



GOBIERNO DE LA
CIUDAD DE MÉXICO

“Comité de rehabilitación de la Línea 12 del STC”

NOTA TÉCNICA No. 1

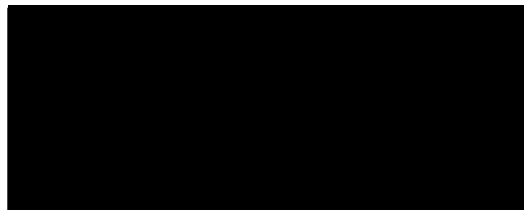
Revisión del documento

P MDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00

“Memoria de cálculo del relleno con material tipo base en la cubeta del túnel con dovelas de la Línea 12 del metro”

Elaborada para:
Secretaría de Obras y Servicios

CDMX
Agosto 9, 2021





En esta nota técnica se presentan los comentarios y recomendaciones, derivadas de la revisión del documento PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00, "Memoria de cálculo del relleno con material tipo base en la cubeta del túnel con dovelas de la Línea 12 del metro". En dicho documento el consorcio ICA, ALSTOM, CARSO, presenta la memoria de cálculo para la alternativa de relleno con material tipo base, en la cubeta del túnel dovelado, como la justificación de la utilización de terracería del cadenamiento 22+900 al 27+390.

Observaciones

1. En dicho documento se indica que la cubeta del túnel se rellenaría con concreto simple, relleno fluido, o concreto ciclópeo, colocado desde la parte baja de la cubeta hasta 0.4 m por debajo del desplante del balasto, este hecho se corroboró en campo. Es importante enfatizar que los planos constructivos (i.e. plano de referencia PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00) no coinciden con lo observado en campo, ya que indican relleno de terracería del cad 22+900 al 27+390, por lo que se recomienda a la Dirección General de Obras para el Transporte, DGOT, actualizar este plano para evitar confusiones en revisiones futuras.
2. En la Figura 1, se presenta la comparación entre la configuración que sustenta la memoria de cálculo PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00, la configuración que se tiene en campo según el plano PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00, y la configuración promedio *in-situ* para la sección 4. Asimismo, las Figuras 2 a 4 presentan la comparación entre la configuración que se tiene en campo según el plano PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00, y la configuración promedio *in-situ* para las secciones 1, 2 y 3 respectivamente. Se llevaron a cabo 15 calas para verificar las condiciones reales del sustento del material balasto y base granular. En la Tabla 1, se presenta un resumen con la ubicación y características de las calas. Además, en las Figuras 5 a 19 se presentan las fotografías de las calas mencionadas. Es importante mencionar que, en todas las calas realizadas se comprueba la existencia de cubeta de concreto, con una altura aproximada de



1.5 m, lo cual no coincide con los planos constructivos. Es importante aclarar que los espesores del material de base varían de 23 a 55 cm de espesor a lo largo del túnel dovelado, de acuerdo con la información recopilada de las calas. Asimismo, se informa que en cinco de las dieciséis calas realizadas se tiene material de base saturado, incluso se acumulan tirantes de hasta 32 cm (cad 20+480), lo cual indica que el sistema de drenaje se encuentra dañado en algunos puntos, además de reducir la resistencia y aumentar la deformabilidad del material de base a largo plazo, cuando se combina con la carga cíclica derivada de la operación de los trenes.



Con base en lo anterior, la propuesta para emplear material tipo base como parte del relleno de la cubeta, está delimitado a 40 cm de espesor.

