

Opinión Técnica para el Tramo Subterráneo Línea 12 Ciudad de México

Informe de revisión de diseño de Terracerías.

Ingenieros Civiles Asociados S.A de C.V.

Número de proyecto: 606721993

Enero 12, 2022



Historial de revisión

Cotejo	Fecha de revisión	Detalles	Autorizado	Nombre	Posición

Lista de distribución

#Copias impresas	PDF requerido	Asociación/ Nombre de la compañía

Preparado para:

ICA S.A de C.V

Preparado por:

Sergio Sanchez

AECOM Inocsa
S.L.U.
Alfonso XII Street
62 5th floor
28014 Madrid
Spain

T: + 34 915 487 790
aecom.com

© 2022 AECOM Inocsa; S.L.U.. Todos los Derechos Reservados.

Este documento ha sido preparado por AECOM Inocsa; S.L.U. ("AECOM") para único uso del cliente (el "Cliente") en relación con los principios de consultoría, aceptados de manera general; el presupuesto de tasas y los términos de referencia acordados entre AECOM y el Cliente. Cualquier información proporcionada por terceros y mencionada a los presentes que no ha sido verificada por AECOM, a excepción de que se declare lo contrario en el documento. Ningún tercero podrá apoyarse en el presente documento sin la autorización y un acuerdo escrito de AECOM.

Tabla de Contenido.

1.	Limitación de responsabilidad.....	5
2.	Introducción.....	5
3.	Terracerías	6
3.1	Cotejo de la información referencial	7
3.1.1	Anexo 1. Términos de Referencia	7
3.1.2	Libros Naranja.....	7
3.1.3	Especificaciones del AREMA en relación a la conformación de la rasante y sub-rasante	9
3.1.4	Cotejo del Proyecto Ejecutivo	10
3.1.4.1	Documentación incluida en el Volumen Proyecto ejecutivo PG.	12
3.1.4.2	Documentación incluida en el Volumen Estructuras.....	12
3.1.4.3	Informes agrupados bajo la denominación 'Secuencia de Diseño de túnel con dovelas'	16
3.1.4.4	Relleno Grava-Arena.....	21
3.1.4.5	Cotejo de la memoria justificativa del empleo de material tipo base.....	22
3.2	Conclusiones.	31

Figuras

Figure 1	Espesores rasantes a subrasante, solución tipo túnel, según Libro 2, capítulo 2.01.01.004 'Especificaciones de perfil'. Libros Naranja.	8
Figure 2	Pauta para el dimensionamiento de las secciones de túnel en vía simple y doble. Arema Manual. Volumen 1 – Track, Part 8 'Tunnels'.....	10
Figure 3	Tipos de cubetas en el tramo subterráneo. Reporte Geotécnico del estudio del comportamiento esfuerzo-deformación en los estratos de balasto y relleno grava-arena por el peso del tren en condición estática y dinámica. ICA. 2021.	11
Figure 4	Modelo de cálculo implementando el anillo de refuerzo interior al anillo de dovelas. PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00.PDF. 20+362.184 A 21+851.....	13
Figure 5	Modelo de cálculo implementando el refuerzo inferior al anillo de dovelas. PMDF-11-EST-612000-III-0093-10393-M-00, 21+300 A 21+800	14
Figure 6	Solución de relleno tipo base de 40 cm bajo balasto, PMDF-11-EST-612000-III-0117-50757-B-00_1..pdf (10/2011).....	21
Figure 7	Variaciones en la aplicación del revestimiento secundario del túnel. 'Presentación Diseño túnel relleno y drenaje26nov2014'	22
Figure 8	Factor de Distribución de acuerdo con el manual de la AREMA.	26
Figure 9	Granulometría propuesta para el material tipo Base.	29

1. Limitación de responsabilidad

El presente reporte refleja los resultados de los hallazgos derivados del cotejo realizado a los documentos de diseño como parte de los trabajos de la asesoría técnica sobre el cumplimiento del diseño conforme a normativa para tres campos de la ingeniería del tramo subterráneo (túnel) de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México: proyecto geométrico, terracerías y sistemas de drenajes.

El análisis hecho por AECOM se basó únicamente en los documentos entregados a AECOM por ICA, que son los indicados en el numeral 1 del presente reporte, y no tomaron en cuenta ninguna otra información o evolución in situ del proyecto o de su construcción.

Por lo tanto, ni este documento ni ningún otro integrante de los estudios de la asesoría constituyen un dictamen técnico, ni una certificación, ni una validación de los diseños realizados por ICA para el proyecto, ni tampoco constituyen una validación sobre los métodos de construcción o sobre la ejecución de la construcción. AECOM no asume ninguna responsabilidad por reclamos derivados del diseño o de la construcción, ni ofrece ninguna garantía explícita ni implícita sobre la idoneidad de sus reportes para cualquier uso específico.

El contenido del presente documento constituye una opinión técnica independiente de quien lo elabora, que refleja únicamente los resultados de los hallazgos encontrados durante la revisión de la documentación técnica, y el cotejo con la información de diseño disponible.

2. Introducción

El presente reporte constituye los resultados de la revisión realizada por AECOM para el tramo subterráneo de la Línea 12 del Metro de la CDMX, se ha realizado un cotejo del diseño contra las normativas y prácticas internacionales para proyectos similares.

Se ha comparado que los documentos de diseño se hayan hecho en apego a la normativa vigente durante la ejecución del diseño de detalle; en particular a: (i) las especificaciones establecidas en la Convocatoria de la Licitación efectuada para dicho proyecto, (ii) las especificaciones propias del Metro de la Ciudad de México (Libros naranja, Volumen 1, 1986; Volumen 2 y 3: 1987) y las Normas Técnicas Complementarias del Reglamento de Construcción del Distrito Federal en lo que llegase a ser aplicable en el 2008.

3. Terracerías

El presente apartado tiene por objeto cotejar el diseño ejecutivo contra la normativa aplicable del sector túnel TBM con relación a las capas de apoyo de los durmientes que conforman el relleno de la cubeta bajo vías.

Para el cotejo de estos diseños se ha tenido en cuenta la siguiente información referencial aportada por ICA:

- Anexo 1. Términos de Referencia
- Libros Naranja. Especificaciones para el Proyecto y Construcción de las Líneas del Metro de la Ciudad de México.
- Del Proyecto Ejecutivo:
 - Volumen 'Proyecto ejecutivo PG'
 - Volumen 'Estructuras'
 - Informes agrupados bajo la denominación 'Secuencia de Diseño de túnel con dovelas' conformada por documentos de carácter estructural.
 - Documentación agrupada bajo la denominación 'Relleno Grava-Arena'; en especial la Memoria PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00: "Memoria del relleno con Material tipo base en la cubeta del túnel con dovelas de la Línea 12 del Metro", con fecha de Diciembre de 2011.

Igualmente, dado que el Proyecto alude a esta norma y resulta razonable su consideración a efectos de proyectos ferroviarios donde no existe especificación particular para ello, se ha comparado el contenido del Manual (2008) de la AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-way Association) en lo relativo a conformación de la rasante y subrasante.

Se recogen, por tanto, a continuación, y en primer lugar, los comentarios relativos al cotejo del proyecto referencia y especificaciones de partida.

En segundo lugar, se aborda el citado estado del arte para, finalmente, exponer unas conclusiones con relación a la evaluación técnica de los diseños de las terracerías del tramo ejecutado mediante TBM de la Línea 12 del Metro de la Ciudad de México.

3.1 Cotejo de la información referencial

3.1.1 Anexo 1. Términos de Referencia

No se contempla en los términos de referencia gran detalle en relación al apoyo de la vía dentro del proyecto. Únicamente, en el apartado 7.2 DESARROLLO DEL PROYECTO DEL SISTEMA DE VIAS, se indica que este apoyo será sobre balasto (remitiendo a efectos de sus características al Anexo 11) y durmiente de concreto. De cualquier manera, para hacer el cotejo descrito previamente, se hizo una lectura exhaustiva de la información disponible y se identificaron aspectos que son comentados en el presente informe,

En el presente documento se limitan los comentarios a lo relativo a materiales granulares de soporte de la vía y su interacción con el revestimiento, no se hace mención al material rodante.

3.1.2 Libros Naranja

Se recoge seguidamente comentario a las secciones y capítulos que guarden relación al diseño y/o ejecución de terracerías y túneles.

