

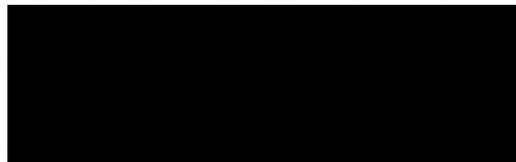
# **ESTUDIOS GEOTÉCNICOS ESPECÍFICOS PARA EL REFUERZO Y REHABILITACIÓN DEL TRAMO SUBTERRÁNEO DE LA LÍNEA 12 DEL STC**

**Comité Técnico Asesor de Refuerzo y Rehabilitación de la  
Línea 12, CTA**

**Elaborado Para:**

**Gobierno de la Ciudad de México, CDMX**

Agosto 27, 2021



### RESUMEN

Este informe presenta los resultados obtenidos de simulaciones numéricas llevadas a cabo con modelos tridimensionales de diferencias finitas, desarrollados para evaluar el comportamiento del material que constituye el soporte del sistema vía-durmiente del tramo subterráneo de la Línea 12 del metro. Así mismo, se estudia la sustitución del balasto y del material tipo base, como una opción para mejorar el comportamiento de la estructura de soporte del sistema vía-durmiente a mediano y largo plazos.

Con base en los resultados descritos en este informe se recomienda:

- Obtener muestras de basalto para efectuar los ensayos de laboratorio correspondientes y verificar su estado. Dependiendo de los resultados de los ensayos se determinará la necesidad de cambiar dicho balasto.
- Revisar el material granular base durante la ejecución de las calas del balasto para verificar su grado de compactación, su resistencia e integridad. Se recomienda verificar también que se cumplan las especificaciones de diseño para la compactación y una resistencia mínima de proyecto de  $2 \text{ kg/cm}^2$  determinada de pruebas de placa. De no cumplir lo anterior, se recomienda la sustitución por un material menos susceptible al agua y a las acumulaciones de deformaciones plásticas ante cargas cíclicas, tal como un concreto fluido o ciclópeo de resistencia especificada a la compresión de  $20 \text{ kg/cm}^2$ .
- Para fines de prevenir futuras contingencias, se recomienda considerar la sustitución del material base por un material menos susceptible al agua como un concreto ciclópeo o fluido de resistencia especificada a la compresión de  $20 \text{ kg/cm}^2$ , en aquellas zonas donde se requiera.
- Construir una losa de sustentación (cubeta) y construir el drenaje y cárcamo en el vado en el subtramo Parque de los Venados – Eje Central.
- Sustituir la vía en 7 curvas con radios menores que 550 m de riel 115E por riel UIC60 con sus respectivos durmientes y fijaciones, de acuerdo con las recomendaciones de Systra.
- Para la reapertura de la línea, se recomienda la renivelación y realineación de la vía.

## Comité Técnico Asesor de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12, CTA

---

Desde el punto de vista de operación del sistema, se recomienda revisar por corrosión y en su caso, reemplazar las instalaciones y sus sujeciones.

El CTA recomienda cumplir con los procedimientos de mantenimiento para garantizar un comportamiento adecuado a corto, mediano y largo plazos.



# Comité Técnico Asesor de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12, CTA

---

## ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN .....	1
2	OBJETIVOS .....	1
3	ANTECEDENTES .....	1
4	SIMULACIONES NUMÉRICAS .....	3
4.1	Estimación de parámetros .....	3
4.2	Configuración del modelo .....	6
4.3	Resultados .....	9
4.3.1	Resultados Caso I (Tramo recto) .....	9
4.3.2	Resultados Caso II (Curva a baja velocidad) .....	11
4.3.3	Resultados Caso III (Curva a 85Km/h) .....	13
4.4	Resumen de resultados .....	14
5	PROPUESTA DE MEJORAMIENTO .....	16
5.1	Sustitución del material tipo base.....	16
5.2	Sustitución del balasto .....	20
6	RECOMENDACIONES .....	24
7	REFERENCIAS .....	25

### 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 solicitado al 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 son:

- Evaluar el comportamiento del material que constituye el soporte del sistema vía-durmiente mediante modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas.
- Evaluar la mejora en el desempeño de la estructura de soporte por medio de la sustitución del balasto y del material tipo base.

### 3 ANTECEDENTES

Con base en la memoria PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00 proporcionada por el Gobierno de la Ciudad de México, se idealizó la configuración del perfil de los materiales que integran la estructura de soporte. En la Figura 3.1 y 3.2 se muestra la secuencia y espesores de los materiales determinados en la etapa de diseño para el sistema de vías. Asimismo, con base en la información recabada en visitas técnicas realizadas al tramo subterráneo, y tomando en consideración la serie de 16 calas realizadas por la Dirección General de Obras para el Transporte, DGOT, de la Ciudad de México sobre la estructura de la vía, fue posible constatar la presencia de material tipo

## Comité Técnico Asesor de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12, CTA

base (i.e. arenas y gravas compactadas) ubicado entre el balasto y la cubeta del túnel, de un espesor promedio de 40 cm. Asimismo se identificó en diversos lugares la presencia de agua producto de filtraciones de distintas intensidades, así como, las deficiencias en el sistema de drenaje. Lo anterior ha producido un deterioro en el balasto que se presenta en forma de material triturado, degradado y con finos.

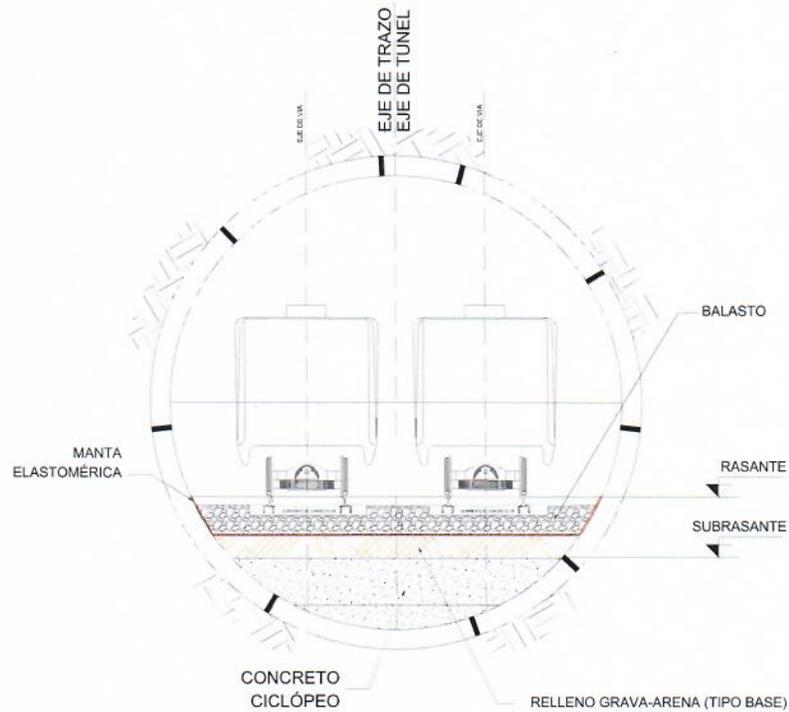


Figura 3.1. Configuración de diseño de los materiales subyacentes en el sistema de vías (Corte transversal)

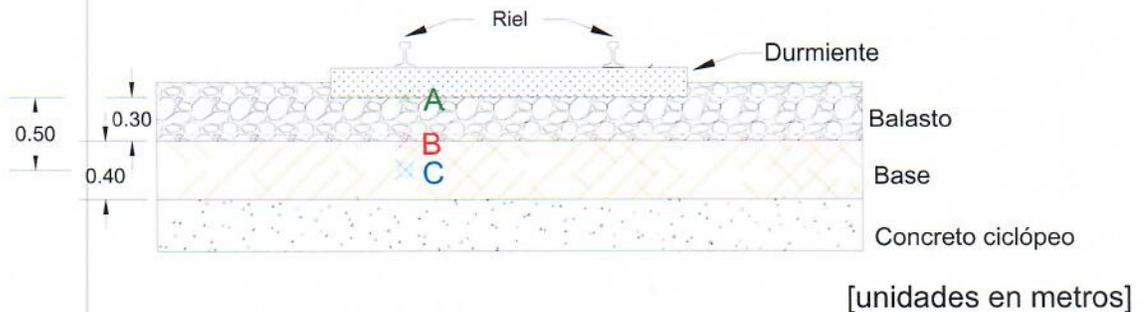


Figura 3.2. Configuración de diseño de los materiales subyacentes en el sistema de vías (Corte longitudinal)

#### 4 SIMULACIONES NUMÉRICAS

Se desarrollaron modelos numéricos tridimensionales de diferencias finitas, con el programa FLAC<sup>3D</sup> (Itasca, 2009). Los resultados obtenidos se compararon con las presiones y distribuciones de esfuerzos bajo el durmiente obtenidos a través de expresiones semi-empíricas (i.e. Talbot, 1929; AREMA, 2010; y Hay, 1982).

##### 4.1 Estimación de parámetros

Para caracterizar los materiales presentes en la vía se consideró la información contenida en la memoria de cálculo PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00, así como los planos *as built* de los tramos analizados, y la información recopilada en campo a partir de las 16 calas llevadas a cabo por la DGOT. Los elementos que se incluyeron en el modelo numérico corresponden a los rieles de la vía, los durmientes, las capas de balasto y sub-balasto (base granular), así como la cubeta de concreto ciclópeo. De acuerdo con la información proporcionada, la sección estructural del riel corresponde con un perfil 115 RE (American Standard). En la Figura 4.1 se muestra la sección del riel, de acuerdo con la normativa AREMA (2010). La Tabla 4.1 incluye los parámetros estructurales correspondientes al perfil, el cual se modeló considerando un comportamiento lineal.

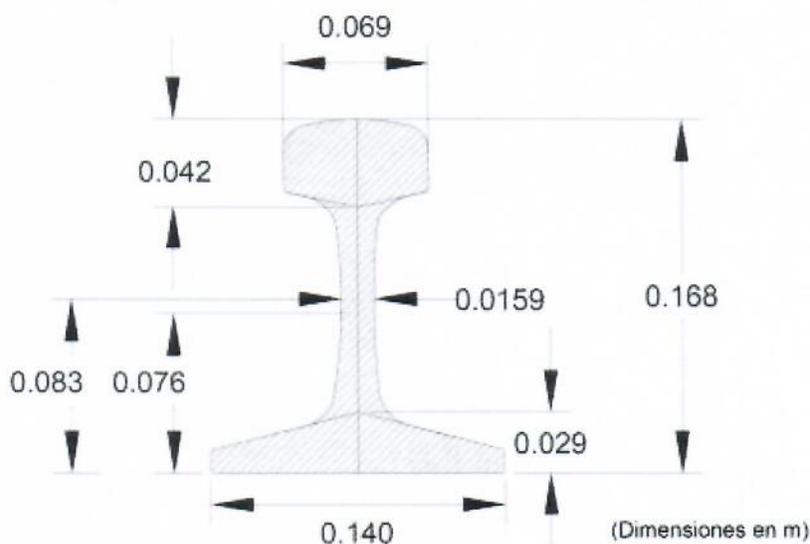


Figura 4.1. Dimensiones del riel 115 RE (American Standard AREMA)

## Comité Técnico Asesor de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12, CTA

Tabla 4.1. Propiedades del perfil 115 RE

Perfil	$A [m^2]$	$E [MPa]$	$\nu$	$\gamma [kN/m^3]$
115 RE	0.00725	210,000	0.3	76.0

Los durmientes de concreto tipo monoblock se modelaron considerando una ley constitutiva elástica lineal, las características de estos elementos se presentan en la Tabla 4.2 las cuales fueron tomadas a partir de la literatura técnica (Montiel-Varela et al., 2017).

