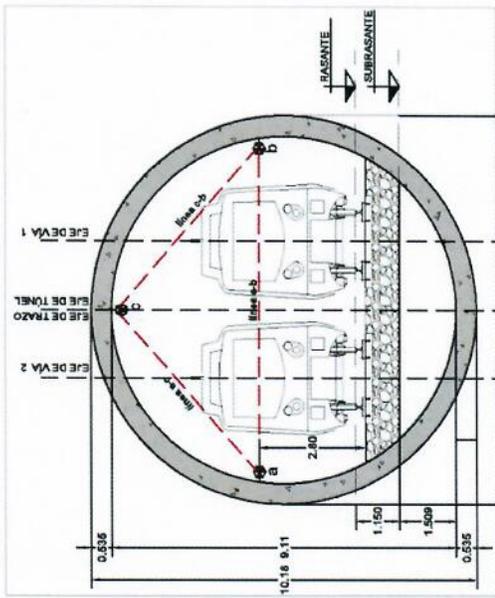
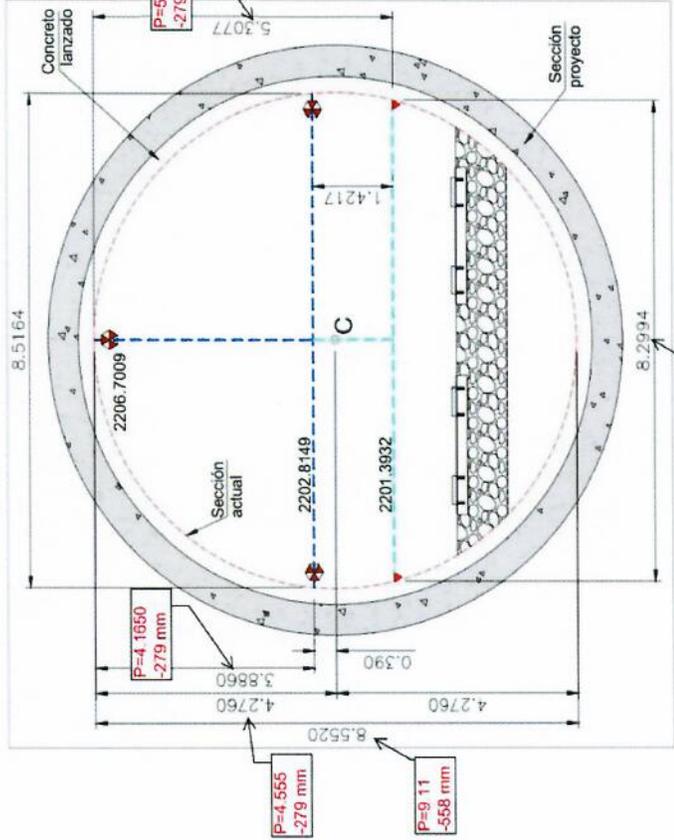
DATOS SISTEMA DE PRISMAS

cota clave:	2206.7009	msnm	h vertical=	3.8860	m
cota hastial derecho:	2202.8149	msnm	L horizontal=	8.5164	m
cota hastial izquierdo:	2203.8149	msnm	díametro sección de campo:	8.5520	m
(misma cota de referencia con prismas)					

PALOMAS (dianas)

cota clave:	2206.7009	msnm	h vertical=	5.3077	m
Paloma hastial derecho:	2201.3932	msnm	L horizontal=	8.2994	m
Paloma hastial izquierdo:	2201.3932	msnm			

nota: Las coordenadas son un sistema local establecido en campo. NO SE TIENEN COORDENADAS reales de la zona en estudio



Díametro dovela proyectada (interior)	9.11	m	Diferencia de diámetros	0.5580	m
			Respecto a espesor de concreto	0.279	m

Geometría actual en campo determinada con las referencias instrumentadas junio 2021