En el capítulo 2.01.01.004 'Especificaciones de perfil', correspondiente a la sección de Proyecto Geométrico de la Parte 2.01 Obra Civil (Libro 2), se recoge en 004.E ESPESORES DE SUBRASANTE A RASANTE SEGÚN EL TIPO DE SOLUCIÓN que

Los espesores de subrasante a rasante varían de acuerdo a la solución estructural y tipo de relleno recomendado para cada caso, como se indica a continuación:

Incluyendo la siguiente tabla:

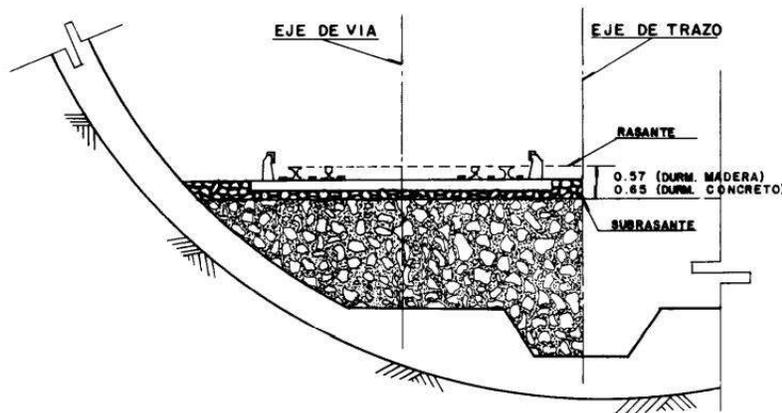
Tabla 1

Tipo de solución	Espesor de subrasante a rasante, en m		
	Fijación/ balasto		Fijación/ concreto
	Durm. madera	Durm. concreto	
Viaducto elevado (1)	0.52	0.65	
Superficial (2)	0.57	0.65	
Cajón subterráneo (3)	0.71	0.75	0.38
Túnel (4)	0.57	0.65	0.38

- (1) fig 04-4b
- (2) fig 04-4a
- (3) fig 04-5a y b
- (4) fig 04-6

Espesores rasantes a subrasante según Libro 2, capítulo 2.01.01.004 'Especificaciones de perfil'. Libros Naranja.

Y acompañando la misma con la siguiente figura para el caso de empleo de balasto:



(a) Solución tipo túnel

Figure 1 Espesores rasantes a subrasante, solución tipo túnel, según Libro 2, capítulo 2.01.01.004 'Especificaciones de perfil'. Libros Naranja.

El capítulo 2.01.03.005, forma parte igualmente del Libro 2 sección 2.01.03 Mecánica de Suelos y está denominado como 'Rellenos y terraplenes'. Éste no recoge alusión alguna al proyecto de rellenos en túneles. Se alude a solución en cajón para la línea, pero los comentarios se limitan a rellenos del trasdós (contiguos al revestimiento) o sobre losa superior.

Por su parte, el capítulo 2.01.03.006, denominado 'Solución en túnel' no recoge alusión alguna a la conformación del interior de la sección; esto es, al relleno de la contrabóveda.

Finalmente, por lo que respecta al Libro 2, en el Capítulo 2.02.02.002 se habla de la implantación de la vía y, en particular, de la vía sobre balasto. Es en este apartado donde se recogen los mínimos espesores de balasto para diseño; aceptándose en condiciones especiales reducciones hasta los 20 cm:

Tabla 2

Tabla 002-1. Espesor mínimo de la capa de balasto

Ubicación de la vía	Espesor mínimo, en cm
Subterránea	40
Superficial	30
Túnel	30
Viaducto elevado	30
Talleres	20

Espesores mínimos de balasto, según Libro 2, capítulo 2.02.02.002 'Implantación de vía'. Libros Naranja.

En el Libro 3 se recogen especificaciones para la construcción.

En la Sección 3.01.04, de la parte 3.01 OBRA CIVIL, denominada Líneas subterráneas en túnel, no se ha encontrado alusión a la conformación de la contrabóveda o cubeta de los túneles, centrándose esta sección en la ejecución de la obra desde el punto de vista geotécnico y de revestimiento.

En el caso de túneles en cajón, se hace sólo alusión a rellenos sobre el dintel de los mismos y éstos se tratan en el Capítulo 3.01.03.009.

El Capítulo 3.01.07.004, denominado TERRACERÍAS, que se localiza en la SECCIÓN 3.01.07 OBRAS de URBANIZACIÓN, es el único que hace alusión a la formación de la subrasante, pero sólo en referencia a obras viales.

En el Libro 4 de los Libros Naranja se recogen las características de los materiales. Tan sólo se citan los materiales para base y sub-base; remitiéndose en relación a los materiales para terracerías al Libro Quinto de las Normas Generales de Construcción del DDF.

Respecto a los materiales para Base y Sub-Base, se establecen criterios para seleccionar su granulometría y valores índice de plasticidad, equivalente de arena, etc. Como veremos más adelante.

En definitiva, tras el cotejo de los Libros Naranja se puede constatar que no se define con precisión cómo ha de configurarse la subrasante ni cómo han de constituirse las capas superiores hasta conformar la rasante. No existen secciones tipo ni hay alusión concreta al empleo de capa alguna de Base (o subbalasto) bajo el balasto.

De la lectura del expediente en cuanto a espesores mínimos de balasto y de rasante a subrasante, pareciera que la configuración por defecto (por default) descartara el empleo de otro material que no sea el balasto sobre la subrasante ya que es del primero del que se describen sus características. Por otra parte, del análisis de la normativa no se identificaron requisitos para los materiales de subrasante

3.1.3 Especificaciones del AREMA en relación a la conformación de la rasante y sub-rasante

La configuración dada por el AREMA (2008) con respecto a la formación de la rasante, es la usual de los proyectos ferroviarios y consistente en una subrasante coronada por capas de subbalasto y balasto.

En el Volumen 1 – Track, Parte 2 ‘Ballast’ se recogen las especificaciones a cumplir por los materiales y expresiones para el dimensionamiento del espesor de las capas, como se verá más adelante al cotejar la memoria PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00,

La parte 8 se denomina ‘Tunnels’ y trata de forma sucinta diversa temática; entre otra, la de las dimensiones de la sección. La figura siguiente recoge la propuesta general de sección típica que, como puede comprobarse, deja la puerta abierta a una rasante conformada por balasto y subbalasto apoyando sobre una subrasante.

En cualquier caso, hay que contextualizar el alcance de este manual, enfocado a una generalidad del mundo ferroviario, túneles interurbanos antiguos, muchas veces cortos, etc...

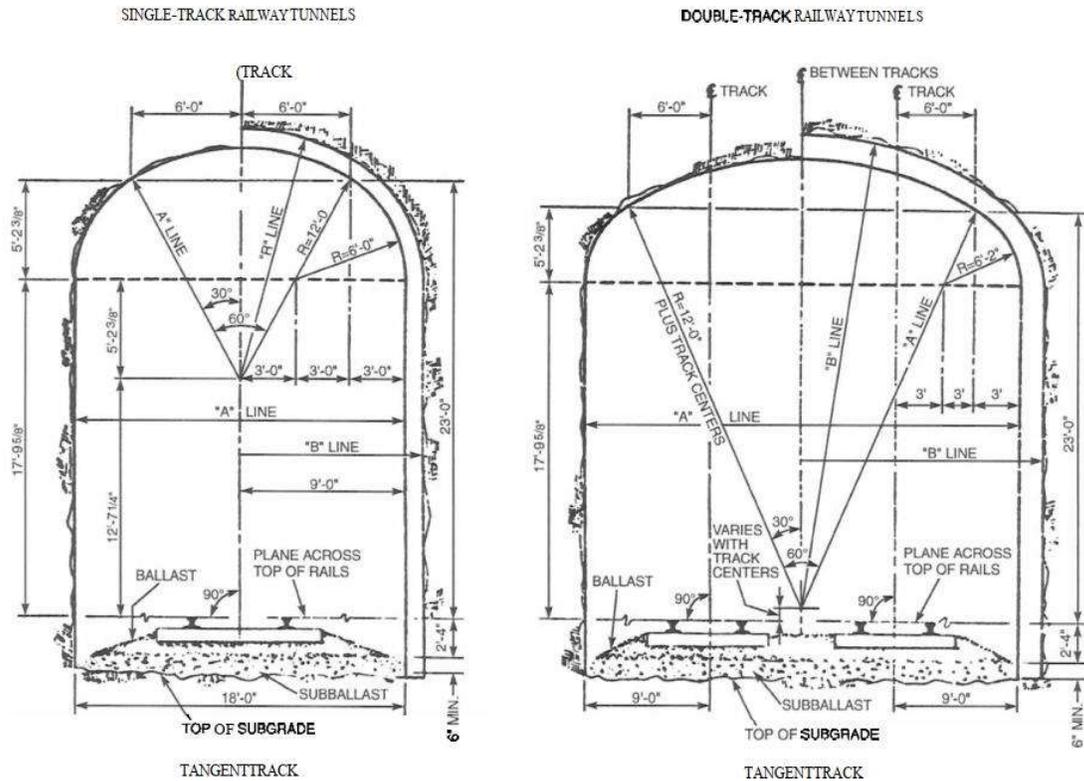


Figure 2 Pauta para el dimensionamiento de las secciones de túnel en vía simple y doble. Arema Manual. Volumen 1 – Track, Part 8 ‘Tunnels’.

3.1.4 Cotejo del Proyecto Ejecutivo

El túnel con TBM estaría comprendido entre la Lumbrera Centeno, cadenamiento 20+360.217, y el cadenamiento 27+347; coincidiendo con un pequeño sector de túnel mediante sistema convencional inmediato a la estación de Insurgentes (27+390.704-27+544.700).