Tabla 4.2. Propiedades de los durmientes

$E [MPa]$	$\nu$	$\gamma [kN/m^3]$
47,500	0.18	24

Con respecto a la simulación del concreto ciclópeo, se utilizaron elementos sólidos gobernados por una ley constitutiva elástica lineal. Para definir el módulo de Young de dicho material, se tomó en cuenta la resistencia a la compresión simple de  $f'c = 150 \text{ kg/cm}^2$ , especificada en los planos *as built* de los tramos analizados, y la expresión proporcionada por las NTC de estructuras de concreto (RCDF, 2017), aplicable para concretos clase 2, con resistencias a la compresión simple  $f'c < 250 \text{ kg/cm}^2$ :

$$2500\sqrt{f'c} \text{ (MPa)} ; 8000\sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)} \quad (4.1)$$

Las capas de balasto y sub-balasto (base granular) se simularon mediante elementos sólidos gobernados por una ley constitutiva Mohr-Coulomb; por lo que, los parámetros necesarios para caracterizar dichos materiales son: el ángulo de fricción interna,  $\phi$ ; módulo de Young,  $E$ ; relación de Poisson,  $\nu$ ; y la cohesión,  $c$ , que, para este caso, se consideró igual a cero para ambos materiales, lo cual es concordante con los valores presentados en la literatura técnica. Con respecto al balasto, se utilizaron los valores reportados por Sayeed y Shahin (2016), para caracterizar al balasto (Tabla 4.3).

**Comité Técnico Asesor de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12, CTA**

Tabla 4.3. Propiedades del balasto (Sayeed y Shahin, 2016)

$E$ [MPa]	$\nu$	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c$ [kPa]	$\varphi$ [°]
200	0.30	18.6	0	50

Para el caso del material de base (sub-balasto), que consiste en una mezcla compactada de grava con arena, se tomaron en cuenta los valores de pruebas de laboratorio realizadas a muestras obtenidas en el material presente en la vía. En la Tabla 4.4 se muestran los valores representativos de cada uno de los parámetros medidos en pruebas de laboratorio.

Tabla 4.4 Valores representativos de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio de las muestras del material de sub-balasto

CBR (%)	$\rho_{d\ max}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{d\ nat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación (%)
95	1746	1722	98.6

Para la obtención del ángulo de fricción interna,  $\varphi$ , se utilizó el valor del grado de compactación medido, así como los valores de densidad seca máxima  $\rho_{d\ máx}$  y densidad seca natural  $\rho_{d\ nat}$ , que corresponde con la densidad obtenida del punto de inflexión de la curva de compactación y la densidad medida en la muestra obtenida, respectivamente. Con dichos valores se estimó la densidad relativa  $D_r$  (%), mediante la siguiente expresión (Bowles, 1996):

$$D_r(\%) = \frac{\rho_{d,max}}{\rho_d} * \frac{\rho_d - \rho_{d,min}}{\rho_{d,max} - \rho_{d,min}} * 100 \quad (4.2)$$

Como se puede observar, para llevar a cabo el cálculo se requiere del valor de la densidad seca mínima  $\rho_{d\ mín}$ , en este caso se realizó un análisis paramétrico con el objetivo de identificar el valor mínimo posible de  $D_r$  (%), para el nivel de compactación reportado, el cual resultó del 85%. Una vez establecido el valor de la densidad relativa, se estimó el ángulo de fricción interna mediante la gráfica proporcionada por Schmertmann (1978) como se muestra en la Figura 4.2.

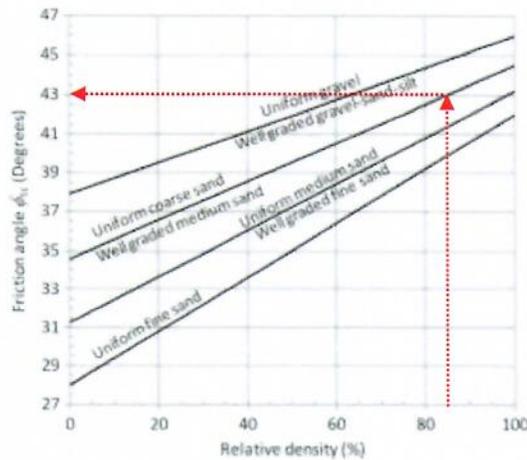


Figura 4.2. Correlación de la densidad relativa  $D_r$  (%), con el ángulo de fricción interna  $\varphi$  (Schmertmann, 1978)

Posteriormente, para estimar el módulo de Young del material tipo base, se tomó en cuenta el valor de CBR reportado, y se utilizó la expresión proporcionada en AASHTO (1993):

$$E = 36 \text{ CBR}^{0.3} \text{ (MPa)} \quad (4.3)$$

La Tabla 4.5 presenta los parámetros de todos los materiales empleados en el modelo numérico, según los criterios y las referencias expuestas anteriormente.

Tabla 4.5. Parámetros de los materiales empleados en el modelo numérico

Unidad	Modelo constitutivo	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c$ [MPa]	$\varphi$ [°]	$E$ [MPa]	$\nu$
(I) Balasto	Mohr-Coulomb	18.6	0	50	200	0.30
(II) Base	Mohr-Coulomb	17.0	0	43	143	0.35
(III) Concreto ciclópeo	Elástico lineal	22.0	-	-	9,590	0.30
(IV) Durmiente	Elástico lineal	24.0	-	-	47,500	0.18
(V) Riel	Elástico lineal	76	-	-	210,000	0.3

#### 4.2 Configuración del modelo

Se desarrolló un modelo tridimensional de diferencias finitas, con base en el esquema presentado en la Figura 3.2 con el programa FLAC<sup>3D</sup>. Con respecto a la dimensión de los durmientes, se consideró un ancho de durmiente de 0.20 m y una altura de 0.20 m, con

## Comité Técnico Asesor de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12, CTA

una separación de 0.60 m entre ejes de durmientes (centro a centro). La Figura 4.3 se muestra el modelo tridimensional de diferencias finitas.

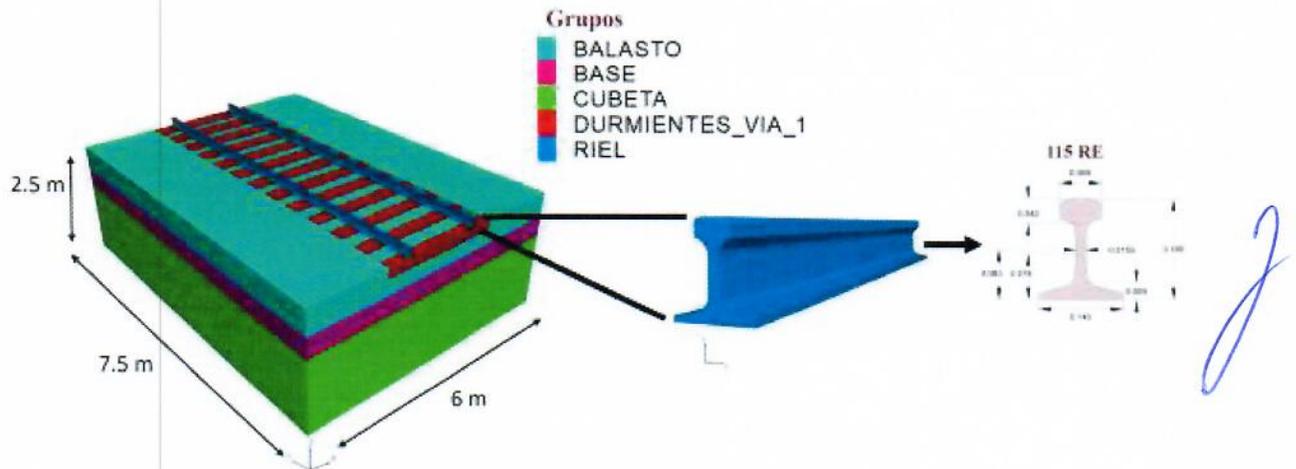


Figura 4.3. Modelo tridimensional de diferencias finitas

Para simular las cargas transmitidas por el boogie, se consideró la máxima magnitud reportada de 15 ton por eje (7.5 ton por rueda). Así mismo, se tomó en cuenta un factor de impacto,  $FI$ , mediante la Ecuación 4.4 (AREMA, 2010), el cual es un aumento porcentual sobre las cargas verticales para estimar el efecto dinámico de las irregularidades de las ruedas y los rieles.

$$FI = 33V/100D \quad (4.4)$$

donde

$V$  es la velocidad en  $mph$

$D$  es el diámetro de la rueda en  $in$

Considerando una velocidad de diseño de  $85 \text{ km/h}$  ( $52.8 \text{ mph}$ ) y un diámetro de rueda de  $0.914 \text{ m}$  ( $36 \text{ in}$ ), se obtuvo un factor de impacto de 0.48. Por otra parte, se ha documentado que en las zonas de curvas el boogie tiende a apoyarse en un solo lado del eje, lo cual representa un caso extremo que debe ser analizado. La Tabla 4.6 presenta los casos de análisis, así como la descarga por rueda considerada en cada uno, la Figura 4.4 presenta un esquema de estos casos.

Tabla 4.6. Casos analizados

Caso	Descarga por rueda (ton)	Factor de impacto, FI	Descarga por rueda considerando el FI (ton)
I: Tramo recto	7.5 ton	0.48	11.1
II (Extremo I): Curva a baja velocidad.	15 ton	-	15.0
III (Extremo I): Curva a 85 km/h	15 ton	0.48	22.2

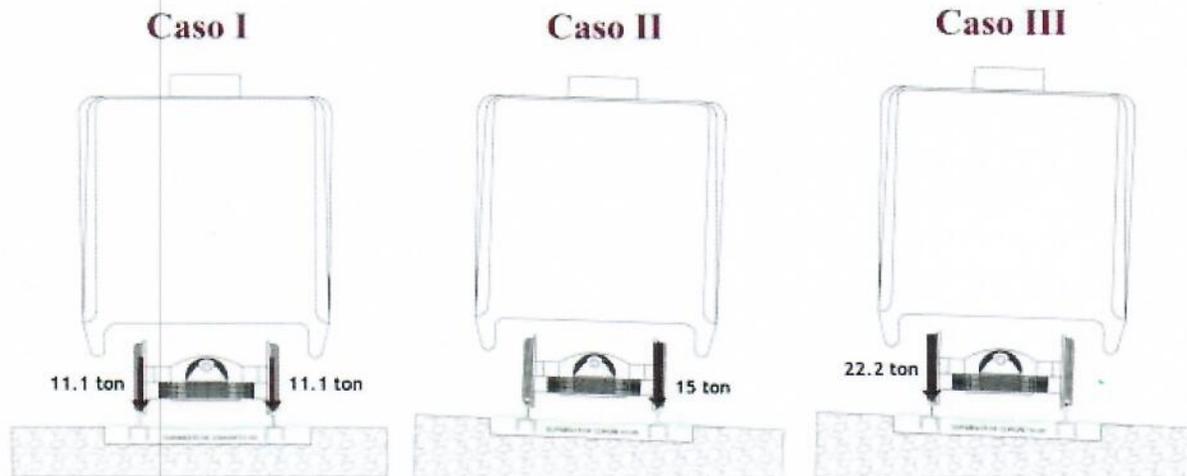


Figura 4.4. Casos analizados

Para cada caso de análisis se obtuvieron los esfuerzos verticales, y el factor de seguridad tomando en cuenta los esfuerzos desviadores en los geomateriales y la resistencia al esfuerzo cortante mediante la Ecuación 4.5, para el balasto y para el material tipo base.

$$FS = \frac{\tau_{res}}{\tau_{oct}} \quad (4.5)$$

donde:

$$\tau_{res} = c + p' \tan \varphi$$

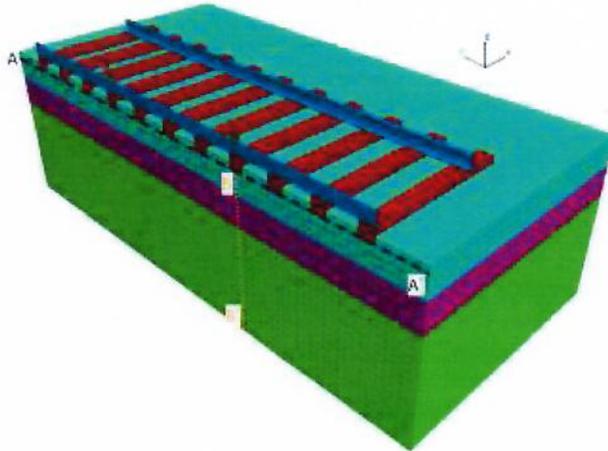
$$\tau_{oct} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{3}$$

$$p' = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  son los esfuerzos principales

### 4.3 Resultados

Los resultados de cada caso se presentan a continuación. Los cuales incluyen los esfuerzos verticales en las secciones de control A-A' y B-B' presentadas en la Figura 4.5.



*J*

Figura 4.5. Secciones de control A-A' y B-B'

#### 4.3.1 Resultados Caso I (Tramo recto)

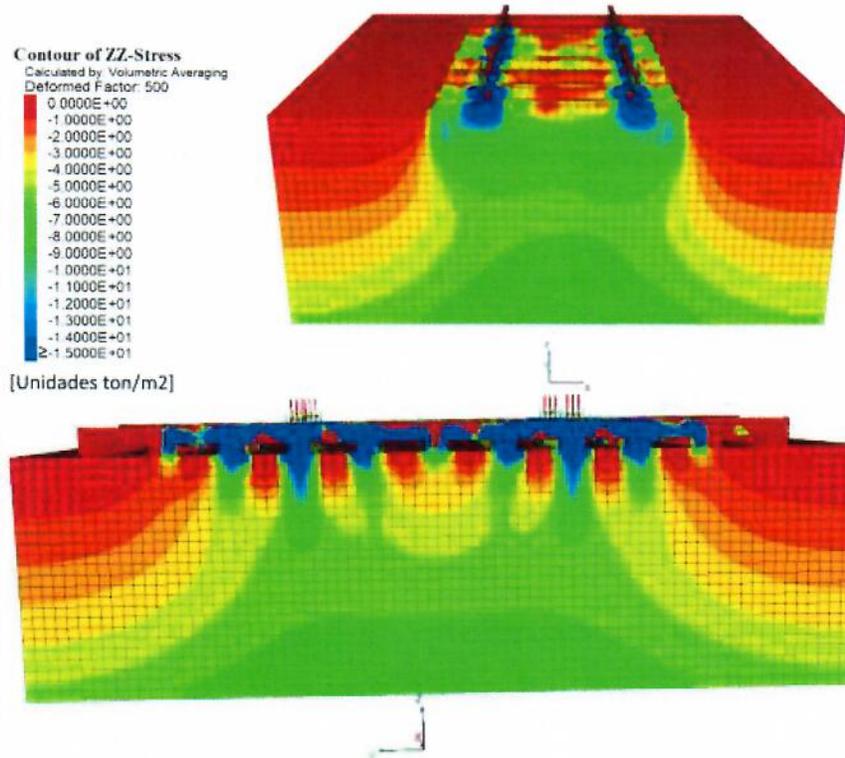


Figura 4.6. Contorno de esfuerzos verticales (Caso I)

Comité Técnico Asesor de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12, CTA

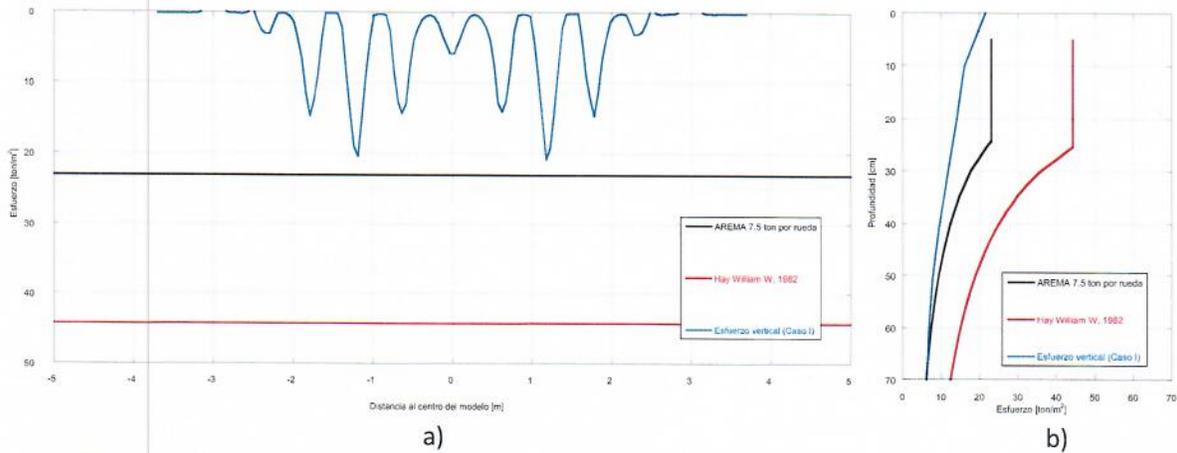


Figura 4.7. Esfuerzos verticales en las secciones a) A-A' y b) B-B' (Caso I).

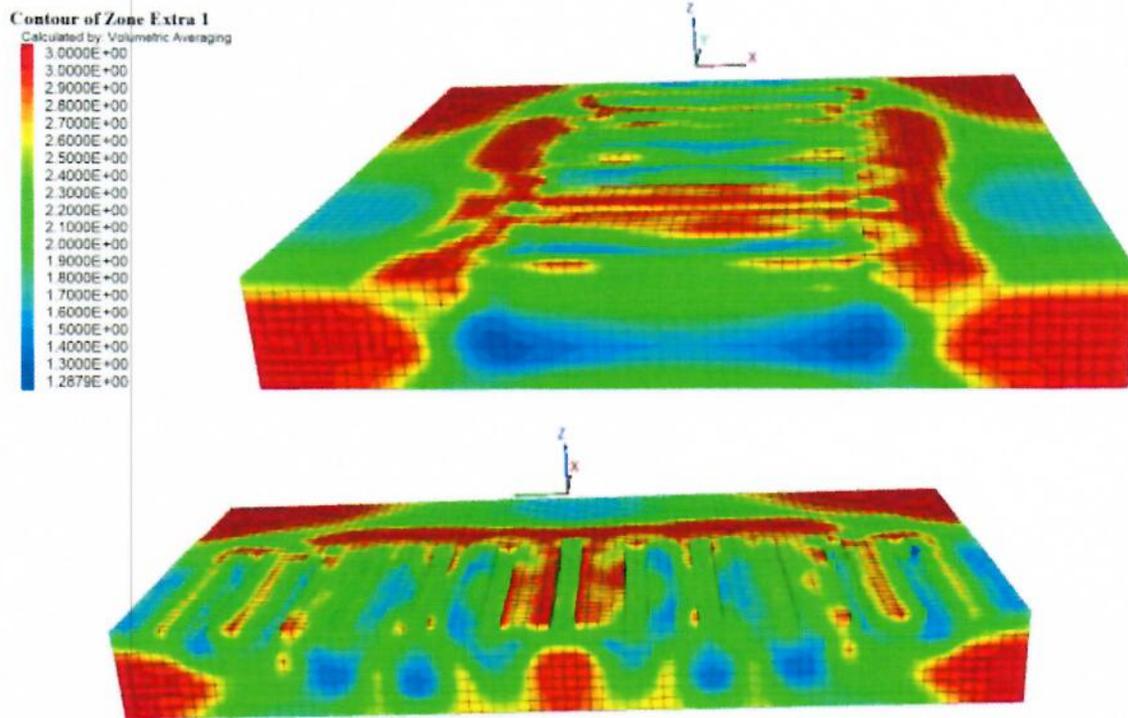


Figura 4.8. Factores de seguridad en el balasto y en la base (Caso I)

Como se puede observar en la Figura 4.7 la distribución de esfuerzos verticales es menor a la distribución calculada con AREMA (2010). Sin embargo, como se presenta en la Figura 4.8, los factores de seguridad mínimos para el balasto y la base son de 1.33 y 1.28 respectivamente. Considerando que este caso no contempla algunos de los casos

extremos, estos valores de factores de seguridad no son admisibles, ya que conlleva a deformaciones plásticas acumuladas excesivas asociadas con la carga repetida generada por el continuo paso del tren.

### 4.3.2 Resultados Caso II (Curva a baja velocidad)

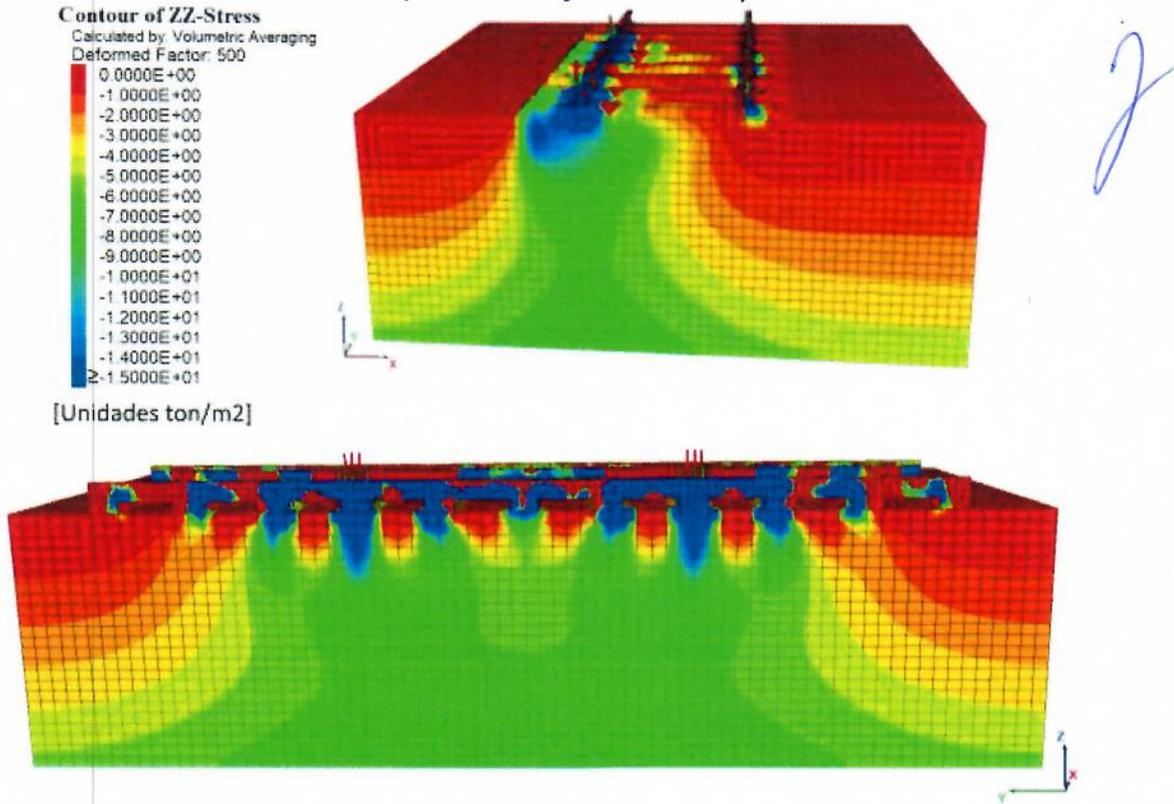


Figura 4.9. Contorno de esfuerzos verticales (Caso II)

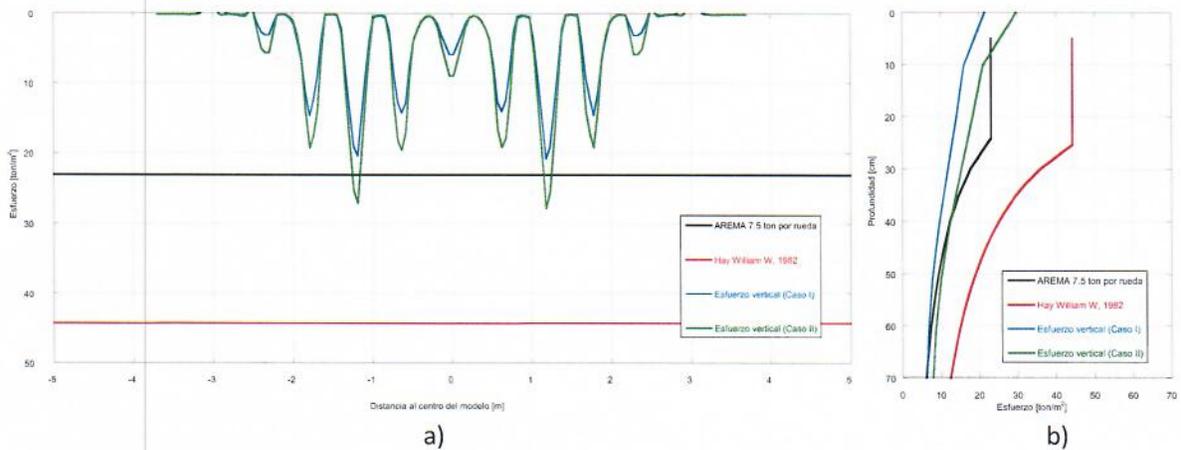


Figura 4.10. Esfuerzos verticales en las secciones a) A-A' y b) B-B' (Caso II)

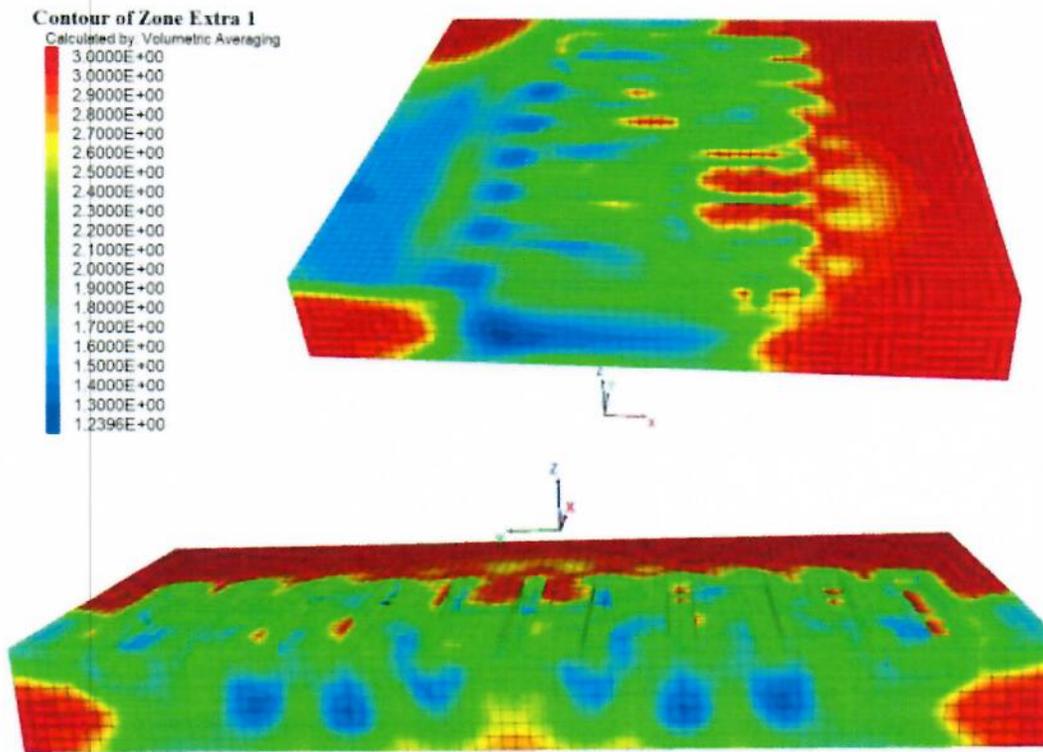


Figura 4.11. Factores de seguridad en el balasto y en la base (Caso II)

Como se puede observar en las Figuras 4.9, y 4.11 los esfuerzos verticales y los factores de seguridad mínimos claramente se concentran en el lado del riel en donde se simula que la carga del tren se apoya. Es importante destacar que las distribuciones presentadas en la Figura 4.10 corresponden a las secciones correspondientes al riel cargado, estas distribuciones son muy parecidas a la distribución calculada con la metodología de AREMA (2010). Los factores de seguridad mínimos para el balasto y la base, son de 1.29 y 1.23 respectivamente (Figura 4.11), los cuales son menores a los presentados para el Caso I.

### 4.3.3 Resultados Caso III (Curva a 85Km/h)

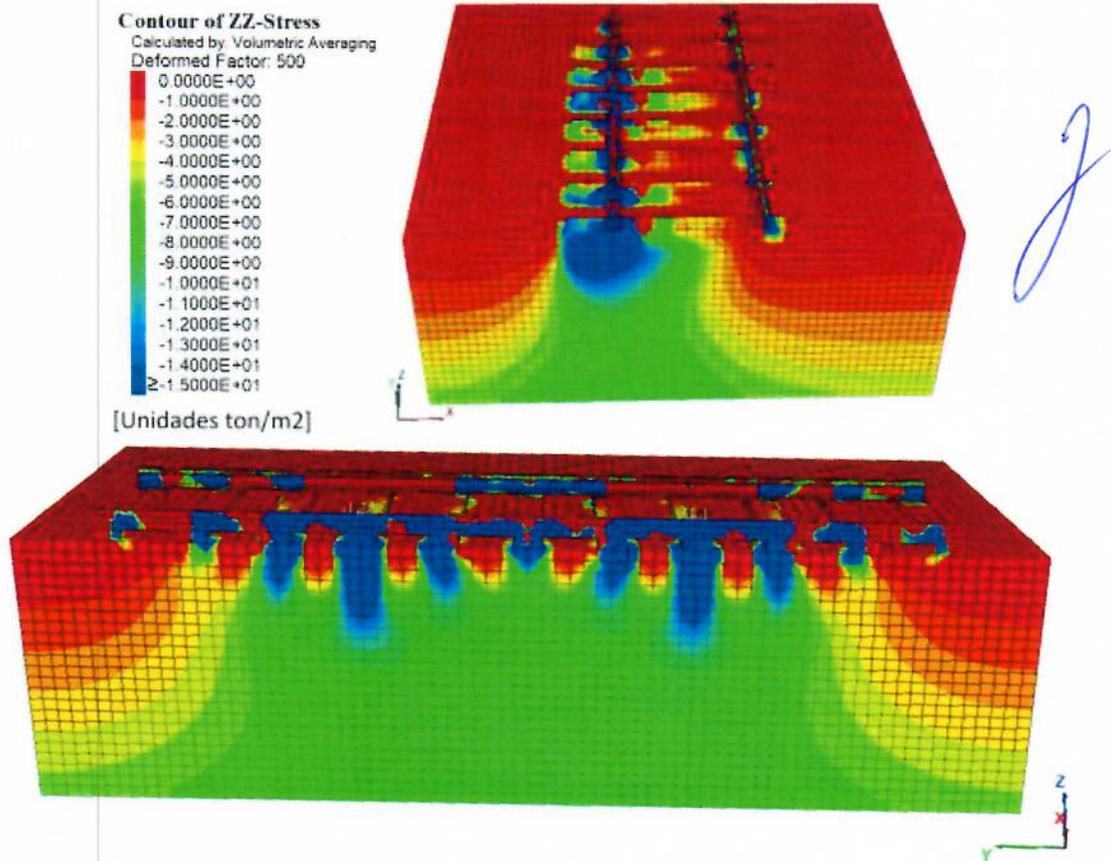


Figura 4.12. Contorno de esfuerzos verticales (Caso III)

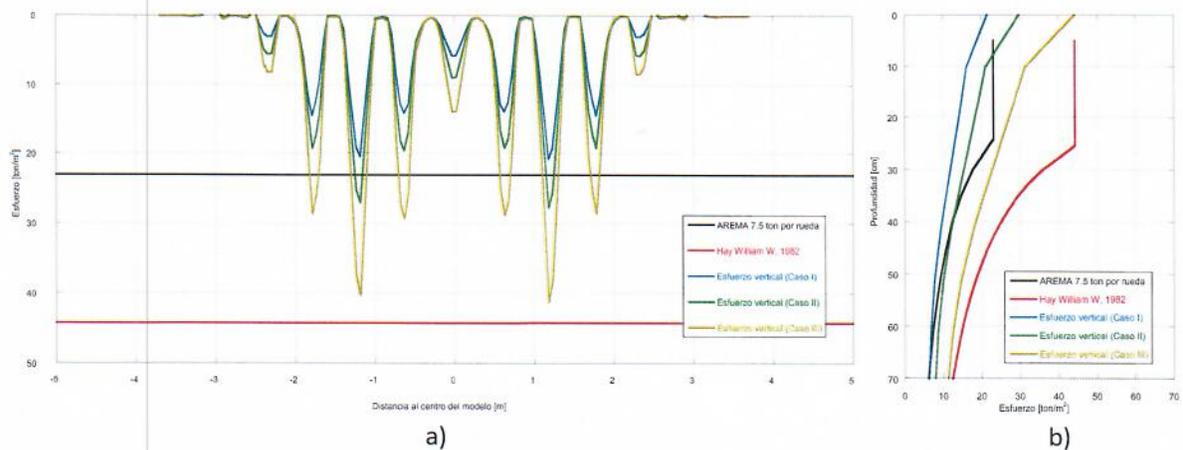


Figura 4.13. Esfuerzos verticales en las secciones a) A-A' y b) B-B' (Caso III)

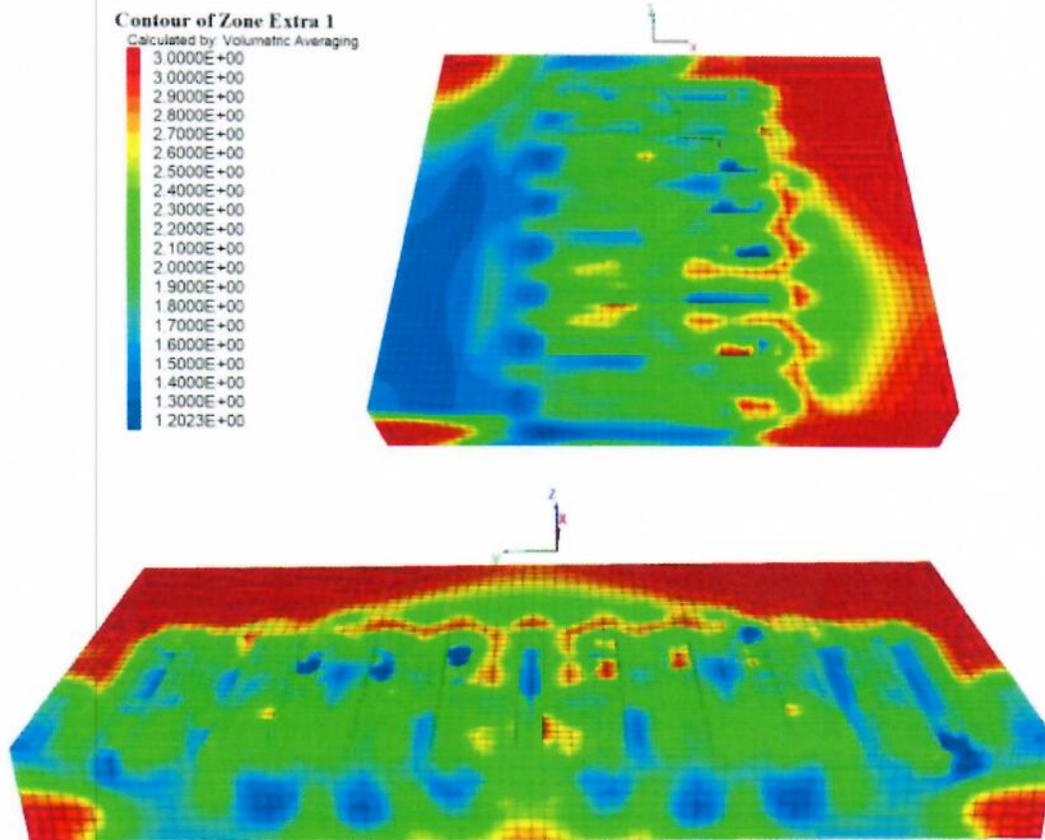


Figura 4.14. Factores de seguridad en el balasto y en la base (Caso III)

Como se puede observar en la Figura 4.13 las distribuciones de esfuerzos verticales son mayores a la distribución calculada con la metodología de AREMA (2010). Los factores de seguridad mínimos para el balasto y la base son de 1.24 y 1.20 respectivamente (Figura 4.14)

#### 4.4 Resumen de resultados

La Tabla 4.7 presenta la comparación de los esfuerzos verticales obtenidos en los diferentes casos analizados, con los determinados mediante las metodologías semi-empíricas de AREMA (2010) y Hay William W (1982) para los puntos de control presentados en la Figura 3.2. La Tabla 4.8 presenta un resumen de los factores de seguridad mínimos para el balasto y la base.

## Comité Técnico Asesor de Refuerzo y Rehabilitación de la Línea 12, CTA

Tabla 4.7. Esfuerzos verticales de los casos analizados

Punto	AREMA (2010) ton/m <sup>2</sup>	Hay William W (1982) ton/m <sup>2</sup>	Caso I ton/m <sup>2</sup>	Caso II ton/m <sup>2</sup>	Caso III ton/m <sup>2</sup>
A	23.1	44.28	21.6	29.7	44.2
B	17.7	35.9	11.7	15.2	22.4
C	9.3	18.5	7.8	10.0	14.6

Tabla 4.8. Factores de Seguridad de los casos analizados

Caso	Factor de Seguridad mínimo Balasto	Factor de Seguridad mínimo Base
I	1.33	1.28
II	1.29	1.23
III	1.24	1.20

Debido a la naturaleza cíclica de la carga durante la operación del metro a lo largo de su vida útil, factores de seguridad cercanos a 1 (i.e. 1.2), conllevan a la potencialización de deformaciones plásticas cuando los esfuerzos superan el rango lineal del comportamiento del suelo del material de soporte, por lo que es recomendable que el esfuerzo actuante tenga un Factor de Seguridad de 2 para minimizar costos de mantenimiento. La Figura 4.15, presenta un esquema del nivel de esfuerzos promedio, a los que está sometido el balasto y la base (Material Granular compactado), como se puede observar, es necesario aumentar el Factor de Seguridad para disminuir las deformaciones plásticas.

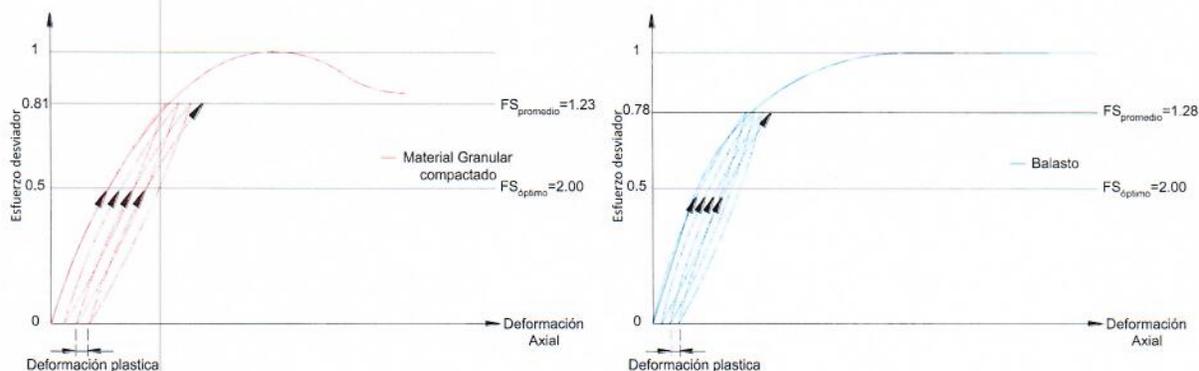


Figura 4.15. Efecto de la carga cíclica en la deformación

## 5 PROPUESTA DE MEJORAMIENTO

### 5.1 Sustitución del material tipo base

Con el fin de aumentar el factor de seguridad del material tipo base, se evaluó su sustitución por un concreto fluido de calidad base ( $f'c = 20 \text{ kg/cm}^2$ ). La Figura 5.1, presenta la ficha técnica a partir de la cual se consideraron las propiedades consideradas en el modelo numérico. La Tabla 5.1 presenta las propiedades consideradas en este análisis, denominado Caso VI, el cual considera las mismas cargas que en el Caso III.

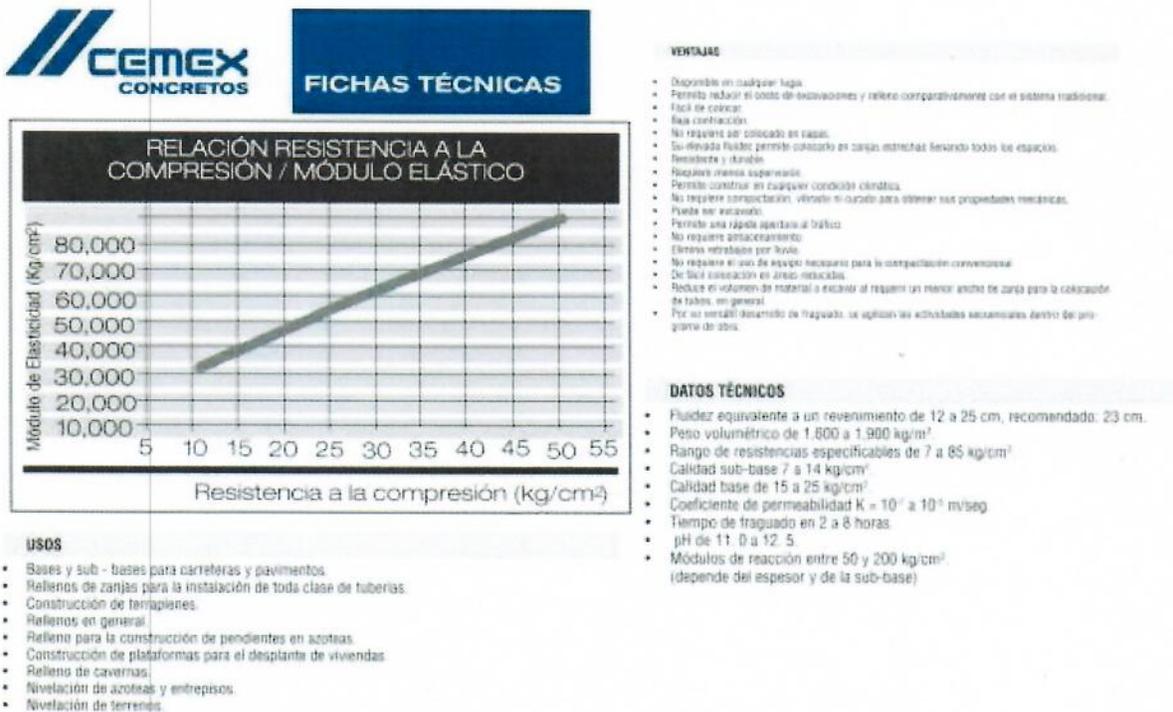


Figura 5.1. Ficha técnica de concreto fluido (CEMEX 2020)

Tabla 5.1. Parámetros de los materiales empleados en el modelo numérico

Unidad	Modelo constitutivo	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c$ [MPa]	$\phi$ [°]	$E$ [MPa]	$\nu$
(I) Balasto	Mohr-Coulomb	18.6	0	50	200	0.30
(II) Concreto Fluido	Mohr-Coulomb	17.1	0.981	0	4561	0.30
(III) Concreto ciclópeo	Elástico lineal	22.0	-	-	9,590	0.30
(IV) Durmiente	Elástico lineal	24.0	-	-	47,500	0.18
(V) Riel	Elástico lineal	76	-	-	210,000	0.3

Las Figuras 5.2 a 5.6 presentan los resultados de Caso IV.

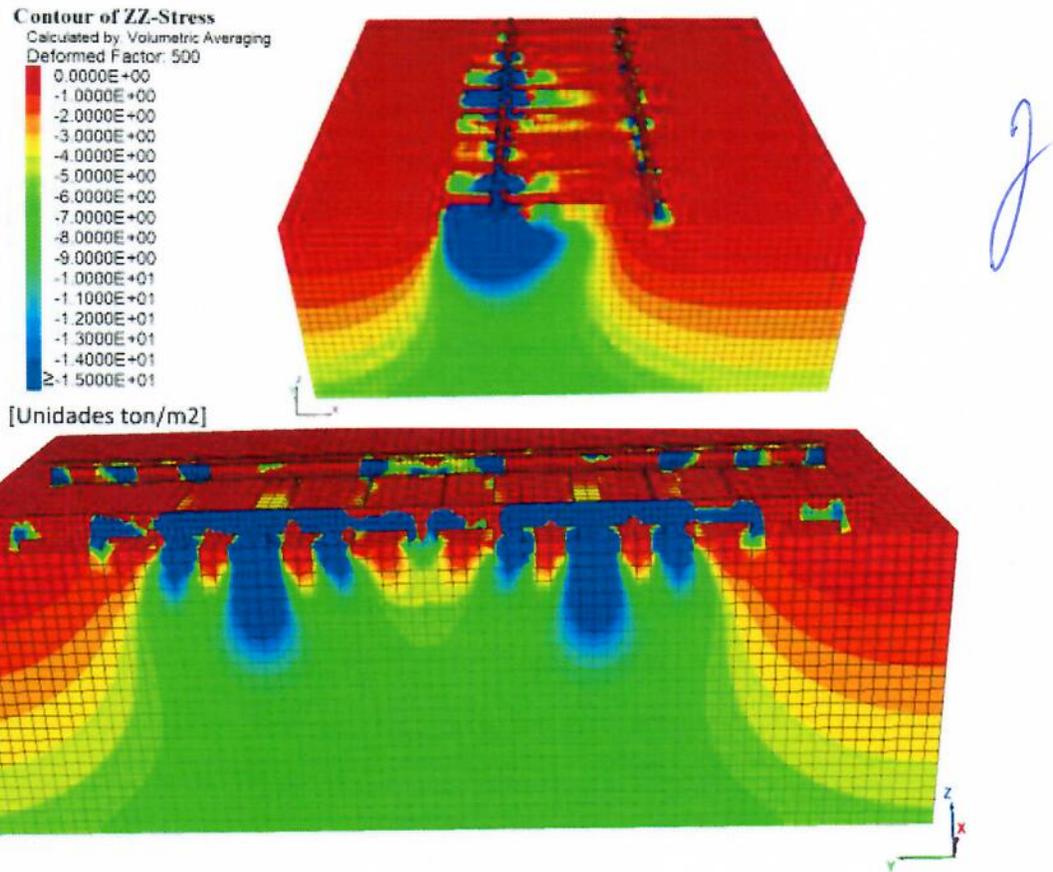


Figura 5.2. Contorno de esfuerzos verticales (Caso IV)

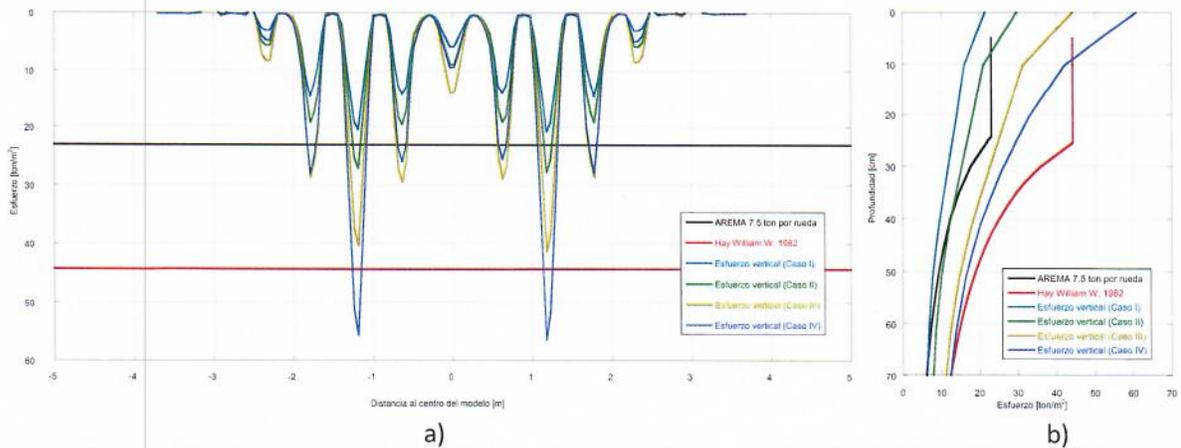


Figura 5.3. Esfuerzos verticales en las secciones a) A-A' y b) B-B' (Caso IV)

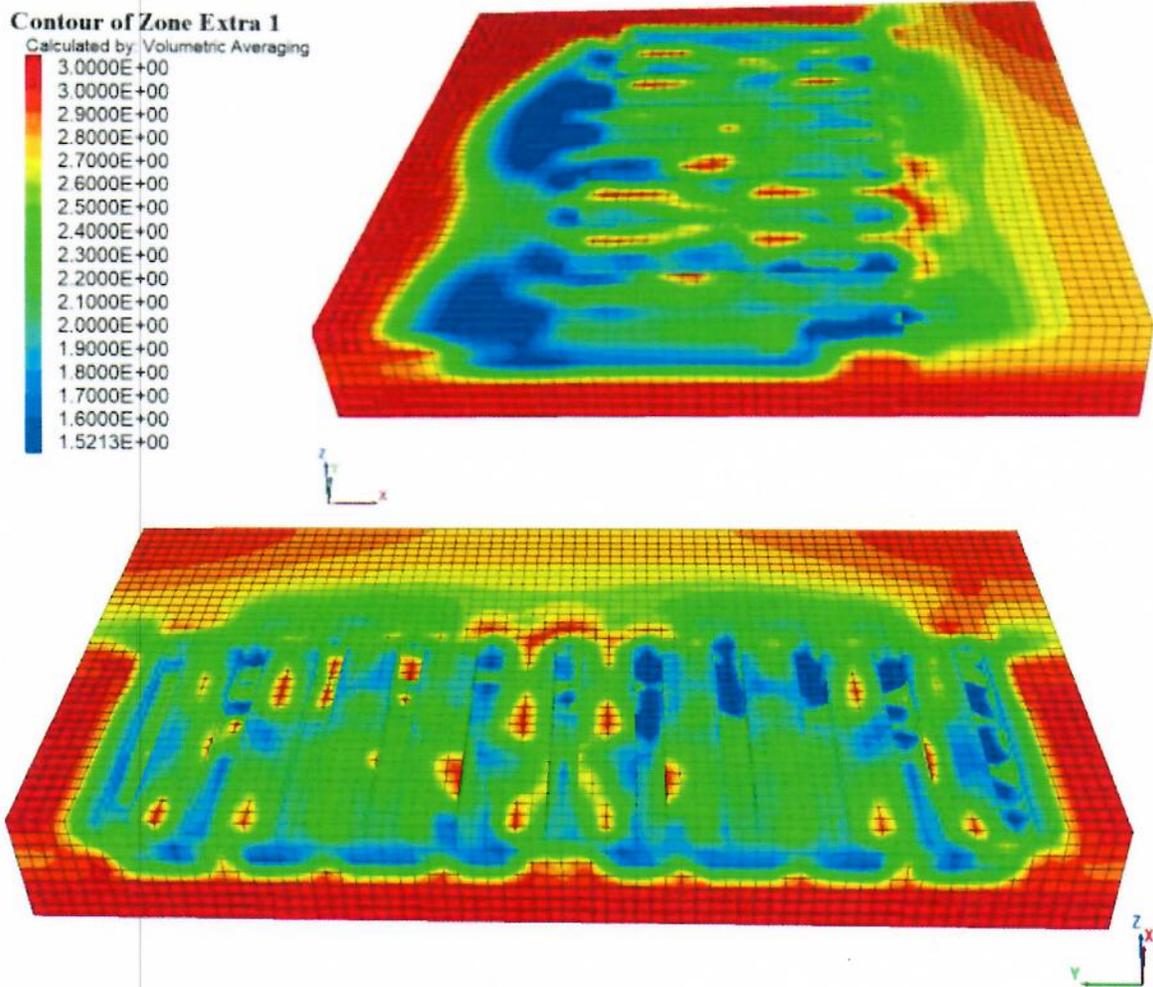


Figura 5.4. Factores de seguridad en el balasto y en la base (Caso IV)

2

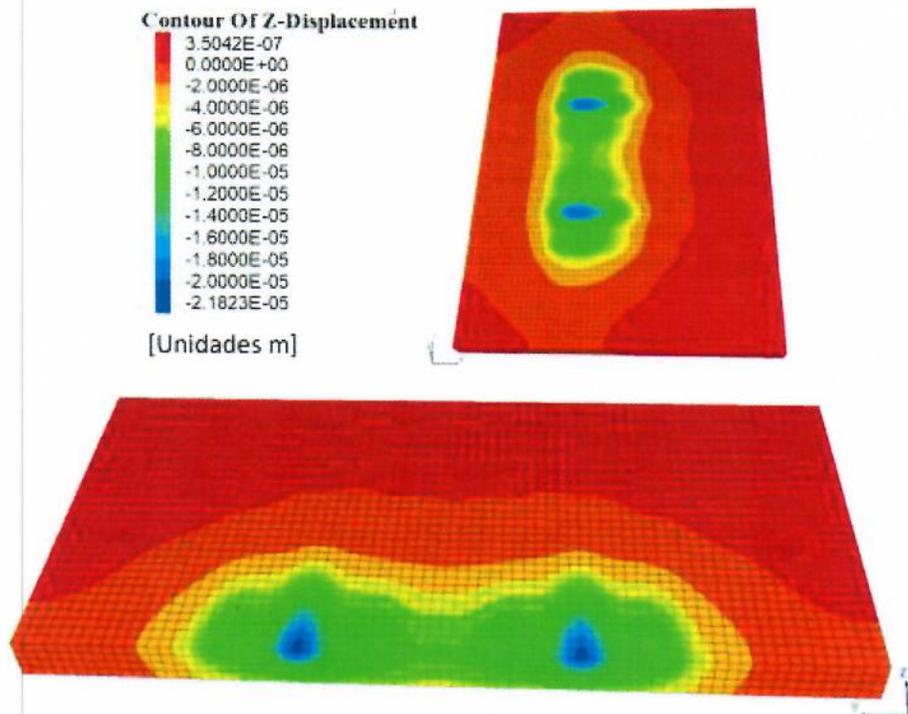


Figura 5.5. Deformación en el concreto fluido (Caso IV)