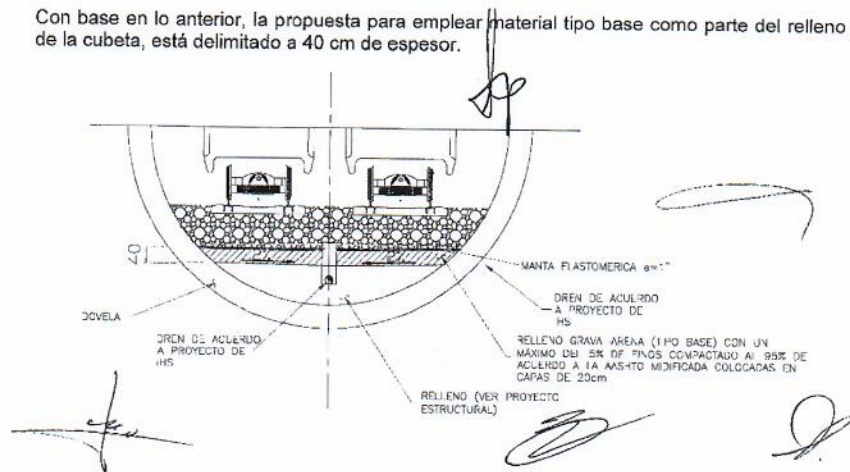
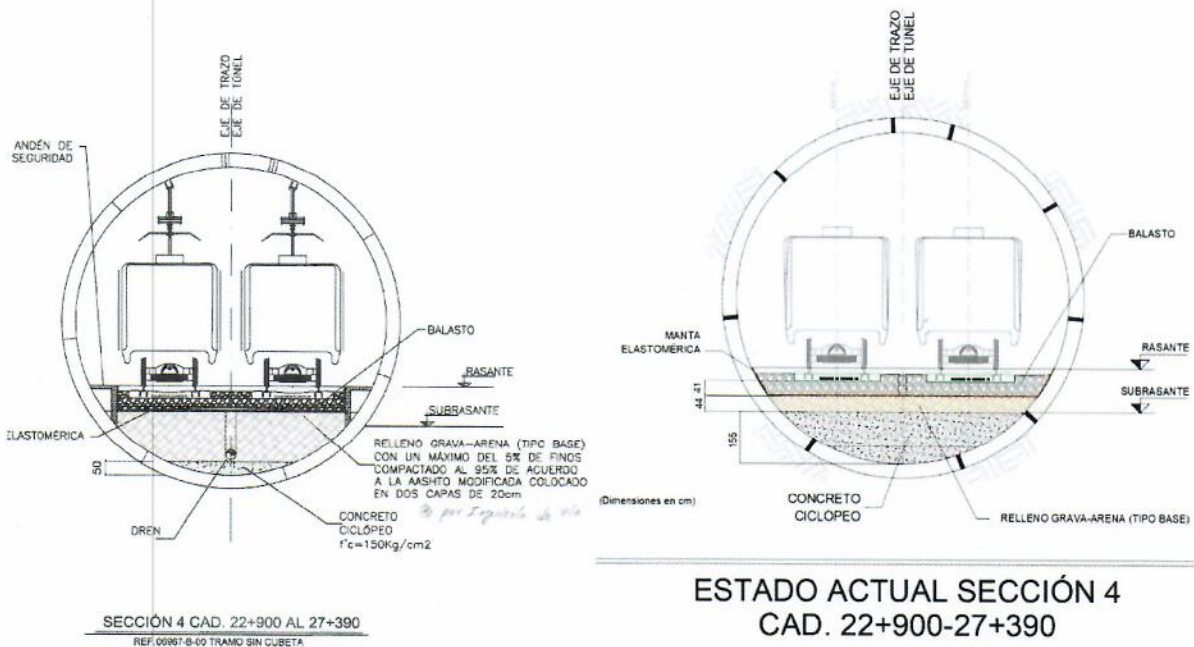


Figura No. 1. Ubicación tipo de la capa de suelo tipo base hidráulica.