P=8.8732
-573.8 mm

P=4.555
-279 mm

P=9.11
-568 mm

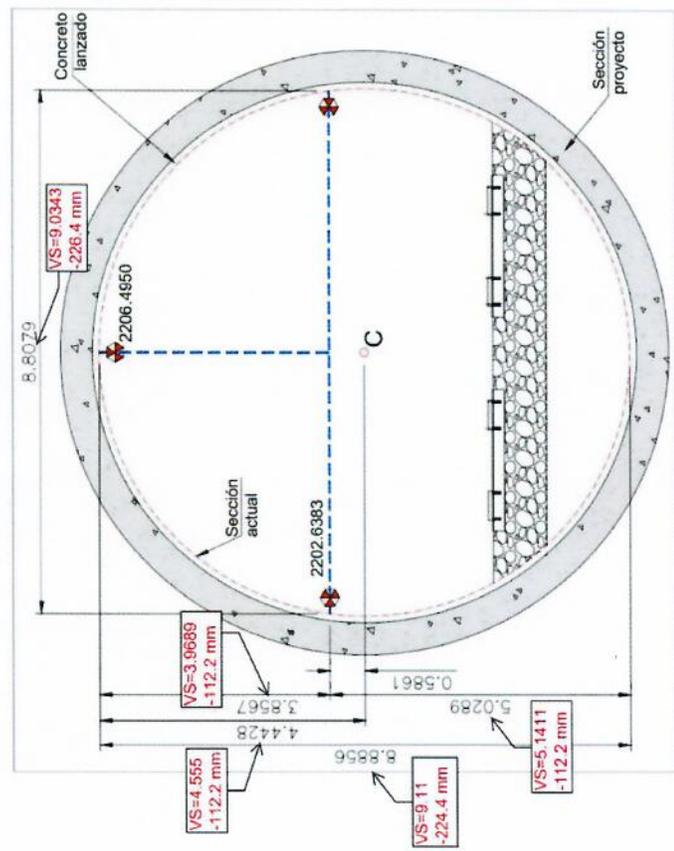
P=5.5867
-279 mm

GEOMETRÍA ESTACIONES DE MEDICIÓN LÍNEA 12 METRO CDMX

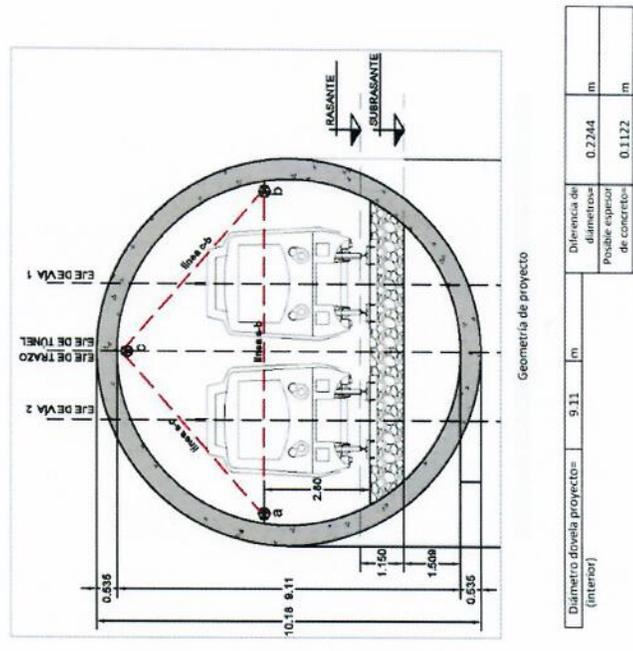
2. ESTACIÓN DE MEDICIÓN EM-2

Instrumentada en zona de dóveles con concreto lanzado.

DATOS SISTEMA DE PRISMAS	
cota clave:	2206.4950 msnm
cota hastial derecho:	2202.6383 msnm
cota hastial izquierdo:	2202.6383 msnm
(misma cota de referencia con prismas)	
h vertical:	3.8567 m
L horizontal:	8.8079 m
díametro sección de campo:	8.8556 m



Geometría actual en campo determinada con las referencias instrumentadas junio 2021





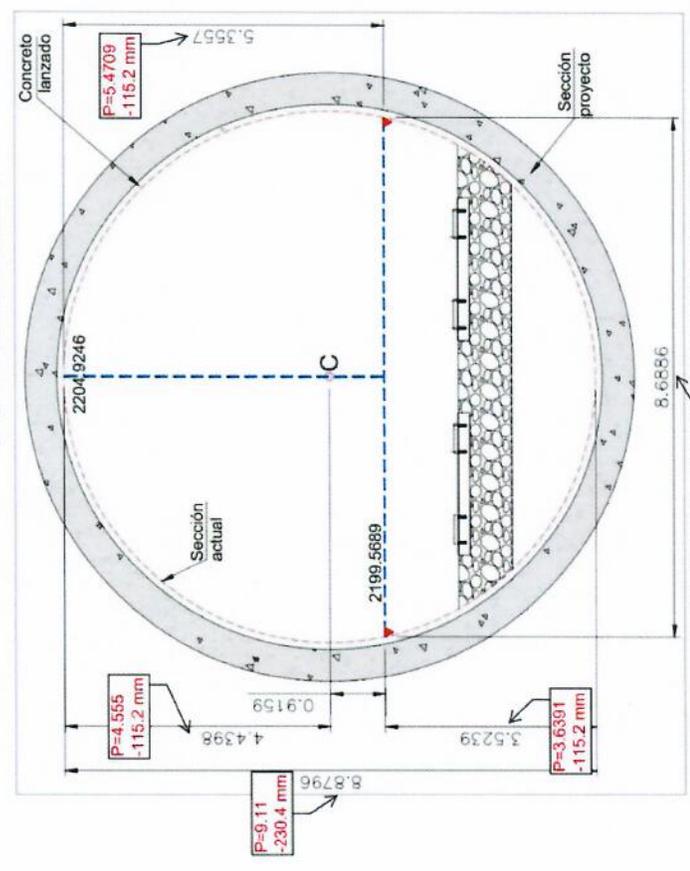
GEOMETRÍA ESTACIONES DE MEDICIÓN LÍNEA 12 METRO CDMX