Al cotejarse la documentación referencial del Proyecto no se ha podido correlacionar perfectamente los cadenamientos con las secciones ejecutadas, es por ello que mediante la información generada el año 2021 se ha podido confirmar las características de la solución de terracerías implementada y relacionarlos a los cadenamientos realmente ejecutados.

De este modo, las imágenes en la siguiente figura son las secciones teóricamente ejecutadas conforme a la información proporcionada por ICA para la elaboración del presente informe. Los cadenamientos y secciones mostrados a continuación corresponden al documento ANEXO 6.2.2.2 análisis de esfuerzo deformación mediante elemento finito.

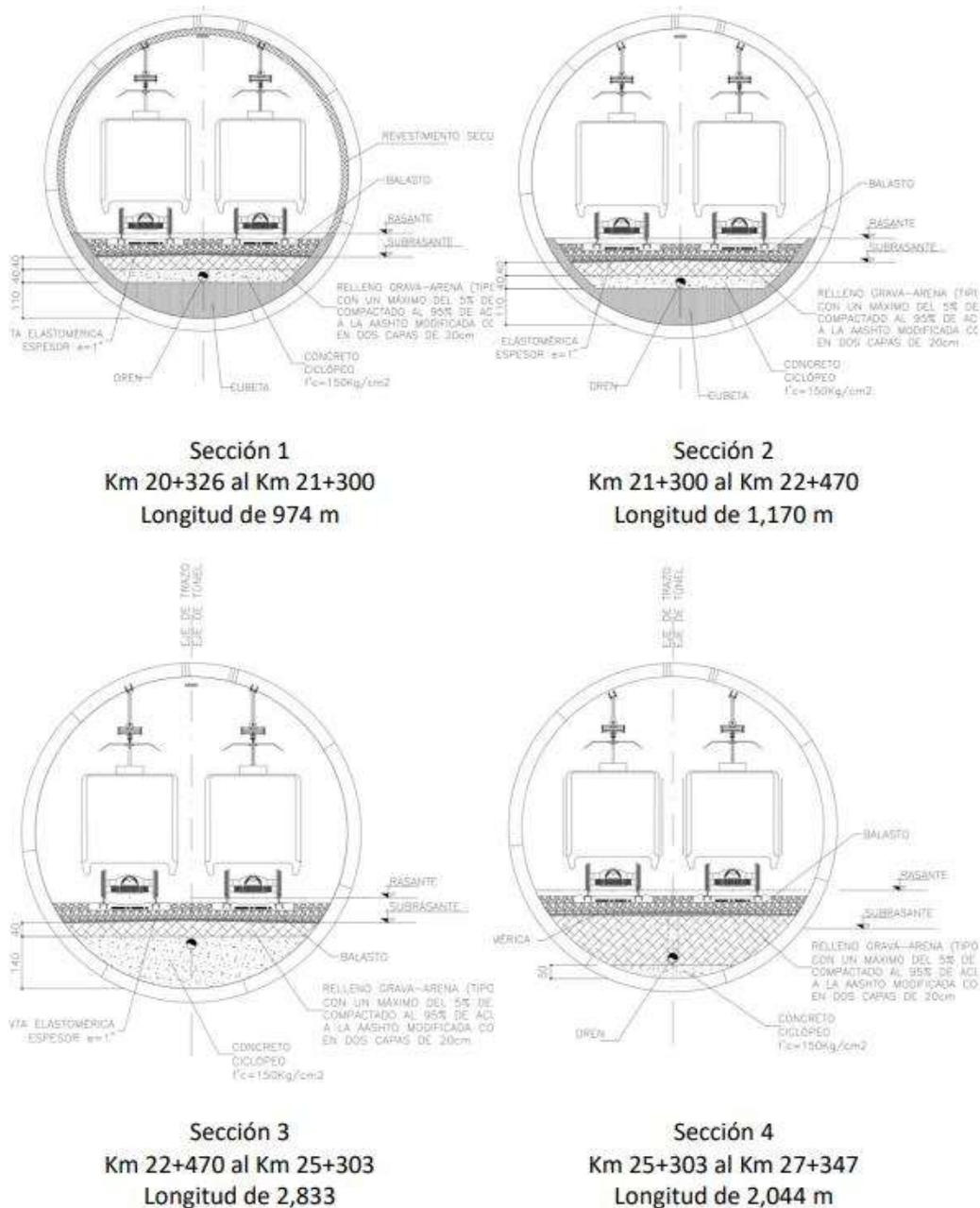


Figure 3 Tipos de cubetas en el tramo subterráneo. Reporte Geotécnico del estudio del comportamiento esfuerzo-deformación en los estratos de balasto y relleno grava-arena por el peso del tren en condición estática y dinámica. ICA. 2021.

Como se puede comprobar, todas las secciones cuentan bajo balasto con, al menos, 40 cm de relleno grava-arena tipo base.

Las distintas configuraciones responden, como se indicará más adelante, a la necesidad de reforzar la cubeta de la sección como consecuencia del asentamiento esperado en el material cuaternario blando por el que discurre el túnel de línea (consolidación regional). A medida que la contrabóveda penetra en materiales más consolidados, este refuerzo deja de ser necesario.

3.1.4.1 Documentación incluida en el Volumen Proyecto ejecutivo PG.

Dentro de la documentación del diseño, se cuenta con la memoria PMDF-09-PG-612000-III-0001-03029-M-00.pdf, la cual se corresponde con la memoria del trazo y perfil de Línea 12 de Tláhuac a Mixcoac.

Se incluyen 12 planos de secciones, de los cuales los PMDF-09-PG-612000-III-0018-03313-P-00.PDF y PMDF-09-PG-612000-III-0019-03314-P-00.PDF incluyen secciones de túnel con tuneladora, pero de una configuración que, entendemos, no se corresponde con la finalmente diseñada con base granular. Entendemos válidas estas secciones solamente para el diseño geométrico.

El resto de los planos corresponden con secciones de sectores ajenos al alcance de este informe técnico, así como planos de trazo y perfil del tramo.

3.1.4.2 Documentación incluida en el Volumen Estructuras

Dentro de este volumen, se han incluido 3 documentos, Anexos 2.2, 2.3 y 2.4 que, corresponden todos ellos con versión de 2021. Cabe señalar que además ICA hizo saber a AECOM que el contenido del Anexo 2.3 fue elaborado por el Dr. José Luis Rangel durante la fase de diseño por lo que fue integrado al expediente usado para la elaboración del presente informe.

El Anexo 2.2 ayuda a entender la aplicación de secciones tipo a lo largo del túnel con TBM y las secciones representativas de otros métodos constructivos y en cada una se cuenta con información de la sección estructural.

La información de este Volumen o carpeta se corresponde fundamentalmente por planos de refuerzo estructural del anillo de dovelas. A esta información, se suman las siguientes notas técnicas o Memorias de diseño:

- PMDF-09-EST-612000-III-0020-04761-M-00.PDF, relativa al cálculo de dovelas. 20+362 A 21+700
- PMDF-09-EST-612000-III-0025-03521-M-01.PDF, relativa al cálculo de dovelas. 26+774 A 27+774.487
- PMDF-10-EST-612000-III-0035-05411-M-00.PDF, relativa al cálculo de dovelas. 21+820 A 22+900
- PMDF-10-EST-612000-III-0041-05420-M-01.pdf, acerca del empleo de agregado grueso calizo

- PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00.PDF, acerca del cálculo del armado estructural del revestimiento secundario y cubeta de concreto de túnel de dovelas prefabricadas. 20+362.184 A 21+851 (09/03/2011)
- PMDF-11-EST-612000-III-0093-10393-M-00, relativa a la comparación estructural del revestimiento de dovelas para largo plazo. 21+300 A 21+800 (01/08/2011)

Como se puede apreciar, los cadenamientos de los anteriores documentos abarcan la gran mayoría de los tramos del túnel TBM con dovelas.

Se indica que los cadenamientos que se corresponden con la Zona Homogénea (geotécnicamente) 1 son de 20+362.184 a 21+851. Es para esta zona, para la que se estima el refuerzo de la siguiente figura:

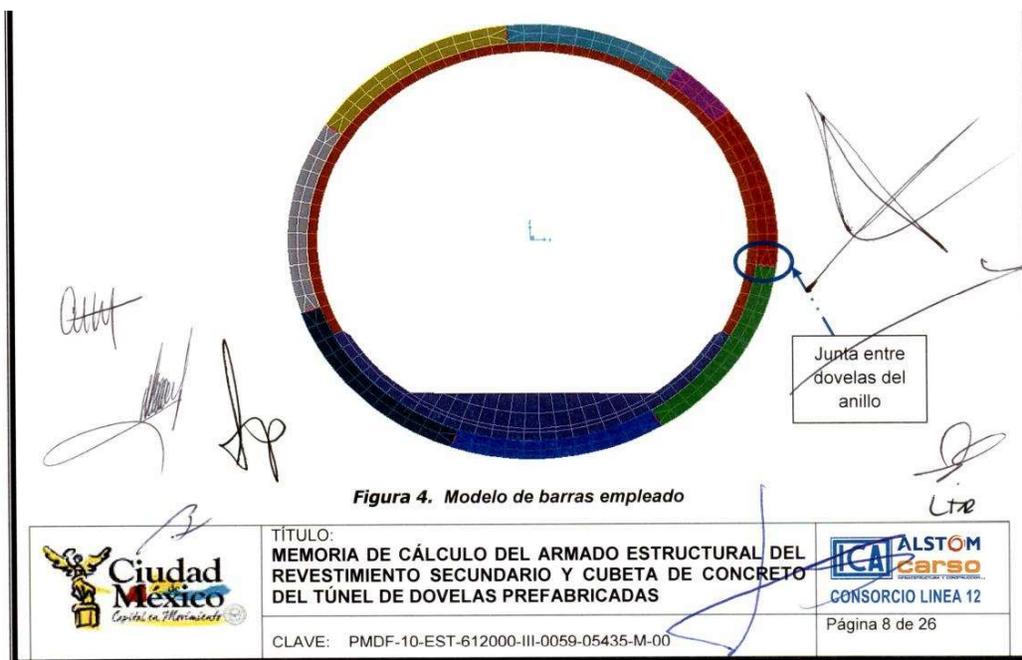


Figure 4 Modelo de cálculo implementando el anillo de refuerzo interior al anillo de dovelas. PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00.PDF. 20+362.184 A 21+851

Posteriormente, parece efectuarse una optimización a la anterior solución entre los cadenamientos 21+300 A 21+800. Es decir, un refuerzo sólo en la zona inferior, que se ilustra mediante la siguiente figura en la nota PMDF-11-EST-612000-III-0093-10393-M-00. No obstante, parece que esta solución se prolongaría hasta el cadenamiento 22+470 en la ejecución.

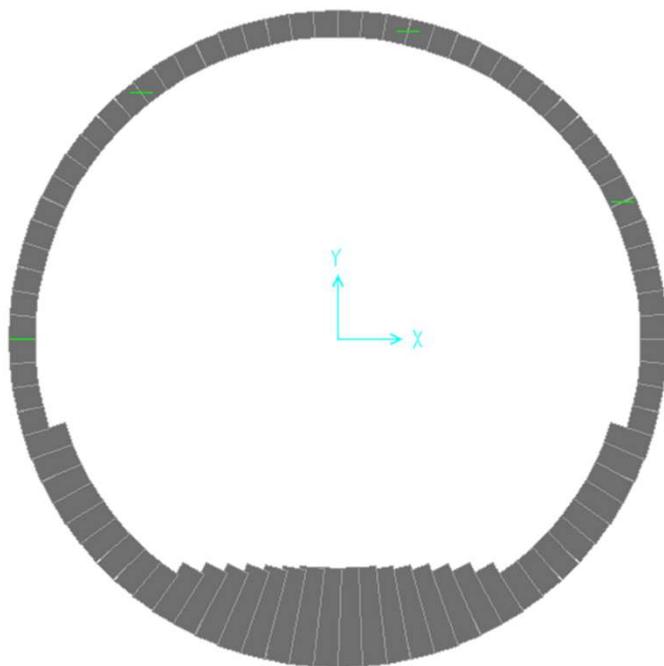


Figure 5 Modelo de cálculo implementando el refuerzo inferior al anillo de dovelas. PMDF-11-EST-612000-III-0093-10393-M-00. 21+300 A 21+800

En términos generales, el diseño estructural del túnel de dovelas es consistente con los criterios de diseño internacionales aplicados en túneles de dovelas de concreto prefabricado siguiendo la metodología alemana que son instalados con maquina tuneladora TBM indicado en las referencias de las memorias. Esta tecnología se comenzó a utilizar en la década de los 80's y conforme fue avanzando la tecnología se diseñaron las máquinas TBM para diferentes tipos de suelos y de rocas. Por otra parte, en los llamados libros naranja del STC solo hacen referencia a la determinación del espesor del revestimiento con dovelas y lo que observa AECOM que con la metodología seguida en el diseño queda cubierta por lo indicado por la STC.

3.1.4.2.1 Comentario con relación al tema sísmico

En el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal del 2004 (RCDF-2004) y sus respectivas Normas Complementarias (NTC-Concreto y NTC-Sismo), no incluye lineamientos en el tema sísmico para la infraestructura subterránea como las líneas del metro, sólo las NTC-Sismo marcan una zonificación para estructuras cimentadas sobre la superficie. Pero en la sección 5.2 de la memoria PMDF-09-EST-612000-III-0025-03521-M-01 con fecha del 24 de mayo de 2011, se menciona "El objeto estructural es realizar el comparativo de los siguientes aspectos tanto para condiciones estáticas como para la condición sísmica", sin embargo, no se muestra el comparativo de las dovelas del túnel para esta condición, ni tampoco en ninguna memoria indicadas en la sección anterior, como se muestra en la siguiente imagen tomada del texto original.

5.2 Modelo de cálculo

El objeto del cálculo estructural es realizar el análisis de los siguientes aspectos tanto para condición estática como para la **condición sísmica**

Por lo que la única información del proyecto que se ha leído de la documentación estructural relacionada con el sísmico se encuentra en el documento "Anexo 2.3 – Revisión por sismo". En este documento, se realizó el comparativo de una longitud del túnel de dovelas de 900m, entre los cadenamientos 20+900 a 21+800 que corresponde desde la estación Mexicaltzingo, en dirección Ermita, hasta el cruce con Circuito Interior Río Churubusco. Con base en este comparativo sísmico indicado en el documento, se siguen las consideraciones aplicando la ubicación de la fuente, magnitud, profundidad y leyes de atenuación para la estimación del espectro de respuesta y el acelerograma sintético, así mismo se hace una comparación con las consideraciones indicado en las NTC-Sismo para cimentaciones de estructuras superficiales con la aplicación de las fuerzas sísmicas 100% en una dirección y el 30% en la dirección perpendicular. Con base en este comparativo se indican las deformaciones longitudinales y transversales, cuyos valores se suman a los valores estáticos y se determina que las deformaciones transversales de ovalamiento del túnel son de 0.0043 con la máxima deformación, lo cual es menor a la deformación aceptada en los criterios internacionales e indicada en las memorias "La deformación diametral máxima permisible es de 0.0075 veces el diámetro del túnel" como se muestra en la siguiente imagen y que es recomendada por la Sociedad Británica de Túneles (BTS, 2004), citada por Carpio Santamaria Presentación del Instituto de Ingeniería de la UNAM, <https://www.uv.mx/veracruz/fich/files/2020/06/presentacion-carpio-santamaria.pdf>.

	TITULO: MEMORIA DE LA REVISIÓN ESTRUCTURAL DEL REVESTIMIENTO DE DOVELAS PARA LARGO PLAZO	 CONSORCIO LINEA 12
	CLAVE: PMDF-11-EST-612000-III-0093-10393-M-00	Página 22 de 43

La deformación diametral máxima permisible es de 0.0075 veces el diámetro del túnel. Dado que el túnel tiene un diámetro promedio de 9510mm entonces la deformación diametral máxima permisible es de 71.325mm. Y producto del análisis estructural tenemos la siguiente tabla:

De acuerdo con el análisis sísmico indicado en el documento "Anexo 2.3 – Revisión por sismo", se observa que los efectos sísmicos sobre el túnel de los anillos de dovelas no es una condición crítica y las acciones sísmicas no rigen el diseño estructural, como sí lo son los efectos producidos por la presión del terreno que cambia a largo plazo en suelos blandos, como son los debidos a los parámetros geotécnicos, la piezometría y la evolución de la consolidación regional por el abatimiento del nivel freático.

3.1.4.3 Informes agrupados bajo la denominación ‘Secuencia de Diseño de túnel con dovelas’

La información disponible relacionada con el diseño de las dovelas se organiza como se muestra a continuación.

Name	Modified	Modified By	File size	Sharing
1. Exploración Geotécnica	October 8	Cruz, Pablo	4 items	Shared
2. Parámetros DIRAC	October 8	Cruz, Pablo	8 items	Shared
3. Parámetros ICA	October 8	Cruz, Pablo	10 items	Shared
4. Planos y memorias estructurales	October 8	Cruz, Pablo	64 items	Shared
5. Bases de diseño	October 8	Cruz, Pablo	3 items	Shared
6. Proyecto Geométrico de dovelas	October 8	Cruz, Pablo	18 items	Shared

La información relativa a ‘Exploración Geotécnica’ se corresponde con registros de ensayos y pruebas de campo, figuras, así como un informe final de resultados de Geotec con fecha Diciembre de 2008.

Por su parte, la información contenida en ‘Parámetros DIRAC’ se refiere a diferentes propuestas de parámetros de estimación, en algún caso específicos para el estudio de la consolidación a largo plazo, referidos a diferentes sectores, aparentemente sin una estructura u organización clara. Se listan seguidamente tratando inferir una posible sectorización geotécnica.

- Parm_Subst_L-12_M_50_años_Rev_F___Túnel (ZH1).pdf, relativo a ‘Parámetros del subsuelo para el estudio del efecto de los asientos regionales sobre el revestimiento del túnel’. En principio no restringido a un sector específico.
- PMDF-09-MS-612000-III-0031-02483-M-00a.pdf; recoge propuesta de parámetro a largo plazo para el sector KM 20+347 A KM 21+700
- 091120_PARAMETROS_Z_B_TABLAS_(20_NOV_09) 20(Z2B).pdf, relativo a ZONA B, DEL KM 21+700 AL KM 21+900
- 091016 Parámetros a largo plazo zona 2 – C (ZH2A).pdf, relativo a la zona ZONA C, DEL KM 21+900 AL KM 22+900
- PARAM_GEOT_TUNEL_Z_D_L_12_(30_MARZ_10) 20(ZH4).pdf, relativo al TRAMO d, del 22+900 al 24+900
- 090902_Param_Geot_L-12_M_Lumb_Sal_-_Est_20_Nov__02_SEPT_09__REV_3 20(ZH5).pdf; relativo a LUMBRERA DE SALIDA KM 28+080 A LA ESTACIÓN 20 DE NOVIEMBRE KM 26+678, LUMBRERA DE SALIDA

- PMDF-09-MS-612000-III-0037-03270-D-00 Parámetros Dirac ZH5.pdf, recoge propuesta de parámetro a largo plazo para el sector KM 26+678 A KM 28+080
- PMDF-09-MS-612000-III-0037-03270-D-00.pdf, mismo archivo que el anterior.

Como se puede observar, se denomina a los sectores como ZH, alfabéticamente, etc. Se trata de documentos que abarcan las fechas de Junio de 2009 a septiembre de 2010.

A continuación, se presentan los documentos relativos a 'Parámetros ICA'.

- PMDF-10-MS-612000-III-0116-06067-M-00.pdf, 03/12/2021, presenta la propuesta de parámetros para el diseño de dovelas en la **Zona Homogénea 4**: Eje Central – 20 de Noviembre; **24+900 al 26+200**.
- PMDF-10-MS-612000-III-0116-06067-M-01.PDF; versión de 17/06/2011, con módulo de elasticidad y plaxis
- PMDF-10-MS-612235-III-0076-06031-M-00.docx, 21/09/2010, presenta la propuesta de parámetros para el diseño de dovelas en la **Zona Homogénea 3**: Ermita – Parque de los Venados; **22+900 al 24+900**.
- PMDF-10-MS-612235-III-0076-06031-M-00.pdf, 02/09/2010, presenta la propuesta de parámetros para el diseño de dovelas en la **Zona Homogénea 2**: Mexicaltzingo - Ermita; **21+820 al 22+900**.
- PMDF-10-MS-612235-III-0076-06031-M-003 ZH1.docx, 19/08/2010, presenta la propuesta de parámetros para el diseño de dovelas en la **Zona Homogénea 1**: Mexicaltzingo – Lumbrera de Acceso en el tramo Mexicaltzingo – Ermita. No se especifican cadenamientos.
- PMDF-11-MS-612000-III-0222-06165-M-00.pdf.PDF, 21/06/2011, presenta la propuesta de parámetros para el diseño de dovelas en la **Zona Homogénea 5**: No se especifican cadenamientos, pero parece abordarse desde 20 de Noviembre a Lumbrera de salida.
- PMDF-11-MS-612000-III-0094-10394-M-00.PDF, 08/2011, se corresponde con el geotécnico del revestimiento de dovelas. Esto es obtención de los esfuerzos inducidos en el anillo por la consolidación regional empleando PLAXIS. Cadenamiento **21+300 a 21+800**.
- PMDF-11-MS-612000-III-0096-10396-M-00.PDF, 08/2011, se corresponde con el geotécnico del revestimiento de dovelas. Esto es obtención de los esfuerzos inducidos en el anillo por la consolidación regional empleando PLAXIS. Cadenamiento **21+800 a 22+900**.
- PMDF-11-MS-612000-III-0096-10396-M-01.PDF, 26/09/2011, anterior con cadenamamiento **21+800 a 22+400**.

- PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00.pdf, 12/2011. Se denomina 'Memoria del relleno con material base en la cubeta del túnel con dovelas de la Línea 12 del Metro'.

Este último documento será objeto de cotejo en un apartado específico.

El resto de documentos, parecen recoger los parámetros geotécnicos para el diseño a lo largo del trazo, sectorizando el mismo en cinco Zonas Homogéneas, aproximada pero no exactamente coincidentes con las recogidas en el Larguillo del trazo de 2021 y que son:

ZH1 del 20+360.217 A 21+700

ZH2 del 21+700 A 22+900

ZH3 del 22+900 A 24+900

ZH4 del 24+900 A 26+774

ZH5 del 26+774 A 27+390

Igualmente, se recogen estudios de esfuerzos inducidos en la sección por la consolidación regional entre los cadenamientos 21+300 a 22+400.

Por su parte, en 'Planos y memorias estructurales' se recogen, por un lado, planos de armado de las dovelas cuyo comentario no forma parte del alcance de este documento, así como memorias y otras notas técnicas que sí se han cotejado de forma general para poder entender la sectorización del túnel con TBM a efectos estructurales y de terracerías.

Se presentan también algunas secciones tipo con los refuerzos estructurales, si bien el detalle entre balasto y anillo de dovelas (relleno de la cubeta), no parece coherente con lo ejecutado o el empleo del material tipo base.

Con relación a los documentos, éstos son:

- PMDF-09-EST-612000-III-0020-04761-M-00.PDF, 17/11/2009, diseño del anillo de dovelas, 20+362.184 a 21+700
- PMDF-10-EST-612000-III-0035-05411-M-00.PDF, 03/09/2010, diseño del anillo de dovelas, 21+820 a 22+900, ZH2
- PMDF-10-EST-612000-III-0042-05421-M-00.PDF, 03/09/2010. Dovelas B y C, 21+770 a 21+950
- PMDF-10-EST-612000-III-0051-05426-M-00.pdf, 07/10/2010, diseño del anillo de dovelas, 22+900 a 24+900, ZH3

- PMDF-10-EST-612000-III-0061-05439-M-00.pdf, 24/12/2010, diseño del anillo de dovelas, 24+900 a 26.774.487, ZH4
- PMDF-09-EST-612000-III-0025-03521-M-00.PDF, 11/09/2002, diseño del anillo de dovelas, 26+774.487 a 28+073.320, ZH5.
- PMDF-09-EST-612000-III-0025-03521-M-00.PDF, 11/09/2002, diseño del anillo de dovelas, 26+774.487 a 27+771, ZH5
- PMDF-10-EST-612000-III-0056-05432-M-01.pdf, 02/12/2010diseño del anillo de dovelas (comprobaciones adicionales por cambio de árido), 22+900 a 24+900, ZH3
- PMDF-10-EST-612000-III-0059-05435-M-00.PDF, 09/03/2011. Cálculo de revestimiento secundario y cubeta de concreto. 20+362 a 21+851. ZH1.
- PMDF-10-EST-612000-III-0066-05445-M-00.PDF, 29/03/2011, Cálculo de la cubeta de concreto reforzado. 21+851 a 22+900, ZH2
- PMDF-11-EST-612000-III-0095-10395-M-00.PDF, 08/2011, comprobación del revestimiento de dovelas a largo plazo. 21+800 a 22+900.
 - Se matiza que la cubeta estructural debe ser integrada con el anillo.
- PMDF-11-EST-612000-III-0001-50001-M-00.PDF, 02/08/2011, comprobación del revestimiento de dovelas a largo plazo. 22+900 a 23+530. ZH3.
 - Se justifica que el simple anillo de dovelas bastaría para asumir los esfuerzos impuestos a largo plazo por la consolidación regional. Se imponen los esfuerzos del modelo geotécnico, pero dicho documento no aparece en la información cotejada (PMDF-11-MS-612000-III-0001-50001-M-00)
- PMDF-11-EST-612000-III-0002-50002-M-00.pdf, 02/08/2011, comprobación del revestimiento de dovelas a largo plazo. 23+530 a 23+900. ZH3.
 - Igualmente, se justifica que el simple anillo de dovelas bastaría para asumir los esfuerzos impuestos a largo plazo por la consolidación regional. Se imponen los esfuerzos del modelo geotécnico, pero dicho documento no aparece en la información cotejada (PMDF-11-MS-612000-III-0000-50000-M-00)
- PMDF-11-EST-612000-III-0013-50678-M-00.PDF, 08/2011, comprobación del revestimiento de dovelas a largo plazo. 22+900 a 23+530. ZH3.
 - Este documento recoge la matización de que el diseño incluye una CUBETA NO ESTRUCTURAL. Las conclusiones aluden, no obstante, al sector 23+560 a 23+900, lo

cual, entendemos, se trata de una errata dado que existe un documento específico para ese sector.

- PMDF-11-EST-612000-III-0015-50680-M-00.PDF, 08/2011, comprobación del revestimiento de dovelas a largo plazo. 23+530 a 23+900. ZH3.
 - Este documento recoge la matización de que el diseño incluye una CUBETA NO ESTRUCTURAL.
- PMDF-10-EST-612000-III-0041-05420-M-00.PDF, 03/09/2010, uso de agregado de tipo calizo, 21+770 a 22+900
- PMDF-10-EST-612000-III-0041-05420-M-01.pdf, 02/12/2010, uso de agregado de tipo calizo, 21+770 a 22+900
- PMDF-10-EST-612000-III-0056-05432-M-00.PDF, 25/10/2010, uso de agregado de tipo calizo, 22+900 a 24+900
- PMDF-11-EST-612000-III-0048-05465-E-00 ok.PDF, 21/12/2021, procedimiento reparación de dovelas.
- PMDF-11-EST-612000-III-0049-05466-E-00 ok.PDF, 21/12/2021, procedimiento de sellado de filtraciones en dovelas.

PMDf-11-EST-612000-III-0078-06978-M-00.PDF, 08/2011, cotejo para el empleo de anillos de dovelas de la ZH1 en la ZH5 del túnel

Como se puede observar el diseño de las dovelas sí coincide con la Zonificación Geotécnica (ZHs) del larguillo de 2021, si bien la sectorización de revestimiento secundario y cubeta estructural se aproxima más a las ZHs designadas por ICA durante 2010 y 2011.

Finalmente, en la documentación recogida en 'Bases de diseño' se presentan:

- DGPM-08-EST-612000-II-0002-00000-D-D.pdf, las cargas internas al túnel. Entre otras las características del material rodante, coincidente con lo recogido en las especificaciones del contrato.
- PMDF-09-MS-612000-III-0009-04777-E-00.pdf, se trata del procedimiento de trabajo de la EPB
- /PMDf-11-MS-612000-III-0096-10396-M-01.PDF, memoria repetida y ya comentada.

El capítulo de 'Proyecto Geométrico de dovelas' recoge los planos de definición geométrica del anillo.

3.1.4.4 Relleno Grava-Arena

Este volumen de documentación recoge los siguientes archivos:

- PMDF-11-EST-612000-III-0117-50757-B-00_1..pdf, 10/2011. Solución de relleno en cubeta, para dar nivel de proyecto.

En este documento se recoge la siguiente sección tipo que incluye 40 cm de material tipo base bajo el balasto y apoyando sobre la cubeta de concreto reforzado de la sección de refuerzo interior y comentada.

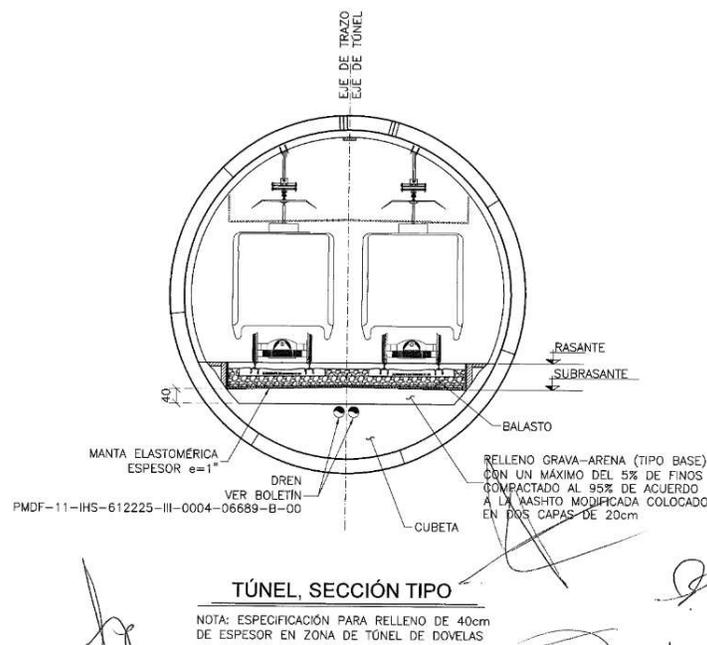


Figure 6 Solución de relleno tipo base de 40 cm bajo balasto. PMDF-11-EST-612000-III-0117-50757-B-00_1..pdf (10/2011)

- PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00.pdf, 12/2011, se corresponde con la nota de diseño 'Memoria del relleno con material tipo base en la cubeta del túnel con dovelas de la línea 12 del Metro'.

que, como se ha indicado, se cotejará detalladamente a continuación.

Finalmente, 'Presentación Diseño túnel relleno y drenaje26nov2014', incluye diapositivas de una presentación que, se interpreta pretendía aportar clarificación a los criterios de diseño de, entre otros aspectos, el empleo de diferentes secciones estructurales en el túnel con TBM y la adopción de la capa de base.

Se recogía el siguiente croquis que, sin ser preciso en cuanto a las secciones finalmente adoptadas y los cadenamientos, sí ayuda a comprender conceptualmente el hecho de que las

secciones más someras e íntegramente perforadas en materiales más blandos y superficiales, serían más sensibles a los problemas regionales de abatimiento de la capa freática.

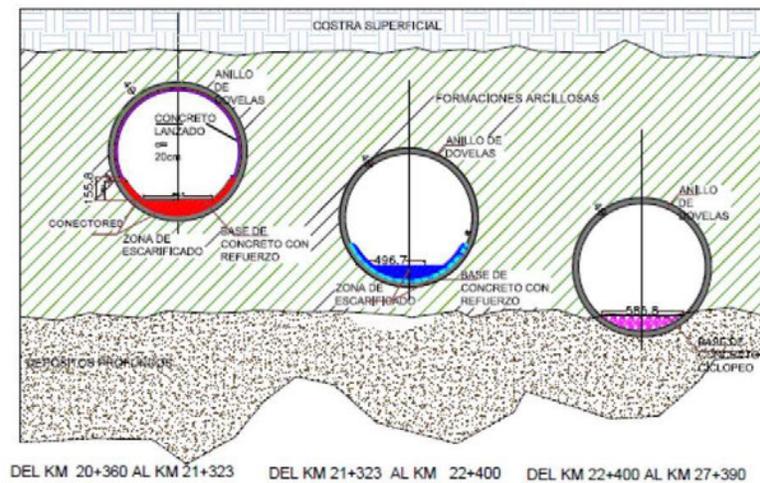


Figure 7 Variaciones en la aplicación del revestimiento secundario del túnel. 'Presentación Diseño túnel relleno y drenaje26nov2014'

3.1.4.5 Cotejo de la memoria justificativa del empleo de material tipo base.

En este apartado se recoge un cotejo detallado de la 'Memoria del relleno con material tipo base en la cubeta del túnel con dovelas de la línea 12 del Metro'; documento con codificación PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00.pdf.

El presente apartado tiene como objetivo la opinión técnica de la capa de material tipo Base realizado en diciembre de 2011, y se centra específicamente en el cotejo de la sección estructural o superestructura y las características del material tipo sub-balasto o base. Este diseño siguió las recomendaciones del antiguo manual AREA (American Railway of Engineering Association) y el AREMA de 2008.

El contenido que a continuación se presenta está principalmente fundamentado en las especificaciones del manual AREMA Manual 2008 (American Railway Engineering and Maintenance-of-way association), concretamente en los documentos: Volume 1 -Chapter 1- Roadway and Ballast_ Part 2 Ballast y Chapter 30 – Ties_ Part 4 Concrete Ties.

Opinión técnica de la sección estructural

En primer lugar, es posible comparar las especificaciones para los durmientes de concreto tipo monoblock según la sección de requerimientos del Manual AREMA 2008, en particular el apartado 4.3.2.1, donde se indica que la longitud general nominal de producción estándar no deberá ser menor que 7'-9" (2.360 m) y 8'-0" (2.440 m) para durmientes de concreto post tensionado y pre tensionado respectivamente y, por otro lado, el ancho entre 8 y 13" (20 y 33

cm). De acuerdo con esto, se cotejaría la medida del monoblock para este proyecto en particular, dentro de los rangos establecidos (20 cm de ancho x 240 cm de longitud).

Para el esfuerzo promedio bajo durmiente, la memoria considera para la obtención de P_o (presión actuante bajo el durmiente) la formulación siguiente,

$$P_o = \frac{W}{\left(\frac{2}{3}\right) b * L}$$

Siendo,

W: Fuerza transmitida por eje del convoy (kg)

b: Ancho del durmiente (cm)

L: Longitud del durmiente (cm)

Esta expresión es de cara a la estimación de la presión transmitida por la base del durmiente sobre el balasto y se corresponde con una formulación usual para este tipo de comparativa. Resulta de considerar que la tensión se concentra el tercio de durmiente inmediato bajo el riel.

Para las características del material móvil considerado (15 t por eje del material tipo PM-08, coincidente con el marcado por las especificaciones de la licitación), se puede indicar que el valor resultante de la tensión transmitida es correcto; variando sólo ligeramente, en decimales, en la presente comparativa:

Memoria (kg/cm ²)	Opinión Aecom (kg/cm ²)
4.73	4.68

Por otro lado, para la determinación del espesor mínimo de balasto se empleó la expresión.

$$h = \left(17 \frac{P_o}{P}\right)^{\frac{1}{1.25}}$$

Siendo,

P_o : Presión actuante bajo el durmiente, (la cual debe mayorarse con un factor FS=2)

P: Presión admisible en la capa subrasante, para la cual se sugieren los siguientes valores por el diseñador:

- 0.5 kg/cm² para suelo arcilloso de mala calidad
- 1.0 kg/cm² para suelo arcilloso de regular calidad

- 1.5 kg/cm² para suelo bien graduado
- 2.0 kg/cm² para material selecto

Valores que, por otro lado, resultan razonables para este supervisor.

En el Reporte Geotécnico del estudio del comportamiento esfuerzo-deformación en los estratos de balasto y relleno grava-arena por el peso del tren en condición estática y dinámica. ICA. 2021, se realiza un comparativo de los esfuerzos utilizando el Método de Elementos Finitos (MEF), se identifican cuatro zonas mostradas en la sección 2.1.4 de este documento, de las cuales se analizaron los dos casos donde se tiene material de relleno. El criterio de la aplicación de la carga es más realista que el indicado en 'Memoria del relleno con material tipo base en la cubeta del túnel con dovelas de la línea 12 del Metro'; documento con codificación PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00.pdf que sigue las recomendaciones de AREMA de 2008, en ambos casos se aplica la misma carga por bogie, En la memoria de cálculo se aplicaron las fórmulas indicadas por AREMA, donde se utilizó la carga de las 15 toneladas directamente como si fuese un eje equivalente y se le aplicó un factor de seguridad de 2 para estimar el espesor de balasto. Por lo que, al realizar el comparativo por el MEF, se aplicó también las cargas con el factor de 2, siendo consistente con la memoria de cálculo, pero aplicando la carga del bogie entre las cuatro ruedas, que es lo más parecido a la realidad, por lo que se distribuyen mejor los esfuerzos y por esta razón los resultados son menores a los obtenidos en la memoria que utiliza un criterio más conservador.

El diseño consideró para esta tensión admisible un valor de 2 kg/cm², asumiendo que el apoyo se realizará sobre material de buena calidad; algo que parece coherente a este supervisor. En estas condiciones el espesor necesario de balasto resultó de 33.5 cm. El mínimo espesor ejecutable y exigido tanto por AREMA como por los Libros Naranja de Metro de México es de 30 cm.

Para la estimación del espesor del subbalasto, se emplea la misma expresión anterior, si bien la metodología y obtención del factor de distribución resultan poco claras. No obstante, se han efectuado 3 estimaciones paralelamente siguiendo 3 metodologías (UIC, AREMA y Talbot) para obtener la tensión a nivel de la capa de subbalasto; aportando un valor de la tensión medio de 1.10 kg/cm² frente a los 1.16 kg/cm² de la memoria para un espesor de balasto de 30 cm.

Para estos valores el espesor requerido de subbalasto o material tipo base sería, considerando nuevamente un factor de seguridad de 2 y una capacidad portante de 2 kg/cm²:

Memoria (cm)

Opinión Aecom (cm)

11.00	10.85
-------	-------

El espesor mínimo finalmente propuesto fue de 40 cm.

Antes de efectuar una segunda comprobación del espesor total de balasto y subbalasto con la AREMA, el diseño efectúa una estimación de la deflexión esperada empleando una formulación usual en mecánica de suelos para la estimación de asiento en medios elásticos. Este aspecto se coteja más adelante en este documento.

Seguidamente se efectúa, como hemos dicho, una segunda comprobación del espesor total de balasto y subbalasto mediante la AREMA.

Para la obtención de la tensión bajo el durmiente se emplea la siguiente expresión:

$$ABP = \frac{\left(2P * \left(1 + \frac{IF}{100}\right) * \left(\frac{DF}{100}\right)\right)}{A}$$

Donde,

P carga por eje en libras

IF es el factor de impacto por track

DF es el factor de distribución.

A área de la superficie del durmiente (20 cm x 240 cm = 7.87" x 94.48" = 743 sq in)

Por su parte, el factor de impacto es igual a

$$IF=33V/100D$$

Donde

V es la velocidad en millas por hora (según especificaciones 85 km/hr es la velocidad de operación, igual a 56.7 millas/hr)

D es Diámetro de la rueda,

Se ha consultado documentación adicional para este material móvil y el diámetro de la rueda estaría comprendido entre 770 y 860 mm, lo que resultarían en un valor medio de 32" aprox en lugar de 36" como se considera en la memoria sin una justificación clara. En estas condiciones el factor de impacto resultaría:

Memoria (IF)	Opinión Aecom (IF)
0.52	0.58

Como antes hemos comentado, no resulta del todo clara la obtención que se hace en la memoria del factor de distribución del 41% que se aporta. Se ha consultado la propuesta de la AREMA. El manual de AREMA recoge según la parte 4 apartado 4.1.2.5.1 Presión de Balasto y Sub-balasto, una propuesta para estimación del DF de acuerdo con una tabla (Fig. 30-41-1) donde se puede encontrar este porcentaje de carga.

El espaciamiento entre los durmientes para el caso que nos ocupa es de 53 cm aproximadamente (si se acepta la Figura 3, pues no se han identificado planos con esta información) y eso representa 20.86"; si este valor lo llevamos a la citada tabla de estimación de las cargas distribuidas nos resulta un porcentaje de 45%; próximo al 41% propuesto por el diseño.

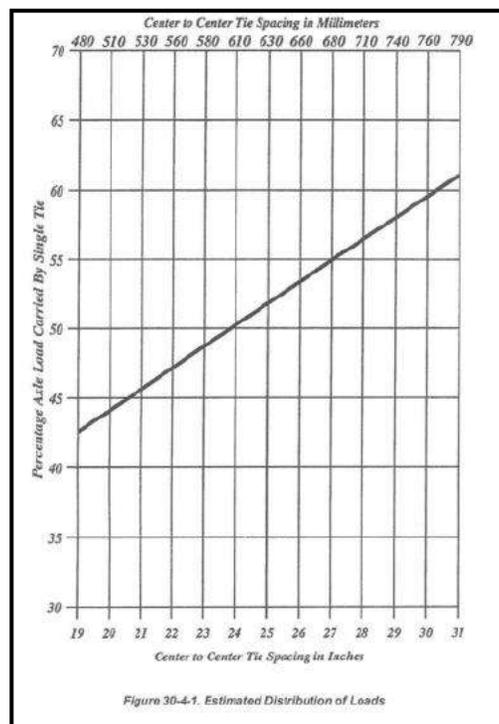


Figure 8 Factor de Distribución de acuerdo con el manual de la AREMA.

De acuerdo con estos resultados, es posible obtener la presión bajo el durmiente, resultando

Memoria ABP (psi)	Opinión Aecom ABP (psi)
54.74	63.47

La diferencia en la estimación de la tensión transmitida bajo el durmiente se traduce en los siguientes valores de balasto y subbalasto empleando la expresión del AREMA, donde Pa es la tensión bajo el durmiente y Pc es la capacidad portante de la subrasante con un factor de seguridad de 2 (en este proyecto se han considerado 2 kg/cm², valor que se estima correcto):

$$h = \left(16.8 \frac{Pa}{Pc}\right)^{4/5}$$

Memoria h (inc / cm)	Opinión Aecom h (inc/ cm)
26.91/68.36	31.66/80.41

Teniendo en cuenta que 2 kg/cm² se corresponden con 28,44 psi en lugar de 30 psi como se emplea en el diseño. Nótese que empleando el mismo input del diseño se obtiene una leve diferencia en el espesor total; resultando en un total de 10 cm en el caso de adoptar, como en esta supervisión, un factor de distribución conforme a AREMA y unas dimensiones de rueda de 32".

Resumiendo los resultados del diseño y de esta memoria, a continuación se muestra los resultados de estimación y propuesta de construcción del diseño:

Tabla 3

Capa	Espesor mínimo calculado (cm)	Espesor mínimo práctico (cm)	Espesor mínimo construido (cm)
Balasto	33.5	30	30
Sub balasto	11.0	15	40
Suma	44.5	45	70

El diseño, coherentemente con los resultados que presenta, propone 40 cm de subbalasto y 30 cm de balasto conforme al mínimo de AREMA y Libros Naranja.

Esta supervisión puede avalar los resultados aportados en la primera estimación según la AREMA, pero ha de recordarse que a la fecha de redacción del proyecto, el manual de AREMA vigente era el de 2008 y, conforme al mismo, el espesor total demandado para las capas de balasto y subbalasto sería 10 cm superior al diseño. Hay que tener en cuenta que este resultado es dependiente del diámetro de las ruedas del convoy y espaciados de durmientes; datos que requieren de confirmación complementaria.

Estimación de posibles deflexiones

La memoria de diseño recogió una estimación de las posibles deflexiones al paso del convoy mediante una expresión básica como es la siguiente:

$$\delta = \frac{qb[1 - \mu]^2 lw}{E}$$

Este tipo de expresión es para capas de espesor indefinido, por lo que estaría del lado de la seguridad su empleo. Se consideró una tensión de 1.16 kg/cm² tal y como se presentó en el diseño previamente, a aplicar en una superficie de 33 cm x 240 cm.

No se aclaran, quizá, con suficiente detalle los criterios seguidos y podría resultar razonable considerar una superficie de distribución de la tensión mayor. Se vuelve a estar, por tanto, de nuevo del lado de la seguridad.

Finalmente, se obtienen deflexiones comprendidas entre los 0.035 y 0.07 cm para módulos de Young de 1900 a 960 kg/cm², que serían razonables para una capa de subbalasto correctamente ejecutada.

Esta estimación, básica y de tipo estático, permite comparar que la solución planteada asegura las condiciones de apoyo necesarias en términos de deformabilidad.

Características del material tipo sub-balasto

En el apartado IV de la memoria de diseño se recogen las especificaciones propuestas para el material tipo Base o, a efectos de una superestructura ferroviaria, subbalasto.

En primer lugar, se especifica un contenido en finos inferior al 5%, lo que está de acuerdo con la AREMA. Se propone la siguiente graduación, que cumpliría con lo reflejado en los Libros Naranja (granulometría entre el límite superior de la zona 3 y el inferior de la zona 1; preferentemente localizándose entre las zonas 1 y 2.

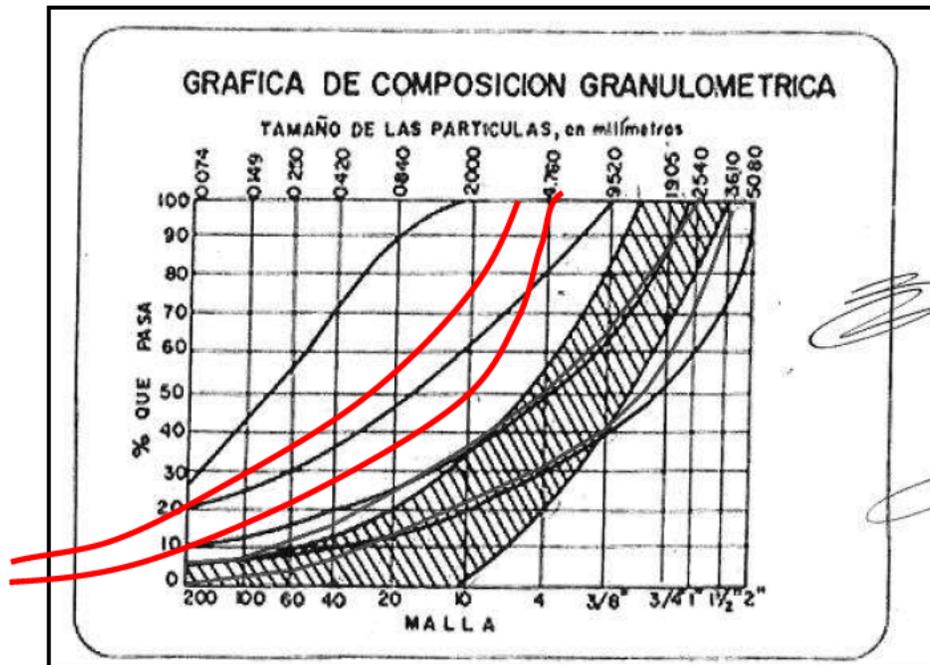


Figure 9 Granulometría propuesta para el material tipo Base.

Los Libros Naranja también imponen condiciones de tamaño máximo y relación entre los tamices 0.074 mm y 0.420 mm que parecen cumplirse con la propuesta.

Igualmente se propuso:

Tabla 4

Características	Valor (%)
Límite Líquido	25 máx
Índice plástico	6 max
Desgaste de los Angeles	30 max

Resultando el límite líquido inferior a lo admitido en los Libros Naranja para material de base.

La misma AREMA indica que para subbalasto puede emplearse material de base o subbase de vías y por ello se cree que pueden aceptarse las especificaciones de los Libros Naranjas.

Respecto al valor de Desgaste de los Ángeles, no especificado en los Libros Naranja o la AREMA, resulta coherente con otro tipo de especificaciones internacionales como la de ADIF en España, que fija un valor de 28. La propuesta de 30 podría ser, por tanto, razonable ante la ausencia de referencia en Libros Naranja y AREMA.

En cuanto al espesor de capa (tongada) (20 cm), no especificado en los Libros Naranja, está por encima de lo indicado en la AREMA (3 a 6 pulgadas), u otras especificaciones como las de ADIF,

que exigen 15 cm. Esto puede ser relevante cuando las condiciones de ejecución no son las idóneas en cuanto a la geometría y dimensiones del espacio de trabajo, sea por geometría de la cubeta o por la presencia de instalaciones.

3.2 Conclusiones.

Durante la comparación de la información referencial facilitada a AECOM por parte del cliente, se han podido extraer las siguientes conclusiones.

Tanto en las bases del concurso, especificaciones, y finalmente el diseño desarrollado y aprobado, indican que la L12 del Metro CDMX se trata de un sistema de vías conocido en el ámbito de la Ingeniería Ferroviaria como una vía sobre balasto.

En el caso de la subrasante para el sistema de vías, fue diseñada a partir de diferentes soluciones mostradas en los documentos del diseño aprobados, siguiendo la solución adoptada de vía sobre balasto y resolviendo la subrasante con diferentes soluciones particulares basadas en los criterios aceptados por AREMA 2008 y AREA..

El uso de un sistema de terracerías compuesto por capas de concreto ciclópeo, relleno de materiales de grava arena y balasto fue el seleccionado por el diseño ejecutivo., es decir se diseñaron vías “elásticas”, que permiten corregir desviaciones geométricas para mantener el buen comportamiento del sistema en las tareas propias del mantenimiento rutinario, tomando en cuenta la gran presencia de suelos blandos (altamente deformables) del Valle de México

Aunque las vías en placa también pueden constituir una buena solución, cuando se deforman la manera de arreglarlo implican intervenciones que pueden ser largas, costosas y afectar gravemente la operación del sistema. Por su parte las vías en balasto pueden hacerse las correcciones o adecuaciones como parte de su mantenimiento rutinario sin afectar la operación.

En este mismo sentido, el manual AREMA, en su apartado dedicado a la sección geométrica de los túneles deja claramente indicada la opción de túneles con sub balasto apoyando sobre una subrasante. Finalmente la estructura de vía en la parte subterránea en el sector circular está confinado por anillo de dovelas de concreto, en la documentación referencial existen los diseños aprobados del túnel de dovelas..

Como se ha mencionado, el diseñador optó en un sector de la L12 subterránea por el empleo de una capa de relleno grava arena como predecesor a la capa de balasto basado en los manuales AREA y AREMA de 2008. Se ha cotejado con las calas efectuadas por ICA y en líneas generales se presenta el espesor de diseño. Así mismo se observó que las estimaciones de las capas de la plataforma de vía son conservadoras, es decir, están dentro de los parámetros técnicamente aceptables, pues el apoyo final no se efectúa sobre una subrasante sino sobre una cubeta de concreto, y la influencia de una posible falta de espesor se podría considerar menor.

Respecto al material especificado para esta capa de base o sub balasto, . AECOM considera que el éxito de una solución de estas características, que resulta técnicamente válida, está muy condicionado por las condiciones de puesta en obra; lográndose la adecuada compactación, y también de manera relevante por las condiciones de mantenimiento, que permitan administrar posibles filtraciones de aguas que pudieran alterar estas capas de material de la plataforma de vía. Si esto se garantizara, las soluciones de este tipo resultan viables.

En las calas efectuadas por ICA en 2021 se ha observado que existen capas de materiales granulares acordes a las secciones críticas que ICA modeló para el análisis de esfuerzos y deformación en condiciones estática y dinámica, conforme a las secciones representativas de las existentes en el túnel, que están incluidas en la información proporcionada por ICA y que se detalla en el informe extenso.

El sistema utilizado sobre las capas de balasto + subbalasto (relleno grava – arena) permite, al igual que cualquier otro sistema, la correcta permeabilidad de filtraciones de agua externas para conducir las al sistema de drenaje.

Por último, de acuerdo con el análisis sísmico indicado contenido en la documentación proporcionada por ICA”, se observa que los efectos sísmicos sobre el túnel de los anillos de dovelas no es una condición crítica y las acciones sísmicas no rigen el diseño estructural.

aecom.com