(a)



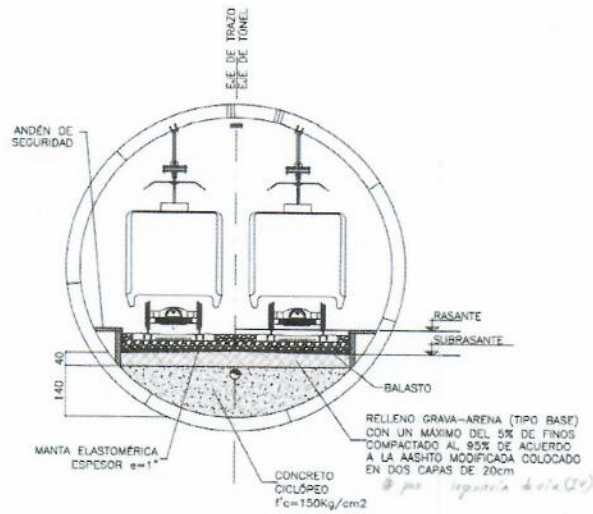
SECCIÓN 4 CAD. 22+900 AL 27+390
REF.00967-B-00 TRAMO SIN CUBETA

ESTADO ACTUAL SECCIÓN 4
CAD. 22+900-27+390

(b)

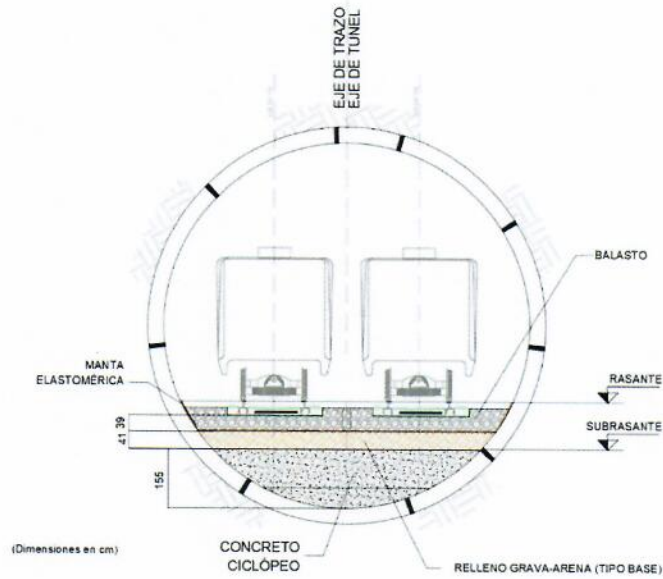
(c)

Figura 1. a) Configuración para el material tipo base, según la memoria de cálculo PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00, b) configuración construida según el plano PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00, y c) configuración promedio *in-situ* (Sección 4)



SECCIÓN 3, CAD. 22+470 AL 22+900
REF. 50757-B-00 RELLENO GRAVA-ARENA
05445-P-00 CUBETA ESTRUCTURADA

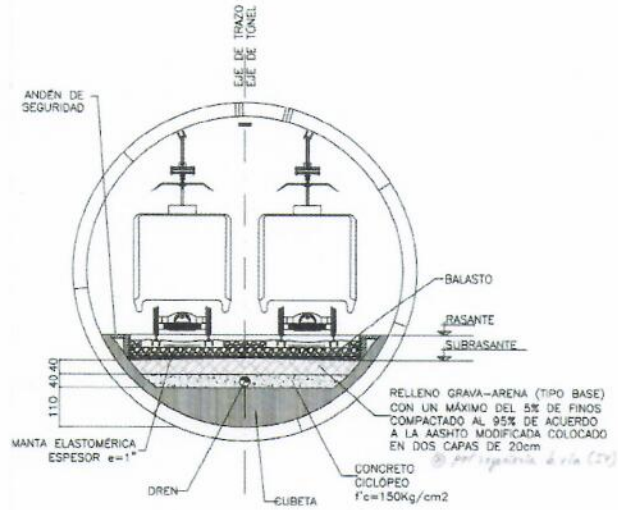
(a)



ESTADO ACTUAL SECCIÓN 3
CAD. 22+470-22+900

(b)