3. ESTACIÓN DE MEDICIÓN EM-2a

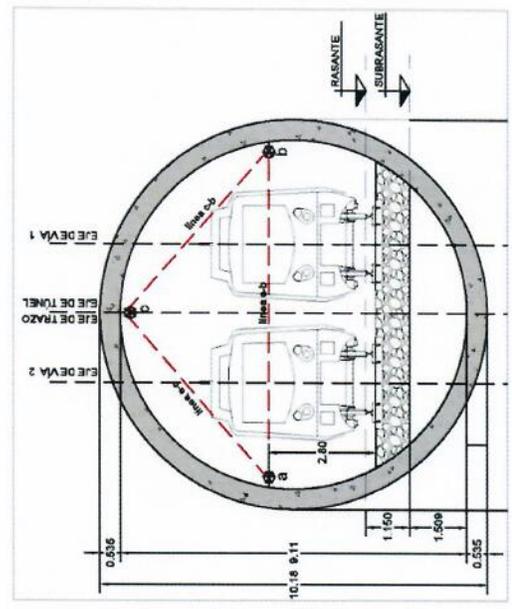
CADENAMIENTO 21+150.42

Instrumentada en zona de dovelas con concreto lanzado.

DATOS SISTEMA DE BULONES EXISTENTES EN CAMPO			
cal. 21+150.42	cota clave:	2204.9246	msnm
	cota hastial derecho:	2199.5689	msnm
	cota hastial izquierdo:	2199.5689	msnm
	mismo cota de referencia con BULONES)		
	diámetro sección de campo	8.8796	m



Geometría actual en campo determinada con las referencias instrumentadas junio 2021



Geometría de proyecto

Diferencia de diámetros	9.11	m
Possible espesor de concreto	0.2304	m
	0.1152	m

Handwritten signature

GEOMETRÍA ESTACIONES DE MEDICIÓN LÍNEA 12 METRO CDMX

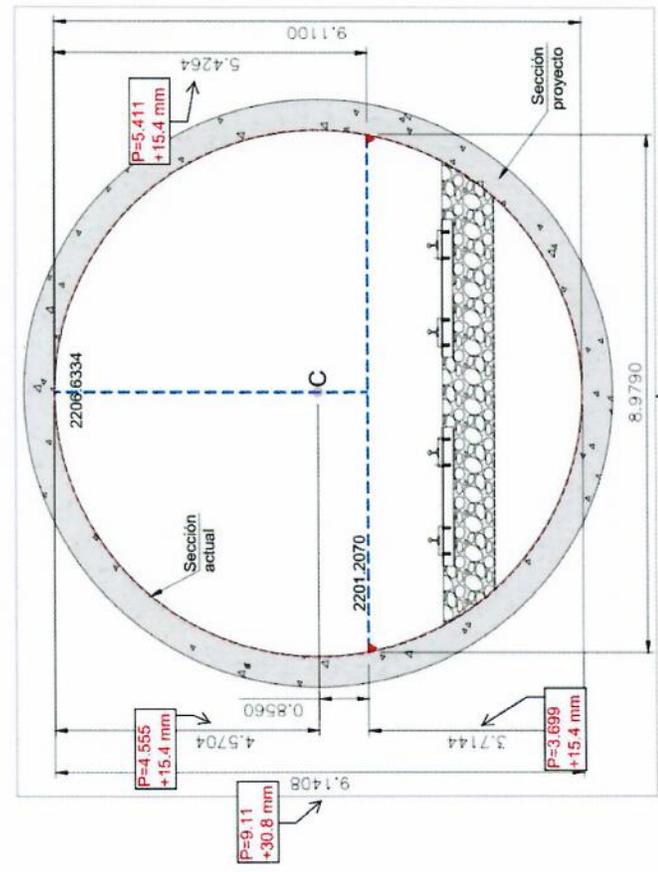
4. ESTACIÓN DE MEDICIÓN EM-3a CADENAMIENTO 21-660.00