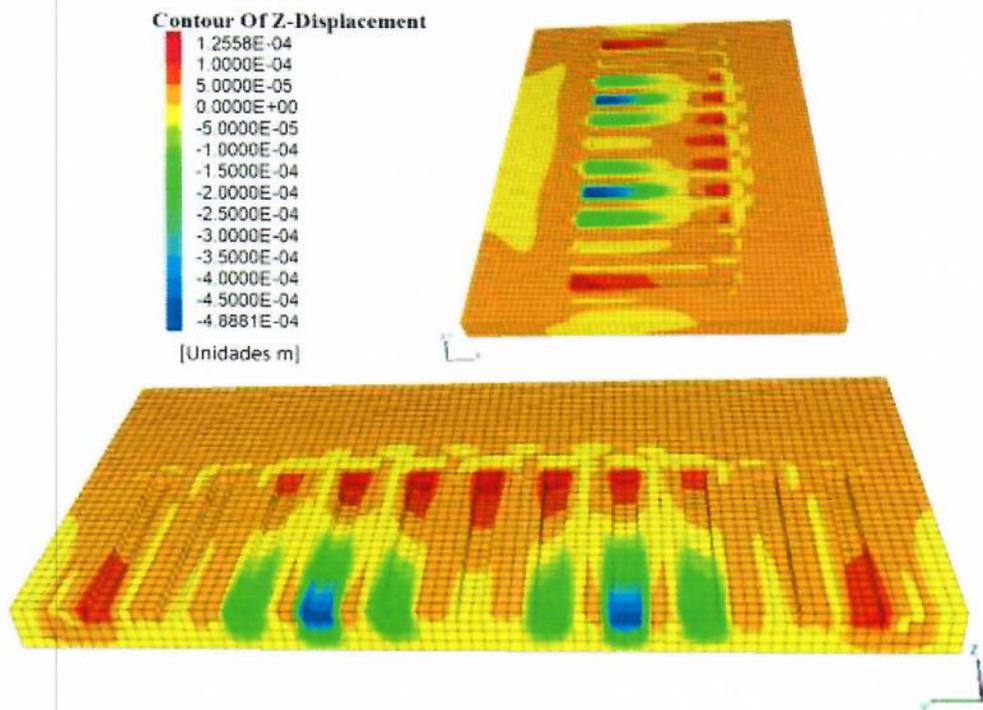


Figura 5.6. Deformación en el balasto (Caso IV)

Como se puede observar en las Figuras 5.2 y 5.3, los esfuerzos verticales aumentan con respecto a los que se presentan en el Caso (III), sin embargo, en la Figura 5.4 se aprecia

un claro aumento en el Factor de Seguridad mínimo, el cual es de 1.52 y 2.21 para el Balasto y el Concreto Fluido respectivamente.

## 5.2 Sustitución del balasto

Para aumentar el factor de seguridad del balasto, se evaluó su sustitución por uno de tipo basáltico y que cumpla con la normativa australiana, AS 2758.7, (Figura 5.7). Las características de este material fueron tomadas a partir de la literatura técnica (Indraratna & Nimbalkar, 2013). La Tabla 5.2 presenta las propiedades consideradas en este análisis, denominado Caso IV-A, el cual considera las mismas cargas que en el Caso III y la sustitución del material tipo base por un concreto fluido con las mismas características que el Caso IV.

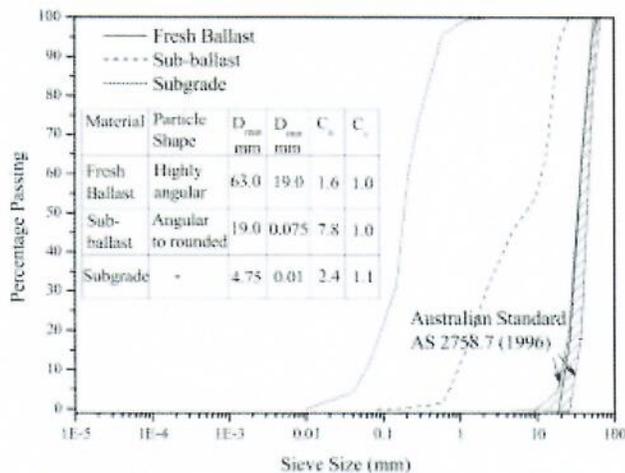


Figura 5.7. Indraratna & Nimbalkar, 2013

Tabla 5.2. Parámetros de los materiales empleados en el modelo numérico

Unidad	Modelo constitutivo	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$c$ [MPa]	$\phi$ [°]	$E$ [MPa]	$\nu$
(I) Balasto	Mohr-Coulomb	15.3	0	60	280	0.30
(II) Concreto Fluido	Mohr-Coulomb	17.1	0.981	0	4561	0.30
(III) Concreto ciclópeo	Elástico lineal	22.0	-	-	9,590	0.30
(IV) Durmiente	Elástico lineal	24.0	-	-	47,500	0.18
(V) Riel	Elástico lineal	76	-	-	210,000	0.3

Las Figuras 5.8 a 5.12 presentan los resultados de Caso IV-A.

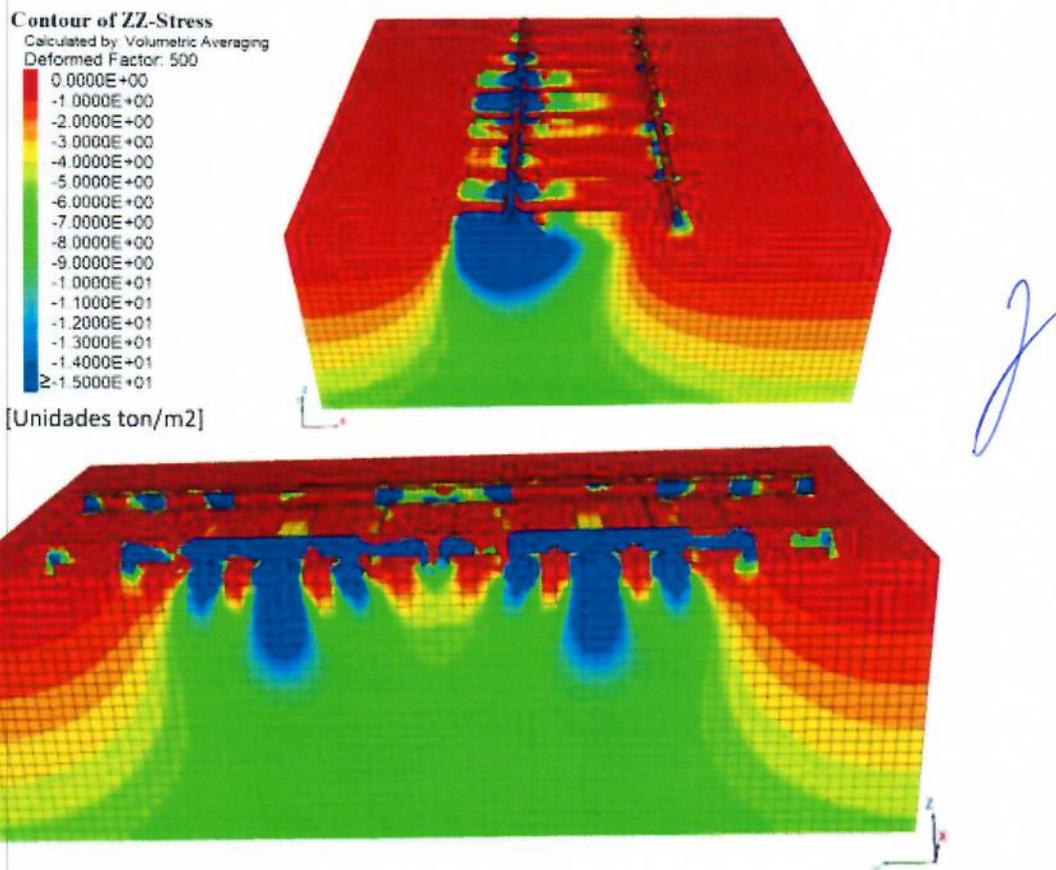


Figura 5.8. Contorno de esfuerzos verticales (Caso IV-A)

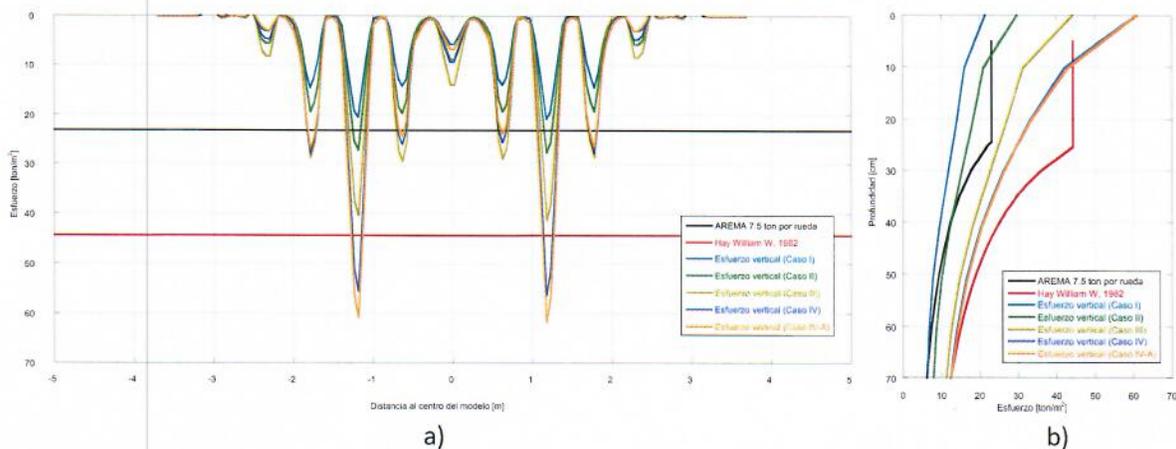


Figura 5.9. Esfuerzos verticales en las secciones a) A-A' y b) B-B' (Caso IV-A)

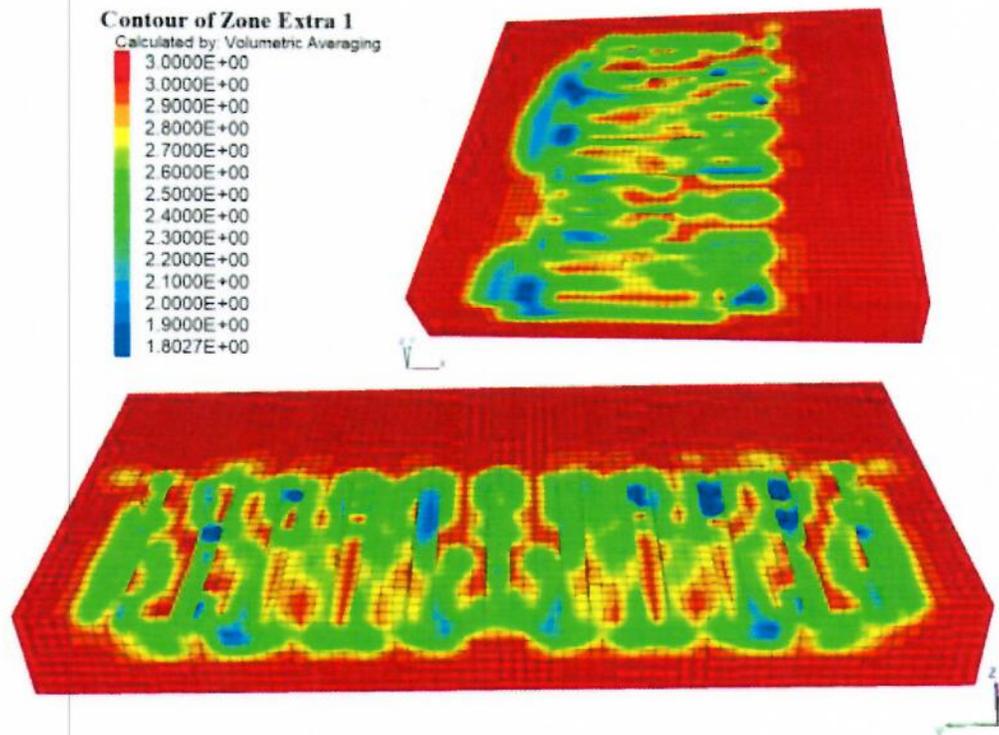


Figura 5.10. Factores de seguridad en el balasto y en la base (Caso IV-A)

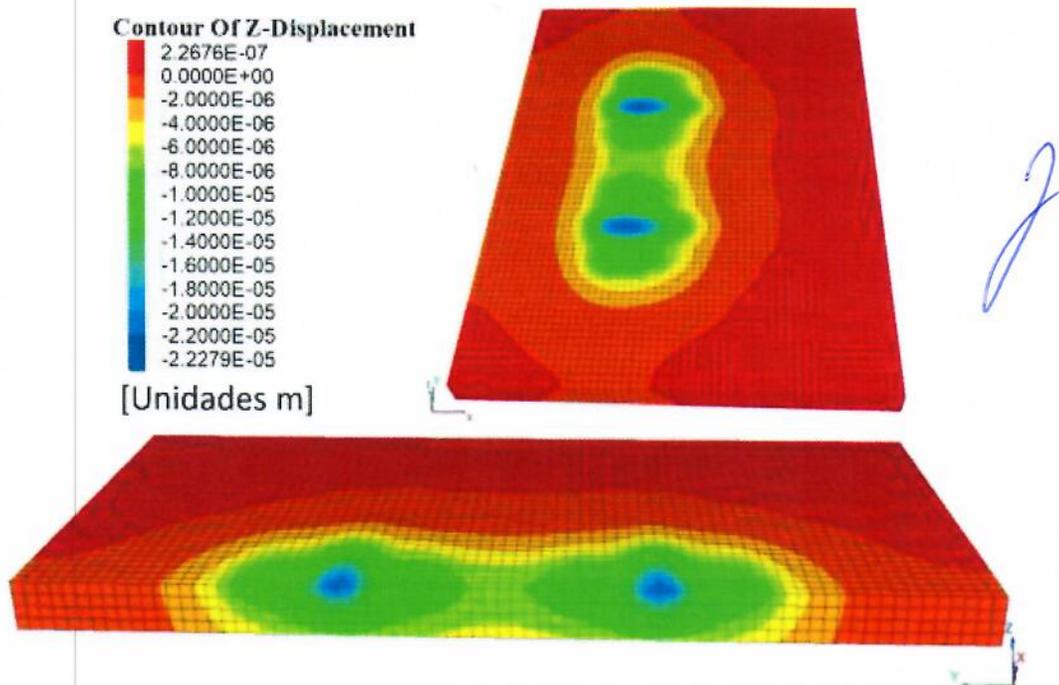


Figura 5.11. Deformación en el concreto fluido (Caso IV-A)

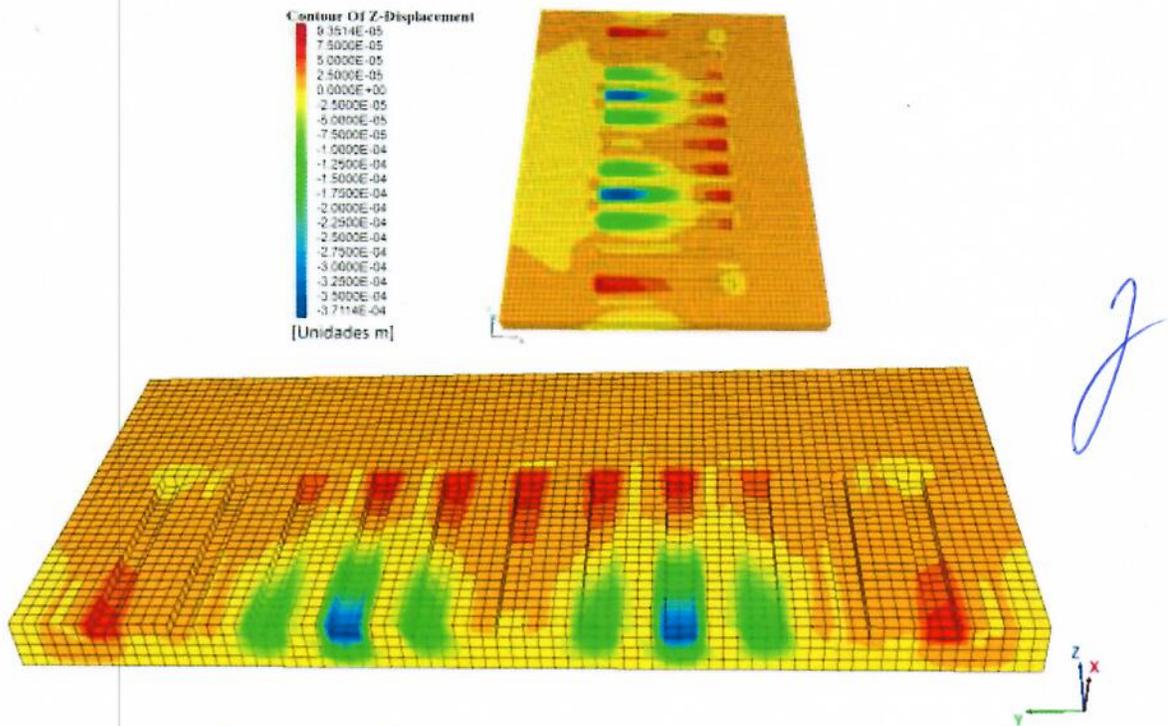


Figura 5.12. Deformación en el balasto (Caso IV-A)

Como se puede observar en las Figuras 5.8 y 5.9, los esfuerzos verticales no cambian de manera importante con respecto a los que se presentan en el Caso (IV), sin embargo, en la Figura 5.10 se aprecia un claro aumento en el Factor de Seguridad mínimo, el cual es de 1.8 y 2.4 para el Balasto y el Concreto Fluido respectivamente. Por lo que se considera que el cambio de materiales (balasto y base) tomado en cuenta en el Caso IV-A, es una solución óptima para disminuir la deformación plástica, acumulada por carga cíclica en las vías. La Tabla 5.7 presenta un resumen de los factores de seguridad mínimos para el balasto y la base.

Tabla 5.7. Factores de Seguridad de los casos analizados

Caso	Factor de Seguridad mínimo Balasto	Factor de Seguridad mínimo Base
I	1.33	1.28
II	1.29	1.23
III	1.24	1.20
IV	1.52	2.21
IV-A	1.80	2.40

De acuerdo con los resultados obtenidos, el comportamiento adecuado de la vía estará regido por las características del nuevo balasto y del relleno fluido. Por lo que, es indispensable llevar a cabo pruebas de laboratorio para obtener sus propiedades mecánicas, y con ellas realizar un análisis inverso con el modelo numérico, para validar las hipótesis planteadas

### 6 RECOMENDACIONES

- Obtener muestras de basalto para efectuar los ensayos de laboratorio correspondientes y verificar su estado. Dependiendo de los resultados de los ensayos se determinará la necesidad de cambiar dicho balasto.
- Revisar el material granular base durante la ejecución de las calas del balasto para verificar su grado de compactación, resistencia e integridad. Se recomienda verificar también que se cumplan las especificaciones de diseño para la compactación y una resistencia mínima de proyecto de  $2 \text{ kg/cm}^2$  determinada de pruebas de placa. De no cumplir lo anterior, se recomienda la sustitución por un material menos susceptible al agua y a las acumulaciones de deformaciones plásticas ante cargas cíclicas, tal como un concreto fluido o ciclópeo con resistencia a la compresión de  $20 \text{ kg/cm}^2$ .
- Para fines de prevenir futuras contingencias, se recomienda considerar la sustitución del material base por un material menos susceptible al agua como un concreto ciclópeo o fluido con resistencia a la compresión de  $20 \text{ kg/cm}^2$  en aquellas zonas donde se requiera.
- Construir una losa de sustentación (cubeta) y construir el drenaje y cárcamo en el vado en el subtramo Parque de los Venados – Eje Central.
- Sustituir la vía en 7 curvas con radios menores que 550 m de riel 115E por riel UIC60 con sus respectivos durmientes y fijaciones, de acuerdo con las recomendaciones de Systra.
- Para la reapertura de la línea, se recomienda la renivelación y realineación de la vía.
- Revisar por corrosión y en su caso, reemplazar las instalaciones y sus sujeciones.

El CTA recomienda cumplir con los procedimientos de mantenimiento para garantizar un comportamiento adecuado a corto, mediano y largo plazo.

## **7 REFERENCIAS**

- AREMA, 2010. American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association, Volume 1
- AASHTO (1993), "Guide for the Design of Pavement Structures" American Association of State and Highway Officials.
- Bowles J.E. "Foundation Analysis and Design" (1996) 4th edition McGraw-Hill International Editions.
- CEMEX 2020, Manual del constructor Concretos CEMEX. <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicaciones-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb4>.
- DD-12-PMDF-11-MS-612000-III-0311-05467-M-00
- Hay, William W. (1982). Railroad Engineering. Second Edition, John Wiley and Sons, Inc., New York, 1982.
- Indraratna, B., Nimbalkar, S.S., 2013. Stress-Strain Degradation Response of Railway Ballast Stabilized with Geosynthetics. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2013.139:684-700.
- Itasca consulting group (2009). FLAC3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions, user's guide. Minneapolis, Minnesota, USA.
- Montiel-varela, G., Domínguez-vázquez, A.C., Gallardo-hernández, E.A., Bregant, L., García-illescas, R., 2017. Experimental and numerical study for detection of rail defect. Eng. Fail. Anal. 81, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.07.024>
- NTC 2017. Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto.
- Sayeed, A., Shahin, M.A., 2016. Transportation Geotechnics Three-dimensional numerical modelling of ballasted railway track foundations for high-speed trains with special reference to critical speed. Transp. Geotech. 6, 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.01.003>
- Schmertmann J.H. (1978), "Guidelines for cone penetration testing – Performance and Design", U.S. Department of Transportation, Federal Highways Administration, Washington DC.
- 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.