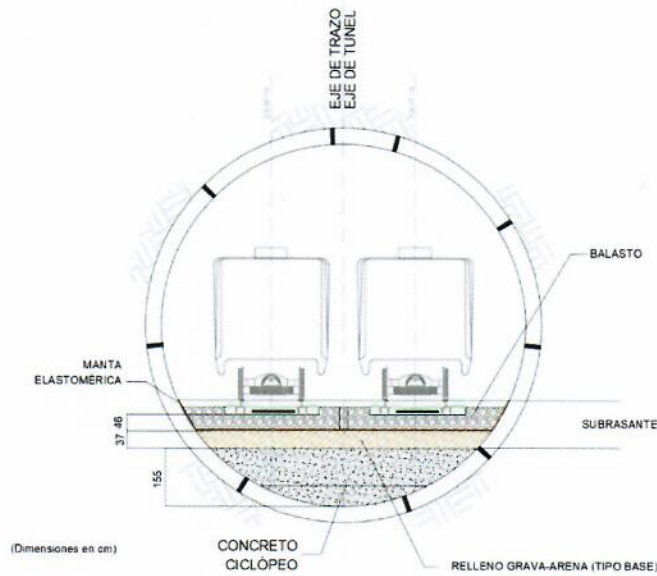
Figura 2. a) Configuración construida según el plano PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00, y b) configuración promedio *in-situ* (Sección 3)



SECCIÓN 2, CAD. 21+300 AL 22+470

REF. 05453-P-00 GEOMETRÍA REVESTIMIENTO Y CUBETA
05434-P-00 ARMADO DE REVESTIMIENTO
50760-B-00 CONCRETO CICLÓPEO e=96 CM

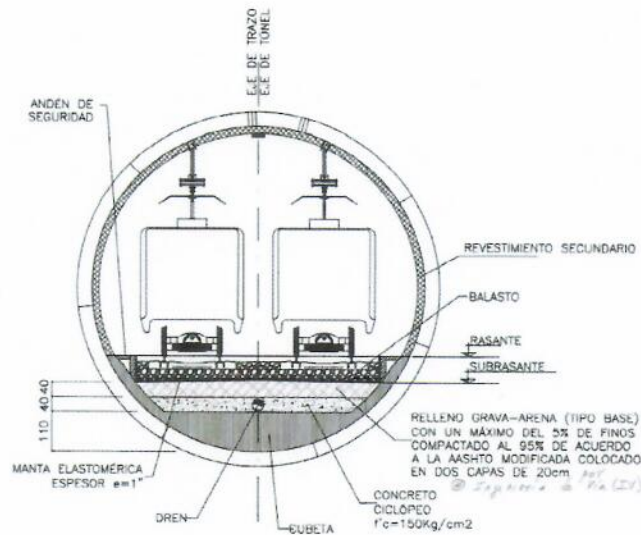
(a)



ESTADO ACTUAL SECCIÓN 2
CAD 21+300-22+470

(b)

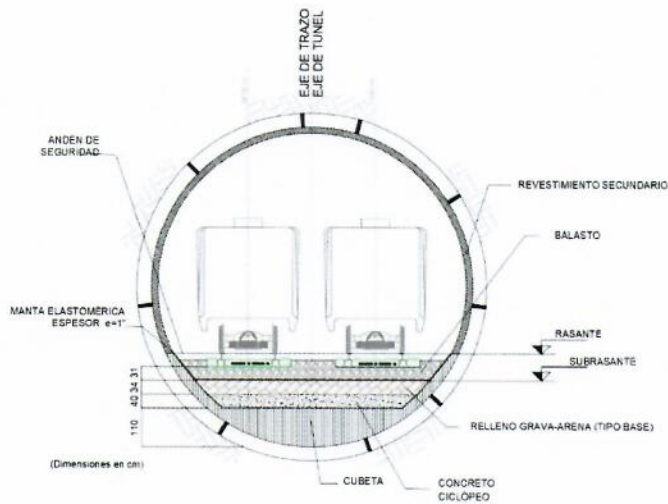
Figura 3. a) Configuración construida según el plano PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00, y b) configuración promedio *in-situ* (Sección 2)