Instrumentada en zona de dovelas

DATOS SISTEMA DE PALOMAS

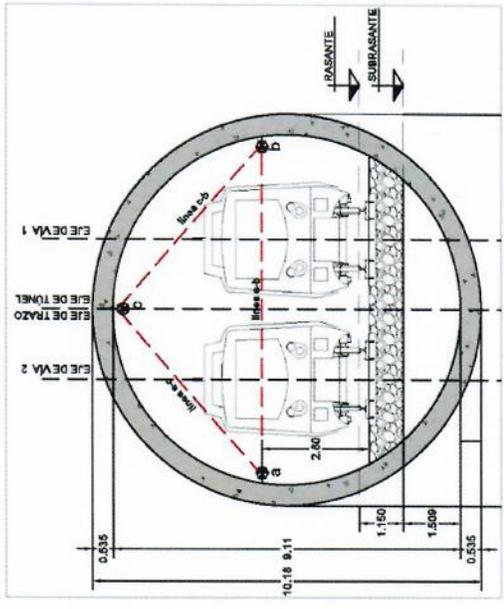
cad. 21-660.00	insmm	h vertical=	5.4264	m
cota clave: 2206.6334	insmm	L horizontal=	8.9790	m
cota basial derecho: 2201.2070	insmm	díametro sección de campo:	9.1408	m
cota basial izquierdo: 2201.2070	insmm			

(misma cota de referencia con palomas)



Geometría actual en campo determinada con las referencias instrumentadas junio 2021

P=8.9477
+31.3 mm



Geometría de proyecto

Díametro dovela proyector= (interior)	9.110	m	Diferencia de diámetros	-3.0800	cm
			Diferencia por hasta al centro de la geometría=	-1.54	cm



GEOMETRÍA ESTACIONES DE MEDICIÓN LÍNEA 12 METRO CDMX

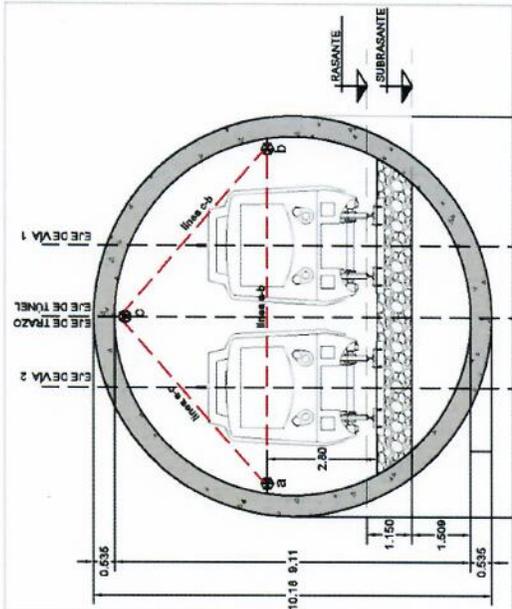
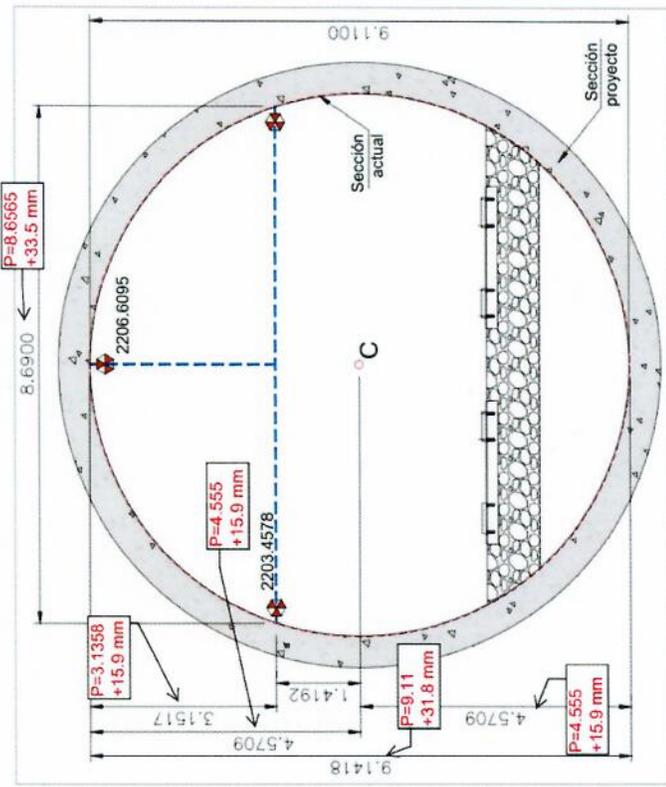
5. ESTACIÓN DE MEDICIÓN EM-3

CADENAMIENTO 21+662.50

Instrumentada en zona de dovelas

DATOS SISTEMA DE PRISMAS

cod	21+662.50	2206.6095	3.1517	m
cota clave	2203.4578	2203.4578	8.69	m
cota hasta/derecho	2203.4578	2203.4578	9.1418	m
cota hasta/izquierdo	2203.4578	2203.4578		
(misma cota de referencia con prismas)				
			dímetro sección de campo	



Geometría de proyecto

Dímetro dovela proyectado (interior)	9.110	m	Diferencia de diámetros	-3.1800	cm
			Diferencia por hasta al centro de la geometría	-1.59	cm

Geometría actual en campo determinada con las referencias instrumentadas, junio 2021

Handwritten signature

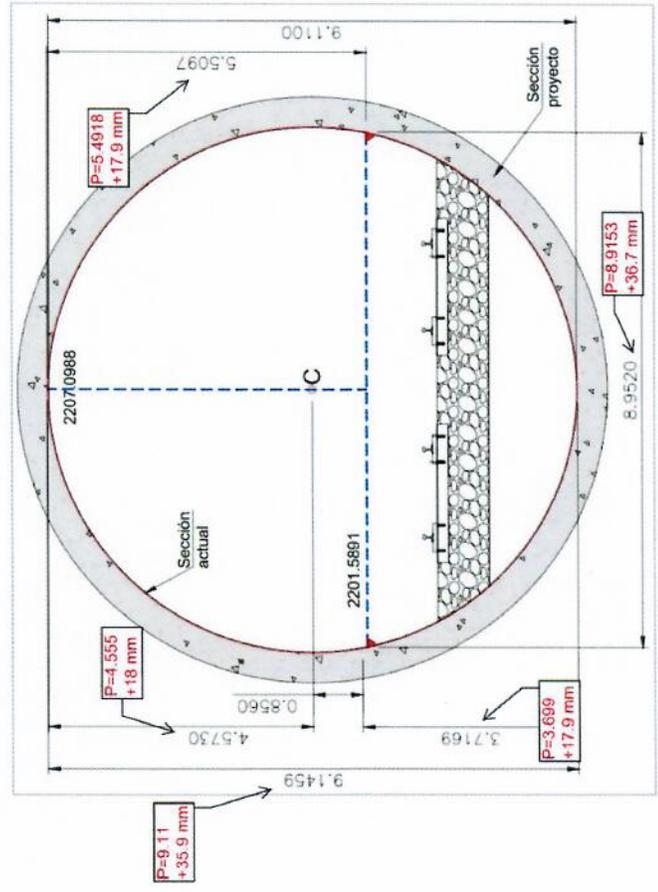
GEOMETRÍA ESTACIONES DE MEDICIÓN LÍNEA 12 METRO CDMX

6. ESTACIÓN DE MEDICIÓN EM-3b

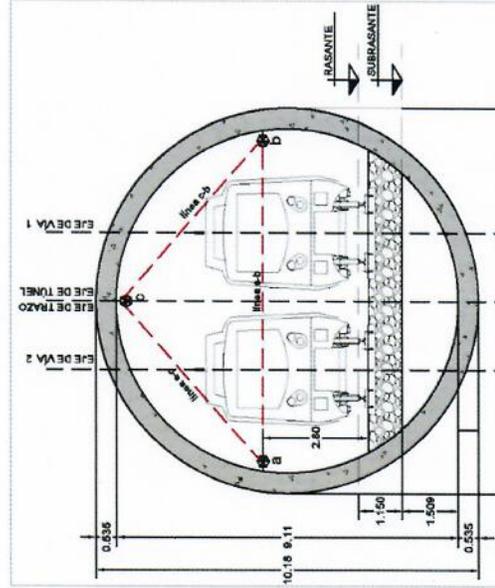
CADENAMIENTO 21+802.961

Instrumentada en zona de dovelas

DATOS SISTEMA DE BULONES EXISTENTES EN CAMPO	
cad. 21+802.961	
cota clave: 2207.0988	msnm
L horizontal= 8.9520	m
h vertical= 5.3097	m
cota hastial derecho: 2201.5891	msnm
cota hastial izquierdo: 2201.5891	msnm
(misma cota de referencia con bulones)	
dámetro sección de campo	9.1459
	m



Geometría actual en campo determinada con las referencias instrumentadas junio 2021



Geometría de proyecto

Dámetro dovela proyectado (interior)	9.110	m	Diferencia de diámetros	-3.5900	cm
			Diferencia por hasta al centro de la geometría	-1.795	cm

(Handwritten signature)



GEOMETRÍA ESTACIONES DE MEDICIÓN LÍNEA 12 METRO CDMX

7. ESTACIÓN DE MEDICIÓN EM-4

Instrumentada en zona de doveles con concreto lamazado.