SECCIÓN 1 CAD 20+326 AL 21+300

REF. 05453-P-00 GEOMETRÍA REVESTIMIENTO Y CUBETA
05434-P-00 ARMADO DE REVESTIMIENTO
50760-B-00 CONCRETO CICLOPEO e=80 CM

(a)



ESTADO ACTUAL SECCIÓN 1
CAD 20+326-21+300

(b)

Figura 4. a) Configuración construida según el plano PMDF-11-EST-612000-III-0240-51298-P-00, y b) configuración promedio *in-situ* (Sección 1)



2

Figura 5. Cala C-1, realizada en el tramo Zapata – Parque de los venados, cadenamiento 25+500.



Figura 6. Cala C-2, realizada en el tramo Parque de los venados – Eje central, cadenamiento 25+197.



2

Figura 7. Cala C-3, realizada en el tramo Parque de los venados – Eje central, cadenamiento 25+081.



2

Figura 8. Cala C-4, realizada en el tramo Parque de los venados – Eje central, cadenamiento 24+874.



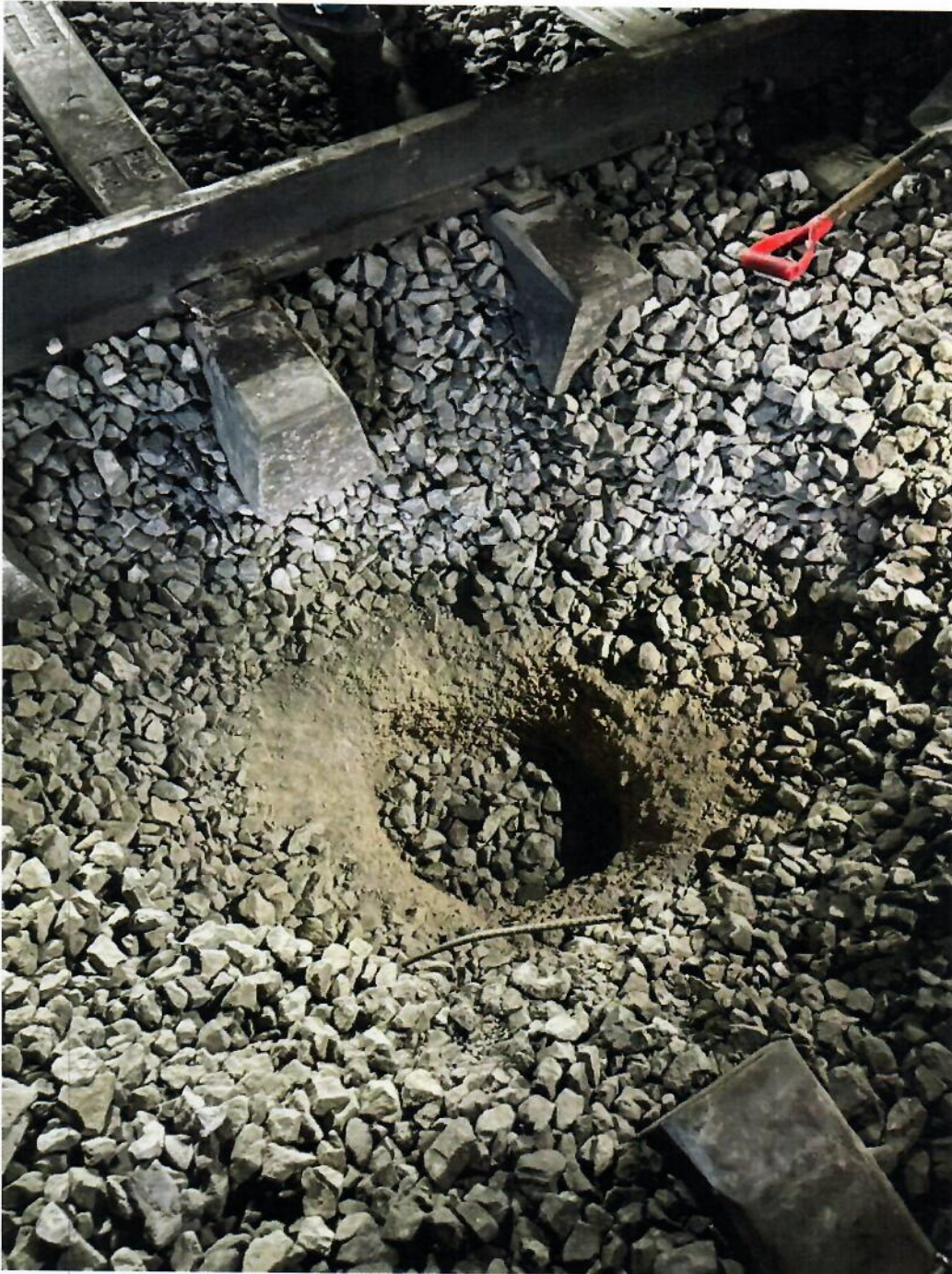
J

Figura 9. Cala C-5, realizada en el tramo Parque de los venados – Eje central, cadenamiento 24+460.



2

Figura 10. Cala C-6, realizada en el tramo Eje central - Ermita, cadenamamiento 23+724.



2

Figura 11. Cala C-7, realizada en el tramo Eje central - Ermita, cadenamamiento 23+600.



2

Figura 12. Cala C-8, realizada en el tramo Eje central - Ermita, cadenamiento 23+330.



2

Figura 13. Cala C-9, realizada en el tramo Ermita - Mexicaltzingo, cadenamiento 22+400.



Figura 14. Cala C-10, realizada en el tramo Ermita - Mexicaltzingo, cadenamiento 22+531.



Figura 15. Cala C-11, realizada en el tramo Ermita - Mexicaltzingo, cadenamamiento 22+180.



Figura 16. Cala C-12, realizada en el tramo Ermita - Mexicaltzingo, cadenamamiento 21+855.



Figura 17. Cala C-13, realizada en el tramo Ermita - Mexicaltzingo, cadenamamiento 21+160.

2



Figura 18. Cala C-14, realizada en el tramo Mexicaltzingo - Atlalilco, cadenamamiento 20+480.



Figura 19. Cala C-15, realizada en el tramo Mexicaltzingo - Atlalilco, cadenamiento 20+380.

J



Tabla 1. Características de las calas realizadas el día 4 y 5 de agosto de 2021.

| No. | Tramo | Cadenamiento, Pk | Observaciones |
|------|------------------------------|---------------------|---|
| C-1 | Zapata – P. Venados | 25+500 | 22cm durmiente, 41 cm Balasto, 55 cm Base |
| C-2 | P. Venados – E. Central | 25+197 | 22cm durmiente, 39 cm Balasto, 50 cm Base. Material de base con tirante de agua de 8 cm |
| C-3 | P. Venados – E. Central | 25+081 | 22cm durmiente, 45 cm Balasto, 37 cm Base. Material de base con tirante de agua de 7 cm |
| C-4 | P. Venados – E. Central | 24+874 | 22cm durmiente, 48 cm Balasto, 42 cm Base |
| C-5 | P. Venados – E. Central | 24+460 | 22cm durmiente, 48 cm Balasto, 31 cm Base. Material de base con tirante de agua de 4 cm |
| C-6 | E. Central - Ermita | 23+724 | 22cm durmiente, 40 cm Balasto, 54 cm Base |
| C-7 | E. Central - Ermita | 23+600 | 22cm durmiente, 36 cm Balasto, 43 cm Base |
| C-8 | E. Central - Ermita | 23+330 | 22cm durmiente, 38 cm Balasto, 34 cm Base |
| C-9 | Ermita - Mexicaltzingo | 22+400 | 22cm durmiente, 37 cm Balasto, 42 cm Base |
| C-10 | Ermita - Mexicaltzingo | 22+531 | 22cm durmiente, 41 cm Balasto, 39 cm Base |
| C-11 | Ermita - Mexicaltzingo | 22+180 | 22cm durmiente, 42 cm Balasto, 37 cm Base *No se pudo verificar la presencia de los hastiales de la cubeta estructural |
| C-12 | Ermita - Mexicaltzingo | 21+855 | 22cm durmiente, 48 cm Balasto, 36 cm Base *No se pudo verificar la presencia de los hastiales de la cubeta estructural |
| C-13 | Ermita - Mexicaltzingo | 21+160 | 22cm durmiente, 35 cm Balasto, 40 cm Base *Se pudo verificar la presencia de los hastiales de la cubeta estructural |
| C-14 | Mexicaltzingo - Atlalilco | 20+480 | 22cm durmiente, 34 cm Balasto, 38 cm Base. Material de base con tirante de agua de 32 cm. *Se pudo verificar la presencia de los hastiales de la cubeta estructural |
| C-15 | Mexicaltzingo - Atlalilco | 20+380 | 22cm durmiente, 23 cm Balasto, 23 cm Base. Material de base con tirante de agua de 1 cm *Se pudo verificar la presencia de los hastiales de la cubeta estructural |



3. Se calculó la distribución de presiones imperantes a 30 cm de profundidad sin factorizar, en el contacto entre el balasto y el material de base (i.e. gravas y arenas compactadas), utilizando los criterios incluidos en el manual AREA (American Railway of Engineering Association, 1920), y en su versión actual AREMA (American Railway Engineering and Maintenance of Way Association, 2010), para las cargas reportadas en la memoria de ICA para su configuración del sistema riel-durmiente-balasto, las cuales son 4.73 kg/cm^2 y de 3.95 kg/cm^2 respectivamente. **La descarga a 30 cm sobre el material de base es de 3.56 kg/cm^2 y 3 kg/cm^2 respectivamente (Figura 20) calculada con la expresión de Talbot que se incluye en AREMA y AREA**, lo cual excede la presión máxima admisible en la capa de **subrasante (base granular) de 2 kg/cm^2** considerada por ICA como representativa para materiales de base selectos. Más aún, ICA considera una presión de trabajo sin factorizar de 1.16 kg/cm^2 , por lo que el factor de seguridad se reduce de $FS=2/1.16=1.7$ a $FS=2/3=0.67$. Lo anterior conlleva a la ruptura de granos en los materiales que integran el filtro en la superficie de falla (i.e. grava y arena), con la correspondiente acumulación de deformaciones plásticas con la carga cíclica, observadas durante la operación de la Línea 12, y la aparición de finos en las tuberías del drenaje (Fig. 21b). Este efecto se potencializa con la presencia de agua en el material de base por un drenaje deficiente. Esta problemática obedece a **un error de unidades** en la memoria de cálculo de ICA, como se puede observar en la Figura 21a, que presenta un extracto de esta memoria de cálculo. El error de unidades es en la aplicación de la relación de Talbot (i.e. Talbot, 1920), que presentan los citados manuales de diseño, y que maneja pulgadas y no centímetros, como se indica a continuación:

$$P_c = 16.8P_a/h^{1.25}$$

Donde:

P_c ; esfuerzo vertical (lb/in^2)

P_a ; esfuerzo vertical uniforme aplicado (lb/in^2)

h ; es la profundidad del balasto (in)

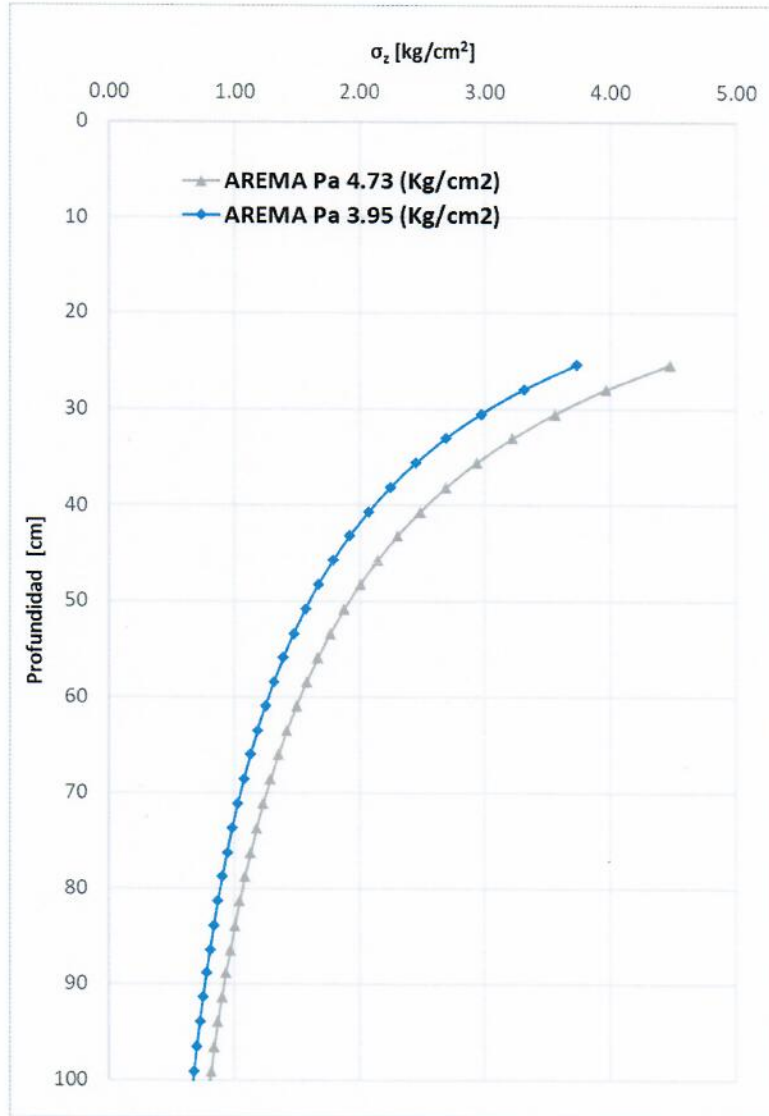


Figura 20. Distribución de presiones sobre el balasto



1.5 kg/cm² para suelo bien graduado

2.0 kg/cm² para material selecto

h: Espesor del balasto (cm)

Considerando que el material de balasto se apoyará sobre material de buena calidad, (concreto o relleno fluido), el espesor total de balasto sería:

$$h = \left(17 * \frac{2 * 4.73}{2} \right)^{\frac{1}{1.25}}$$
$$h = 33.5 \text{ cm}$$

Error de unidades

Constructivamente el mínimo espesor de balasto es de 30cm.

(a)



(b)

Figura 21. a) AREMA, 2010, Vol. 1. 1-1-65, b) arrastre de finos observados durante la visita técnica.



Referencias

AREMA, 2010. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Volume 1

AREA, 1920. American Railway of Engineering Association. Proceedings of the Twenty-First Annual Convention of the American Railway Engineering Association. Chicago. Illinois March 16. 17 and 18. 1920 VOLUME 21

DD-12-PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00

Talbot, A.N. 1920. Second Progress Report of the Special Committee to Report on Stresses in Railroad Track, AREA Proceedings, Volume 21, 1920, pp.645-814.