DATOS SISTEMA DE PRISMAS

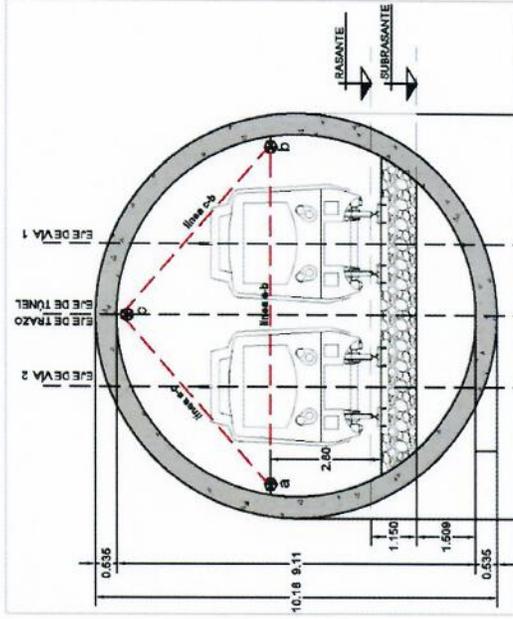
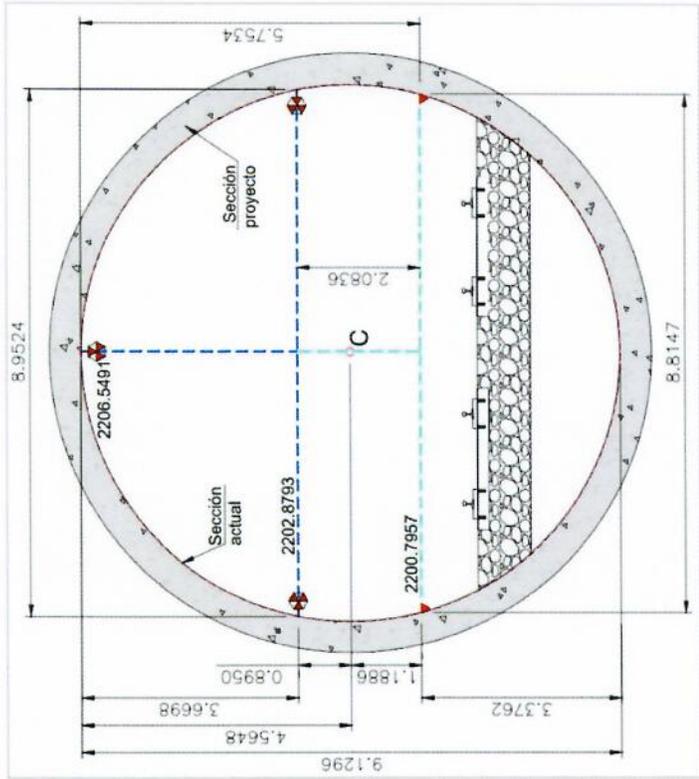
cota clave:	2206.5491	msnm	h. vertical:	3.698	m
cota hastal derecho:	2202.8793	msnm	L horizontal:	8.9524	m
cota hastal izquierdo:	2202.8793	msnm	diámetro sección de campo:	9.1296	m

(misma cota de referencia con prismas)

DATOS SISTEMA DE PALOMAS (dianas)

cota clave:	2206.5491	msnm	h. vertical:	5.7534	m
Paloma hastal derecho:	2200.7957	msnm	L horizontal:	8.8147	m
Paloma hastal izquierdo:	2200.7957	msnm			

Nota: Las coordenadas son un sistema local establecido en campo. NO SE TIENEN COORDENADAS reales de la zona en estuado



Geometría de proyecto

Diámetro doveña proyectado (interior)	9.110	m	Diferencia de diámetros	-1.9600	cm
			Diferencia por hastal al centro de la geometría	-0.95	cm

Geometría actual en campo determinada con las referencias instrumentadas Junio 2021

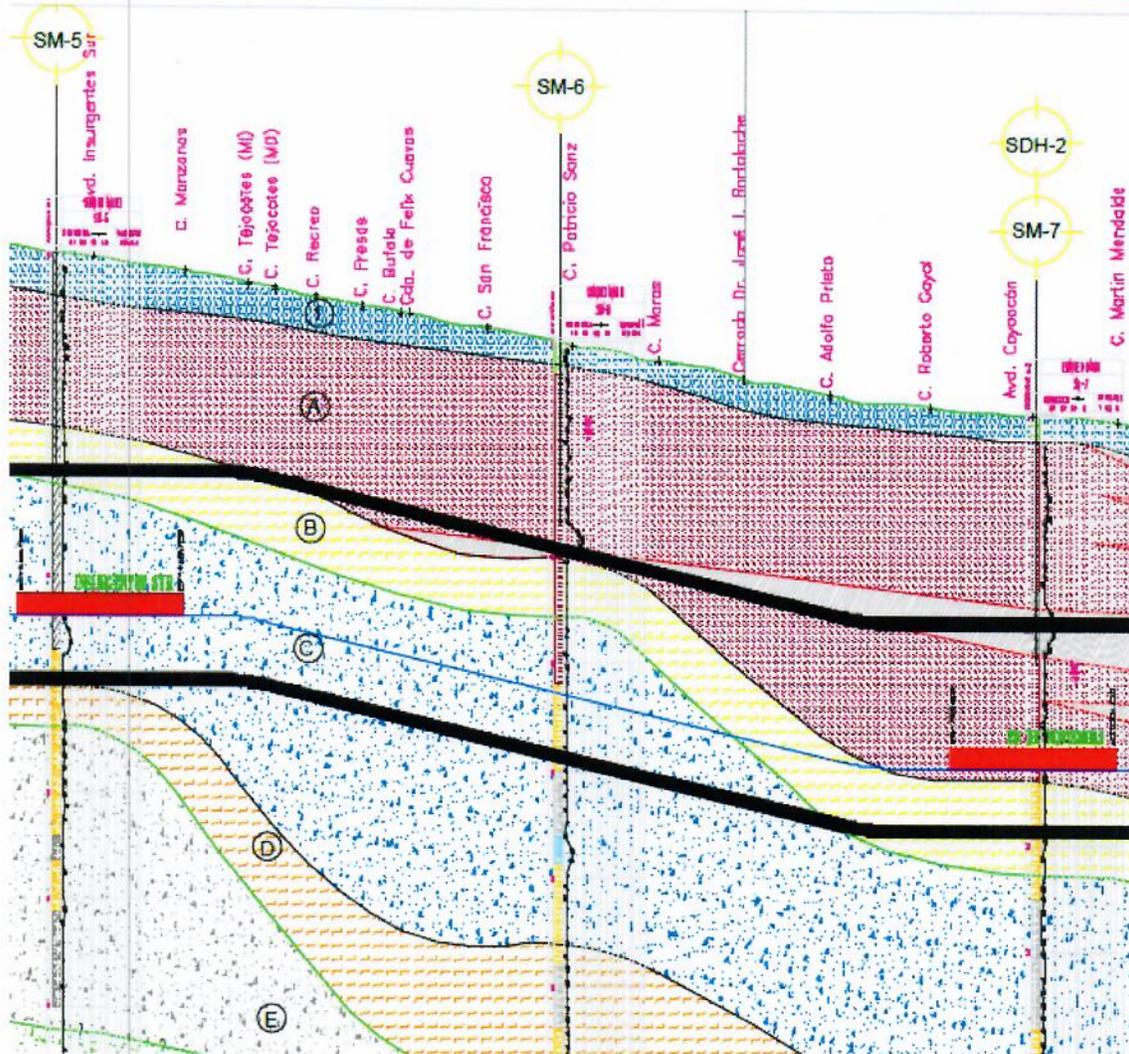
Handwritten signature



2.6 ANÁLISIS ANTE CARGA SÍSMICA DEL TÚNEL

En este apartado se presentan los comentarios referentes al comportamiento del revestimiento del túnel ante carga sísmica. Se aclara que la revisión del diseño para el revestimiento primario aún no considera el efecto sísmico, este análisis se presentará en otro informe del tramo subterráneo.

Es de conocimiento general en la ingeniería de obras subterráneas, que este tipo de infraestructura puede tener un desempeño comprometido ante eventos sísmicos, si se presenta alguna de las siguientes condiciones: a) cambio de rigideces en los materiales sobre los cuales se construye el túnel, y b) cambio de rigideces sobre los elementos de sostenimiento del túnel, entre otras menos relevantes. Para el caso de la sección D analizada en la sección 2.4 de este informe, se tiene la condicionante del cambio de rigideces en el suelo (Figura 2.6.1). El cambio de rigideces en el suelo se debe al contraste de materiales (suelos tobáceos naturales de la zona y depósitos arcillosos). Por tal motivo es necesario realizar un análisis que respalde las consideraciones de la proyectista. Estos análisis y los comentarios finales se presentarán en el informe final del tramo subterráneo.



- 1: Relleno compuesto por arcilla arenosa con gravas y material de construcción
- A: Depósito aluvial conformado por arcilla arenosa de baja plasticidad y consistencia media a firme
- B: Arcilla lacustre
- C: Toba volcánica conformada por arena limosa muy compacta
- D: Lahar volcánico conformado por arena limosa muy compacta con fragmentos de grava angular y lentes de arena pumítica
- E: Toba volcánica conformada por arena limosa muy compacta con lentes de arena pumítica

Figura 2.6.1 Cambio de rigideces en el suelo para la sección D



3. CONCLUSIONES

Con base en los estudios descritos en este informe se concluye que:

1. El túnel presentará un comportamiento satisfactorio ante carga monotónica a corto y largo plazos, siempre y cuando prevalezcan las condiciones piezométricas consideradas en su diseño, ya que los elementos mecánicos en las secciones revisadas se encuentran al límite en los diagramas de interacción con un factor de seguridad de 1.5, por lo que se recomienda el monitoreo periodico de asentamientos en superficie, al interior del túnel, y de la piezometría en las zonas aledañas a esta obra subterránea para prevenir su afectación.
2. La colocación de una cubeta estructural o concreto fluido aunque sólo mejora ligeramente el comportamiento estructural del túnel, brindaría un sustento más homogéneo al balasto de la vía, y menos susceptible a deformarse por su interacción con el agua proveniente de las filtraciones del túnel. Más aún, permitirían la instalación de un drenaje más eficiente en las zonas de filtraciones críticas.
3. Debe revisarse con calas si hay cubeta estructural en la zona de salidas de emergencia, y de no existir estas colocarlas.
4. Debe revisarse el comportamiento sísmico del túnel en las zonas de cambio de rigidez, baja cobertura, o donde la proximidad con edificios altos modifiquen los elementos mecánicos en el sistema de retención del túnel, tal como la sección D analizada en este informe ante carga sostenida.

Es importante mencionar que la compleja interacción entre el túnel y su sistema de contención a largo plazo está gobernada por la consolidación



regional, a su vez asociada a la presencia y funcionamiento de pozos profundos para abastecimiento de agua a la ciudad y zona conurbada, y posibles cargas accidentales como los sismos de magnitud importante que se han registrado en la ciudad de México a lo largo de su historia. Asimismo, se identificaron tres secciones críticas de filtraciones a lo largo del tramo dovelado que necesitan ser atendidas: 1) Atlalilco, 2) Parque de los Venados-Eje Central, y 3) Insurgentes, en donde se identificó la presencia de un manto colgado, a través de inyecciones en la bóveda del túnel, y mejoras en el sistema de drenaje, incluyendo la reparación de registros. En particular en el tramo 1) Atlalilco, se deberán tapar dos cárcamos que quedaron abiertos y desconectados del drenaje durante la construcción.



4. REFERENCIAS

- PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00
- PMDF-09-EST-612000-III-0020-04761-M-00
- PMDF-09-MS-612000-III-0031-02483-M-00a
- PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00
- PMDF-11-MS-612000-III-0094-10394-M-00.
- PMDF-10-EST-612000-III-0035-05411-M-00
- PMDF-10-MS-612235-III-0076-06031-M
- PMDF-11-EST-612000-III-0095-10395-M-00
- PMDF-11-MS-612000-III-0096-10396-M-00
- PMDF-10-EST-612000-III-0066-05445-M-00
- PMDF-10-EST-612000-III-0051-05426-M-00
- PMDF-11-EST-612000-III-0083-51683-M-00
- PMDF-11-EST-612000-III-0013-50678-M-00
- PMDF-11-EST-612000-III-0015-50680-M-00
- PMDF-10-EST-612000-III-0061-05439-M-00
- PMDF-10-MS-612000-III-0116-06067-M-01
- PMDF-11-EST-612000-III-0076-05459-M-00
- PMDF-09-EST-612000-II-0025-00000-M-A
- PMDF-09-MS-612000-III-0037-03270-D-00
- PMDF-11-MS-612255-III-0272-06214-P-00
- PMDF-11-MS-612255-III-0288-51430-M-00.
- PMDF-12-EST-612255-IV-0044-06944-P-AB.
- PMDF-12-EST-612255-IV-0045-06945-P-AB.



- PMDF-12-MS-612255-III-0318-05474-B-00.
- PMDF-11-EST-612000-III-0050-06950-M-00
- PMDF-11-EST-612245-III-0002-06902-P-00.
- PMDF-11-MS-612245-III-0228-06171-P-01.
- PMDF-11-MS-612245-III-0283-51425-M-01
- PMDF-11-MS-612245-III-0345-53883-M-00.
- PMDF-12-EST-612245-IV-0002-06902-P-AB.
- PMDF-12-MS-612245-III-0320-05476-B-01
- PMDF-11-EST-612000-III-0050-06950-M-00

Auvinet G, Mendez E, Juárez M. Recent information on México City subsidence. Proceedings of the 19 the conference on soil mechanics and geotechnical engineering, seoul 2017.vol.305.2017. p. 3295–8. Technical Commitee.

Budh, M. Soil mechanics and foundations. Third edition 2010. John Wiley & Sons, INC. United States of America.

ITAtch Report N°7. Design Guidance for precast fibre reinforced concrete segments, ISBN: 978-2-9701013-2-1/April 2016

Mayoral JM, Castañón E, Albarran J. “Regional subsidence effects on seismic soil-structure interaction in soft clay”. Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering 103:123–140, 2017. ISSN 0267-7261

NTC 2017. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto.