



Estudio de Mecánica de Suelos para el diseño geotécnico de la cimentación de la Estación Zapata que forma parte del proyecto Ampliación de la Línea 3 del Metrobús

Benito Juárez, Ciudad de México, México

Informe preparado para:

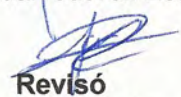


Informe final
EMS-CCMT-19-04-05

Octubre de 2019


Elaboró

Ing. Christian Juárez Estrada


Revisó

M. en I. José Ramón Cruz Águila


Aprobó

M. en I. José María Reyes Mariano



CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	ii
LISTA DE TABLAS.....	iii
LISTA DE ECUACIONES	iii
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Objetivo y alcances.....	2
1.3 Información proporcionada	2
1.4 Descripción general del proyecto.....	3
2 TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO	5
2.1 Trabajos de exploración geotécnica	5
2.2 Trabajos de laboratorio	8
3 CONDICIONES GEOTÉCNICAS DEL SITIO	10
3.1 Zonificación geotécnica (RCDF-2017).....	10
3.2 Hundimiento regional.....	11
3.3 Aspectos sísmicos	12
3.4 Atlas de riesgo de la Ciudad de México.....	13
3.5 Riesgos geológicos y geotécnicos.....	14
3.6 Modelo geotécnico.....	15
4 ANÁLISIS GEOTÉCNICOS	18
4.1 Cargas a nivel de la cimentación e hipótesis de análisis	18
4.2 Propuesta para la cimentación de las estructuras	18
4.3 Hipótesis de análisis	19
4.4 Revisión de los estados límite de falla (NTC-DC, 2017).....	20
4.5 Revisión de los estados límite de servicio (RCCDMX, 2017)	21
4.6 Módulos de reacción verticales.....	23
5 RECOMENDACIONES PARA LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS	24
6 CONCLUSIONES	26

REFERENCIAS 28

Anexo A Reportes de exploración geotécnica

Anexo B Resultados de laboratorio

Anexo C Reporte fotográfico

Anexo D Memoria de Cálculo

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Vista general de localización del sitio en estudio, estación Zapata, Ampliación de la L3 del MB, Ciudad de México (INEGI 2018)	1
Figura 1.2. Trazo de la ampliación de la Línea 3 del Metrobús y ubicación de la estación Zapata	3
Figura 1.3. Vista en corte de la estación Zapata (CEMEX, 2019), tomando como referencia la información de las estaciones Eugenia, División del Norte y Terminal Xoco (CEMEX 2019) .	4
Figura 1.4. Vista en corte de la estación Zapata, tomando como referencia la información de la estación Eugenia, División del Norte y Terminal Xoco (Cemex, 2019)	4
Figura 2.1. Apertura de excavación en el PCA-01	5
Figura 2.2. Perfil y levantamiento geotécnico de muestras alteradas e inalteradas del PCA-01	6
Figura 2.3. Levantamiento geotécnico en el PCA-02	6
Figura 2.4. Colocación y compactación del asfalto en el PCA-02	7
Figura 3.1. Zonificación geotécnica y localización de la estación Zapata (RCDF, 2017)	10
Figura 3.2. Hundimiento regional registrado por el II-UNAM entre 1998-2002 (Méndez, et al., 2010)	11
Figura 3.3. Espectro de diseño sísmico, estación Zapata, CDMX (SASID, 2017)	12
Figura 3.4. Ubicación general de la estación Zapata en el contexto del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRPC, 2019)	13
Figura 3.5. Riesgos geológico-geotécnicos identificados por medio del Atlas Nacional de Riesgos (CENAPRED, 2018)	14
Figura 3.6 Prueba de compresión triaxial tipo UU, PCA-1 TS-01	16
Figura 3.7 Modelo geotécnico propuesto para la estación del MB Zapata	17
Figura 4.1 Propuesta general de desplante para el cajón de cimentación de la estación del MB Zapata	19

Figura 4.2 Desplazamientos generados para el cajón de cimentación de la estación del MB Zapata para diferentes valores de carga viva media	22
Figura 4.3 Módulos de reacción para el cajón de cimentación de la estación del MB Zapata para diferentes niveles de cargas incidentes.....	23

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1. Muestras recuperadas de la exploración mediante pozos a cielo abierto.....	7
Tabla 2.2 Parámetros mecánicas del PCA-01, estación Zapata	8
Tabla 2.3 Resultados de laboratorio de los pozos PCA-01 y PCA-02, estación Zapata.....	9
Tabla 3.1 Modelo geotécnico propuesto para la estación de MB Zapata	17
Tabla 4.1. Verificación del estado límite de falla de acuerdo con el NTC-DC (2017)	21

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 4.1.....	20
Ecuación 4.2.....	20
Ecuación 4.3.....	21
Ecuación 4.4.....	23

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

CEMEX México (CEMEX), a través de su departamento de Abasto, solicitó a DICIMSA ejecutar el estudio de mecánica de suelos para el diseño geotécnico de la cimentación de la estación Zapata, misma que forma parte del proyecto Ampliación de la Línea 3 del Metrobús. Esta estación se ubicará sobre el Eje 1 Poniente (Av. Cuauhtémoc), entre las calles Zaragoza y de la Misericordia, en la Alcaldía Benito Juárez, Ciudad de México. La ubicación del sitio en estudio, en el contexto cartográfico proporcionado por el INEGI (2018), se presenta en la Figura 1.1.

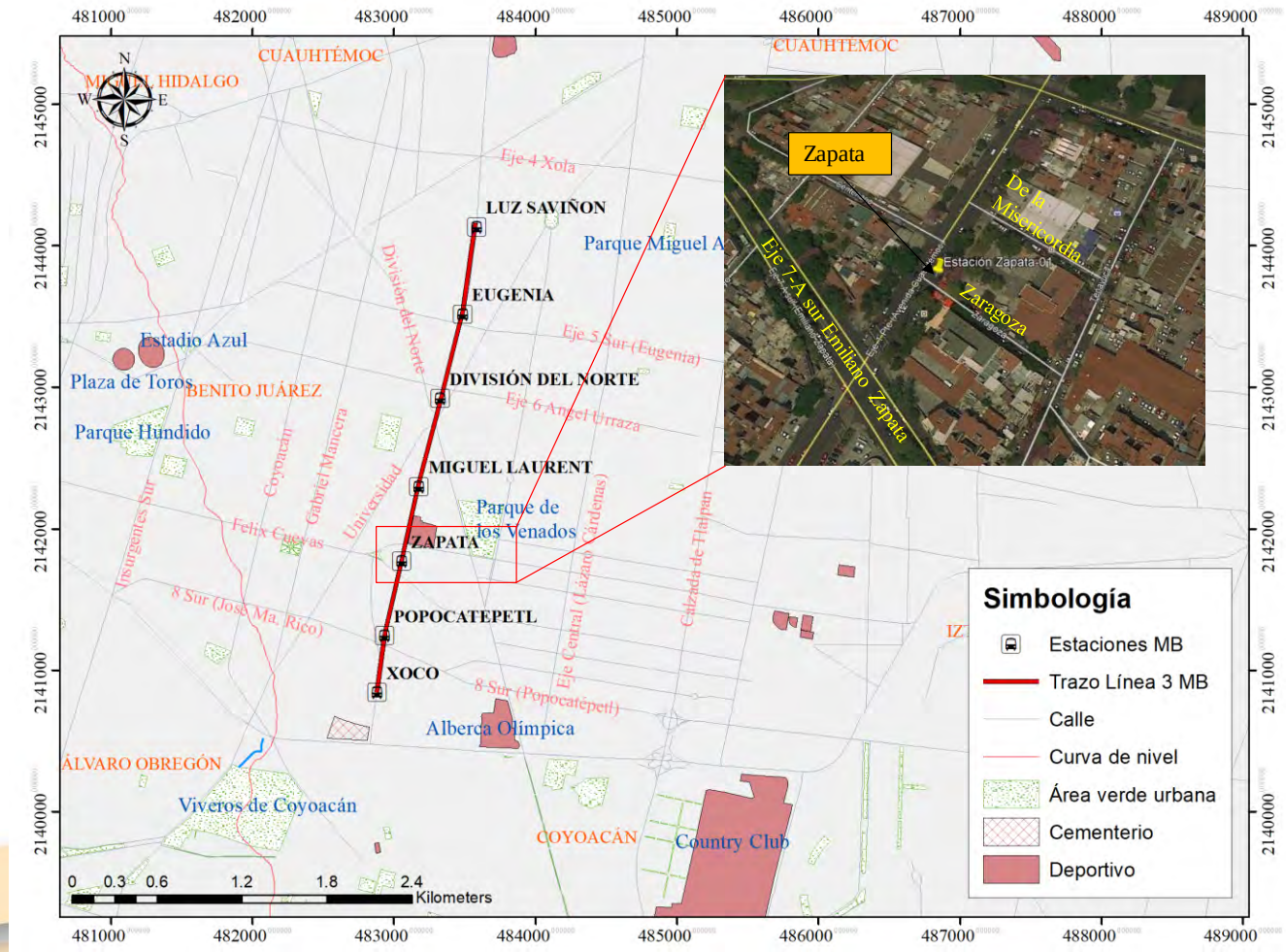


Figura 1.1. Vista general de localización del sitio en estudio, estación Zapata, Ampliación de la L3 del MB, Ciudad de México (INEGI 2018)

1.2 Objetivo y alcances

El objetivo central del presente estudio consiste en determinar la capacidad de carga del cajón de cimentación que soportará las cargas generadas por la estación Zapata; asimismo, proporcionar el valor de *VRS* de las muestras obtenidas *in situ* para ser considerado en el diseño de pavimentos rígidos y generar recomendaciones para los procesos constructivos del cajón de cimentación. Para cumplir con estos objetivos se plantearon los alcances siguientes:

- Especialistas en geotecnia realizaron un reconocimiento del sitio en estudio para identificar la presencia de anomalías geotécnicas (en el caso de existir) que debieran ser consideradas en el diseño de las cimentaciones, tales como sistemas de fallas, evidencias de agrietamientos regionales o la presencia de estructuras enterradas.
- Ejecución y muestreo de dos (2) pozos a cielo abierto con profundidades máximas de exploración de 3.06 y 1.20 metros; Una vez que se detectó el terreno natural, se recuperaron muestras inalteradas mediante tubos de acero de pared delgada (shelby).
- Ejecución de pruebas de laboratorio para determinar las propiedades índice y mecánicas del material sobre el cual se desplantará el cajón de cimentación.
- Interpretación estratigráfica del sitio en estudio y determinación del modelo geotécnico para la ejecución de los análisis geotécnicos.
- Determinación de la capacidad de carga, asentamientos y módulos de reacción del cajón de cimentación de la estación de MB Zapata para su posterior diseño estructural.
- Determinación del valor relativo de soporte (*VRS*) de las muestras obtenidas *in situ* para ser considerado durante el diseño de pavimentos rígidos.
- Emisión de recomendaciones generales para el proceso constructivo del cajón de cimentación.

1.3 Información proporcionada

Para el desarrollo del presente informe, CEMEX, proporcionó a DICIMSA la información siguiente:

- Eje del trazo del proyecto de ampliación de la Línea 3 del Metrobús (marzo de 2019); archivo electrónico en formato PDF: “190912_Eje de Trazo”.
- Fachada arquitectónica en planta y corte de la estación Eugenia del proyecto de ampliación de la Línea 3 del Metrobús (marzo de 2019); archivo electrónico en formato PDF: “MBL3-CMX-EST-ARQ-004A-1-EUG”.

- Fachada arquitectónica en planta y corte de la estación División del Norte del proyecto de ampliación de la Línea 3 del Metrobús (marzo de 2019); archivo electrónico en formato PDF: “MBL3-CMX-EST-ARQ-004A-1-DIV”.
- Plano de la Terminal Hospital General Xoco (marzo de 2019); archivo electrónico en formato DWG: “MBL3-CMX-TER-ARQ-002-1”.

1.4 Descripción general del proyecto

La ampliación de la Línea 3 del Metrobús forma parte de los diferentes proyectos que ha emprendido el actual Gobierno de la ciudad para mejorar la movilidad urbana en la zona sur de la Ciudad de México. Esta ampliación tendrá una longitud de 4.27 km, correrá a lo largo del Eje 1 Poniente (Av. Cuauhtémoc y Av. México-Coyoacán), desde Av. Xola hasta la calle de Bruno Traven, en la Alcaldía Benito Juárez. Asimismo, el proyecto de ampliación contará con seis estaciones y una terminal a la altura del Hospital General Xoco. En la Figura 1.2 se presenta el trazo general de la ampliación de la Línea 3 del Metrobús, resaltándose la ubicación de la estación de MB Zapata, misma que estará a una distancia de 100 del trazo de la Línea 12 del STC Metro.

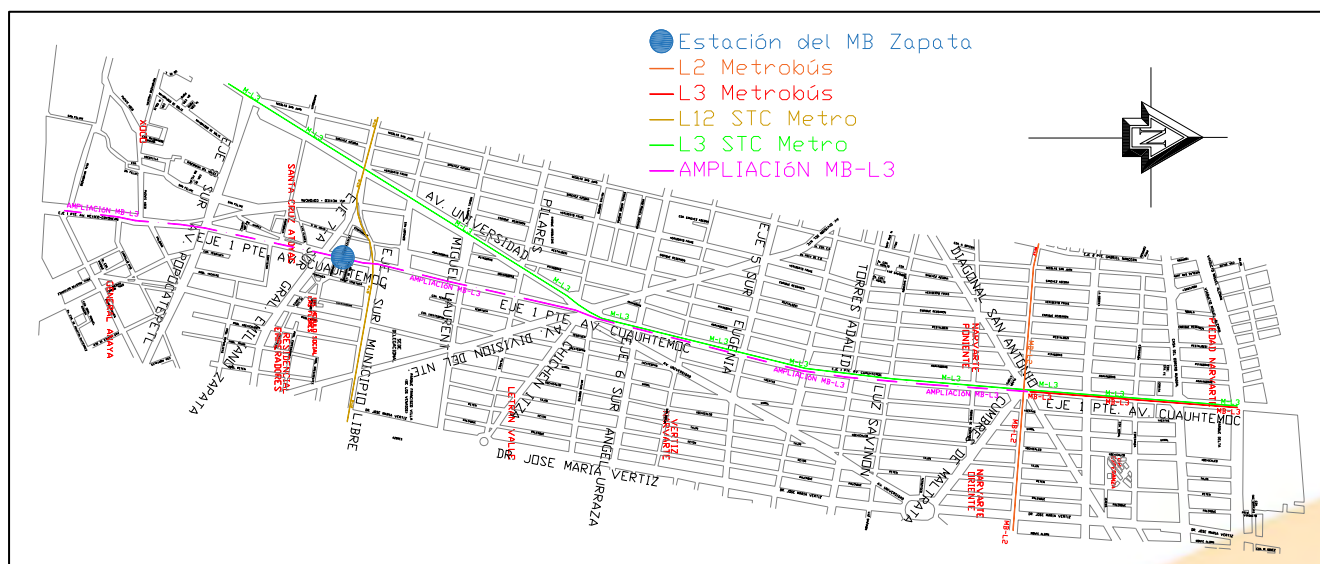


Figura 1.2. Trazo de la ampliación de la Línea 3 del Metrobús y ubicación de la estación Zapata

Por su parte, la estación Zapata tendrá una longitud total del orden de 105 m; constará de una rampa de acceso con una longitud aproximada de 20 m, un área destinada a servicios con longitud de 8.5 m y un andén con una longitud de 77 metros, Figura 1.3.

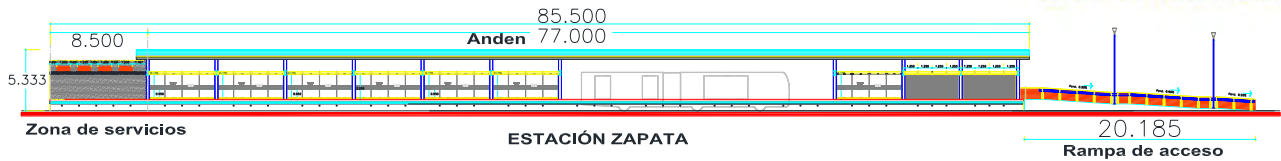


Figura 1.3. Vista en corte de la estación Zapata (CEMEX, 2019), tomando como referencia la información de las estaciones Eugenia, División del Norte y Terminal Xoco (CEMEX 2019)

Tomando como referencia la información proporcionada acerca de las estaciones del MB Eugenia, División del Norte y la Estación Terminal Xoco (CEMEX, 2019), se asume como hipótesis que la estación Zapata constará de un andén cubierto por una techumbre ligera, como se muestra en la Figura 1.4. Dicha techumbre estará soportada por una estructura metálica compuesta por perfiles de acero. De igual manera, se asume que tanto el andén como la techumbre de la estación Zapata se apoyarán sobre un cajón de concreto armado de 3.4 m de ancho desplantado a una profundidad que oscila entre 0.8 y 2.0 m a partir de la superficie vial de concreto hidráulico, dependiendo de la capacidad de carga del suelo y la posición de estructuras subterráneas.

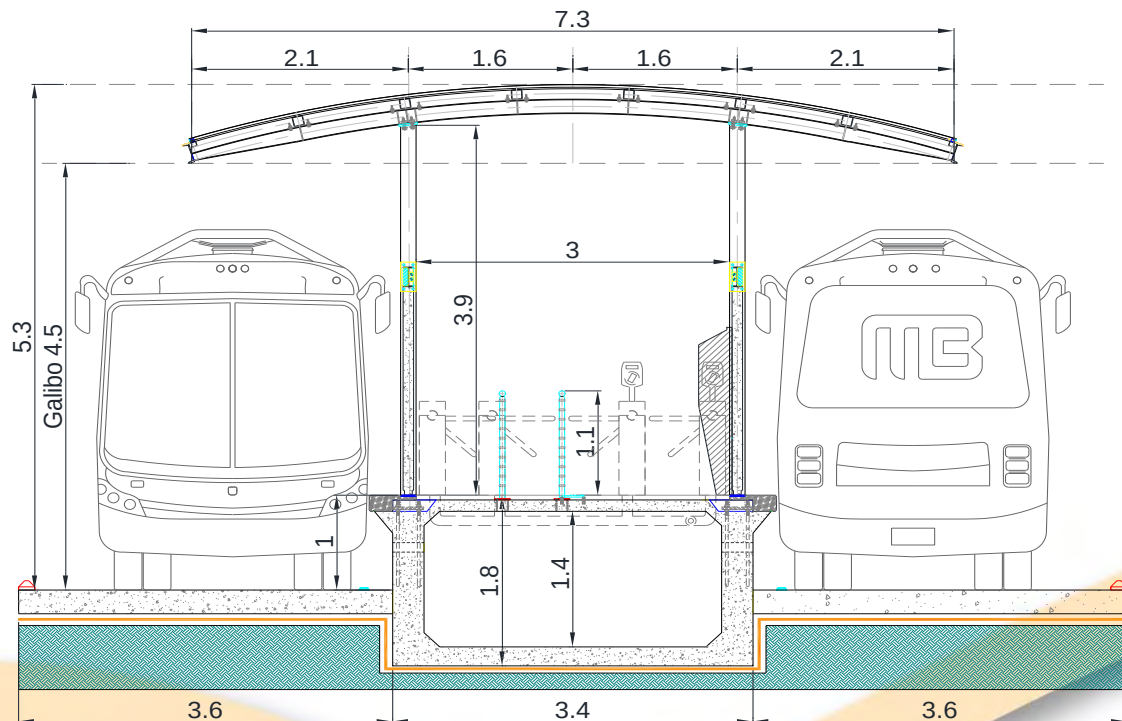


Figura 1.4. Vista en corte de la estación Zapata, tomando como referencia la información de la estación Eugenia, División del Norte y Terminal Xoco (Cemex, 2019)

2 TRABAJOS DE CAMPO Y LABORATORIO

2.1 Trabajos de exploración geotécnica

Los trabajos de exploración geotécnica efectuados para fines del presente estudio constaron en la ejecución de dos (2) pozos a cielo abierto (PCA); las profundidades máximas de exploración alcanzadas, medidas a partir del nivel de la superficie vial de concreto asfáltico, fueron de 3.06 y 1.20 metros. Los trabajos de exploración en el PCA-01 se llevaron a cabo en dos etapas: a) excavación de pozo a cielo abierto hasta detectar el terreno natural y b) recuperación de muestras inalteradas mediante tubo de pared delgada tipo Shelby. En las Figuras 2.1 a 2.4, se muestran los trabajos de exploración y muestreo realizados. El nivel de aguas freáticas no se detectó durante los trabajos de exploración. En la Tabla 2.1 se enlistan las muestras extraídas de los pozos a cielo abierto y su ubicación geográfica. En el Anexo A se presenta el reporte de exploración.

A partir de estos trabajos fueron recuperadas muestras alteradas e inalteradas, con la finalidad de conocer la composición y características de los materiales que subyacen a la carpeta asfáltica, ya que dichos materiales servirán como desplante del cajón de cimentación de la estación Zapata. Debido a la importancia de la vialidad sobre la cual ha sido proyectado el eje de la ampliación, los trabajos de exploración fueron nocturnos y programados a ejecutarse una vez que el flujo vehicular descendiera, con horario de 23:00 a 5:00 horas. Como medida de seguridad, el punto de exploración fue confinado con las medidas y el equipo de seguridad pertinente.

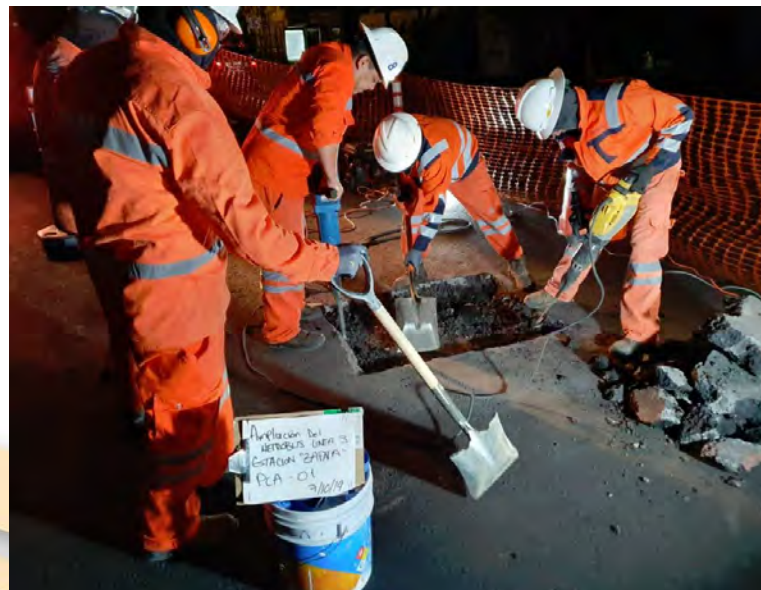


Figura 2.1. Apertura de excavación en el PCA-01



Figura 2.2. Perfil y levantamiento geotécnico de muestras alteradas e inalteradas del PCA-01



Figura 2.3. Levantamiento geotécnico en el PCA-02



Figura 2.4. Colocación y compactación del asfalto en el PCA-02

Tabla 2.1. Muestras recuperadas de la exploración mediante pozos a cielo abierto

Pozo	Prof. Máxima de exploración	Coordenadas UTM		Muestra	Profundidad [m]		Tipo de muestra
		X	Y		de	a	
PCA-01	3.06m	483049	2141745	1	0.19	0.35	Representativa
				2	0.35	0.81	Representativa
				3	0.81	1.26	Representativa
				Costal 1	0.35	0.81	Alterada
				Costal 2	0.81	1.26	Alterada
				TS-01	1.26	2.16	Inalterada
				TS-02	2.16	3.06	Inalterada
PCA-02	1.20 m	483054	2141772	1	0.20	0.52	Representativa
				2	0.52	0.86	Representativa
				3	0.86	1.20	Representativa
				Costal 1	0.86	1.20	Alterada

2.2 Trabajos de laboratorio

Las muestras obtenidas a partir de los trabajos de exploración geotécnica fueron trasladadas al laboratorio de Mecánica de Suelos para la determinación de sus propiedades índice y propiedades mecánicas, las cuales se enlistan a continuación:

- **Contenido natural de agua ($w\%$).** Esta propiedad es usada para expresar la relación entre las fases sólida y líquida de un cierto volumen de material. Su determinación se basa en la norma ASTM D2216.
- **Análisis granulométrico.** La composición granulométrica fue determinada por medio de un análisis granulométrico completo por medio del tamizado de las muestras recuperadas durante los trabajos de exploración; esta prueba está basada en la norma ASTM D422.
- **Compresión triaxial No consolidada No drenada (ASTM D2850).** Por medio de esta prueba fueron determinados los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante y las características esfuerzo-deformación de los materiales recuperados de manera inalterada. Su ejecución se basa en las normas BS 1377-2:1990 y ASTM D2850.
- **Prueba de compactación Proctor.** Esta prueba es usada para determinar el contenido de agua óptimo de una muestra de suelo con el cual esta alcanza su máxima densidad seca. Su determinación se basa en las normas ASTM D698.
- **Valor relativo de soporte (VRS).** Por medio del VRS , determinado a partir de los procedimientos sugeridos en la norma ASTM D1883, es posible evaluar la resistencia potencial de las estructuras de los pavimentos.

A continuación, los resultados de las pruebas mecánicas de laboratorio se resumen en la Tabla 2.2, mientras que las propiedades índice y de pavimentos, se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.2 Parámetros mecánicas del PCA-01, estación Zapata

Pozo	Muestra	Profundidad [m]		w	γ	e	c_u	ϕ_u	E_u
		De	A	[%]	[kN/m ³]	[-]	[kPa]	[°]	[MPa]
PCA-01	TS-1	1.26	2.16	17	14.3	1.18	41	19	10.3

Tabla 2.3 Resultados de laboratorio de los pozos PCA-01 y PCA-02, estación Zapata

Pozo	Muestra	Profundidad [m]		w [%]	γ [kN/m ³]	Límites de consistencia			Granulometría simplificada			SUCS	Compactación		
		De	A			LL [%]	LP [%]	IP [%]	G [%]	S [%]	F [%]		VRS [%]	$\gamma_{d,max}$ [kN/m ³]	w_{opt} [%]
PCA-01	1	0.19	0.35	14	21.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	0.35	0.81	11	20.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	0.81	1.26	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Costal 2	0.35	0.81	-	-	-	-	-	31	50	19	SC	-	-	-
	Costal 3	0.81	1.20	-	-	25	19	6	4	50	46	SC-SM	18.4	15.6	23.1
	TS-1	1.26	2.16	17	14.3	-	-	-	1	65	34	SM	-	-	-
	TS-2	2.16	3.06	6	-	-	-	-	24	73	3	SP	-	-	-
PCA-02	1	0.20	0.52	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2	0.52	0.96	19	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	0.86	1.20	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

El Anexo B contiene los resultados de las pruebas ejecutadas en laboratorio, así como sus respectivas interpretaciones.

3 CONDICIONES GEOTÉCNICAS DEL SITIO

3.1 Zonificación geotécnica (RCDF-2017)

El Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF-2018) y sus Normas Técnicas Complementarias (NTC-2017), desde un punto de vista geotécnico, zonifican a la Ciudad de México en tres zonas principales: Zona I (Lomas), Zona II (Transición) y Zona III (Lacustre). Una breve descripción de cada una de estas zonas es dada a continuación:

- **Zona I. Lomas:** formadas por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre.
- **Zona II. Transición:** en la que los depósitos profundos se encuentran a 20 m de profundidad, o menos.
- **Zona III. Lacustre:** integrada por potentes depósitos de arcilla altamente compresibles, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla.

La estación Zapata se localiza dentro de la Zona II (Transición), tal y como se muestra en la Figura 3.1.

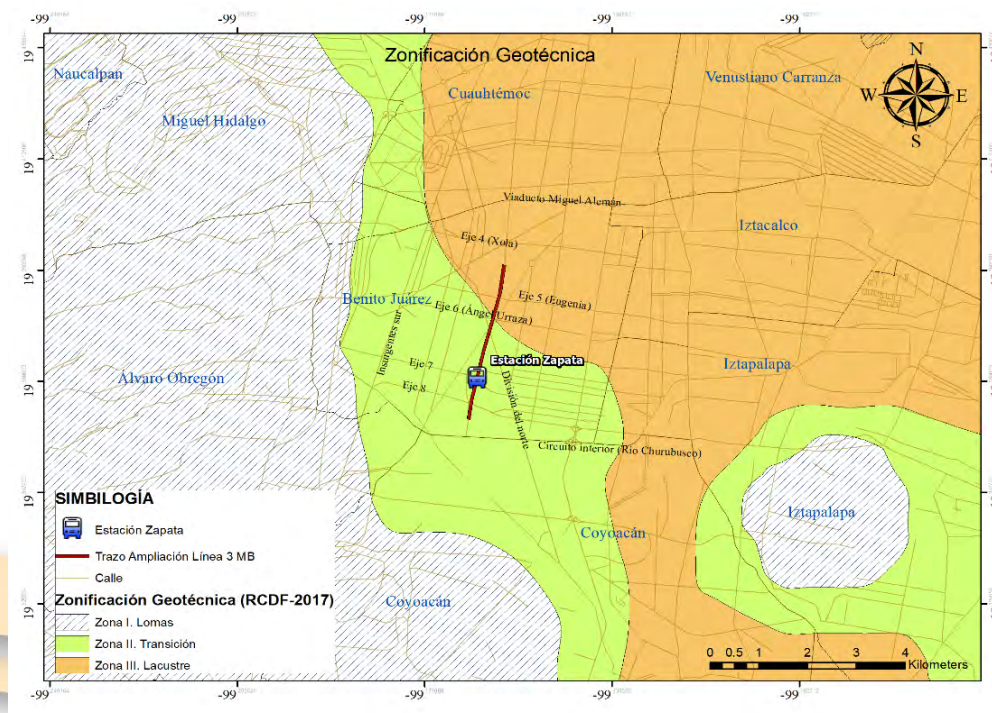


Figura 3.1. Zonificación geotécnica y localización de la estación Zapata (RCDF, 2017)

3.2 Hundimiento regional

El fenómeno de hundimiento regional en la Ciudad de México fue detectado en 1925 por el Ing. Roberto Gayol, quien lo reportó a la Sociedad de Ingenieros y Arquitectos de México. Asimismo, a través de la comparación de nivelaciones realizadas desde finales del Siglo XIX contra las efectuadas en los siglos XX y XXI se ha demostrado plenamente la existencia e importancia de dicho fenómeno. El principal factor que se ha señalado como detonante del fenómeno de hundimiento regional es la pérdida de presión piezométrica en los mantos permeables como resultado de la explotación de los acuíferos dentro del área urbana de la Ciudad de México (Carrillo, 1948; Marsal y Mazari, 1959; Marsal, 1992; Lesser, 1998; Santoyo, *et al.*, 2005).

En la Figura 3.2 se muestran las velocidades de hundimiento regional para el período 1998-2002 que han sido registradas por el Laboratorio de Geoinformática del Instituto de Ingeniería de la UNAM. A partir de esta figura se desprende que la velocidad de hundimiento regional en la zona donde se construirá la estación Zapata es prácticamente nulo; por tanto, dicho fenómeno no tendrá impacto sobre la cimentación de la estación Zapata.

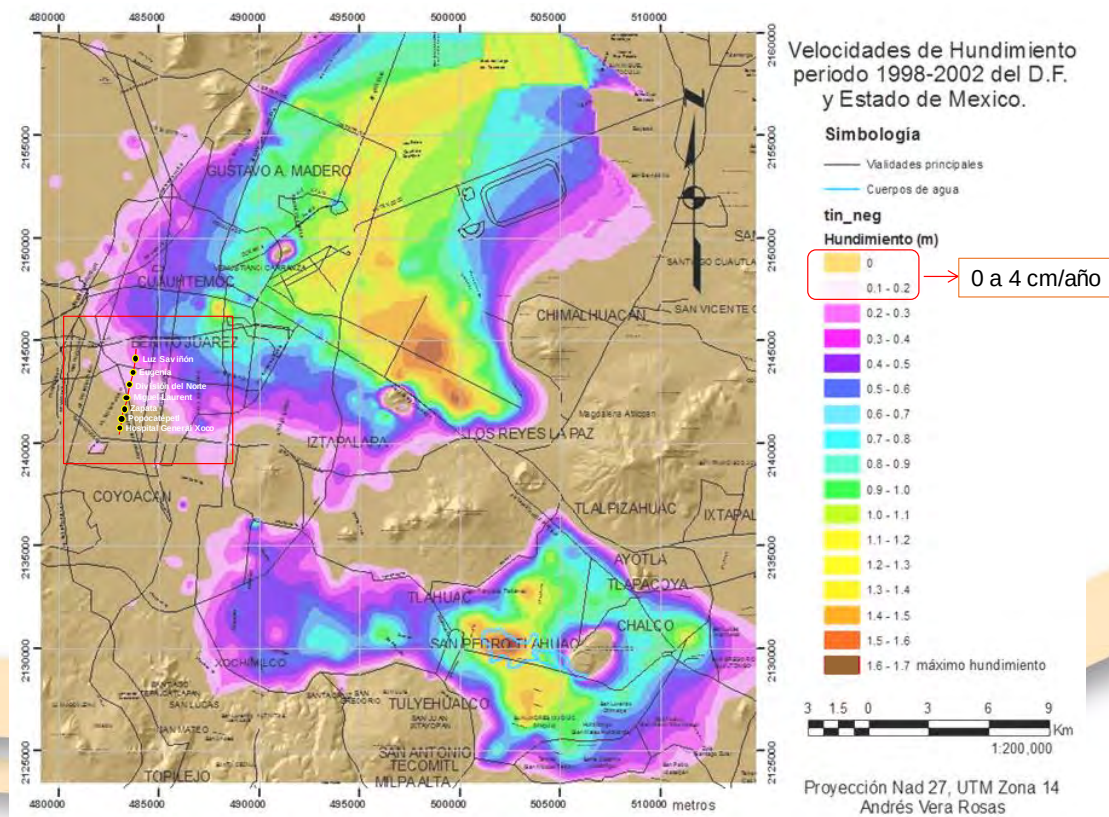


Figura 3.2. Hundimiento regional registrado por el II-UNAM entre 1998-2002 (Méndez, *et al.*, 2010)

3.3 Aspectos sísmicos

El espectro de diseño sísmico transparente se determinó con base en lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo actualmente vigentes en la Ciudad de México (NTC-2017). Dichas normas indican que el espectro de diseño se deberá determinar a través del Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID), el cual está disponible en la página oficial del Instituto para la Seguridad de las Construcciones en la Ciudad de México.

Por otra parte, dado que la estación Zapata será una estación de transporte masivo que deberá mantenerse en operación aún después de un sismo de magnitud importante, esta estructura se clasifica como perteneciente al grupo A y se encuentra dentro del subgrupo A1. Es decir, debido a dicha clasificación el diseño de esta estación requiere un grado de seguridad alto ante eventos sísmicos. Por tal razón, para la generación del espectro de diseño se adoptó el factor de importancia correspondiente a estructuras del subgrupo A1, que en este caso es igual a 1.5.

Con base en lo anteriormente expuesto, al espectro de diseño le corresponden valores del coeficiente sísmico de la meseta espectral (c_s) y de la aceleración pico del terreno (a_0) de 0.500 g y 0.138 g, respectivamente. En la Figura 3.3 se muestra el espectro de diseño obtenido, así como su correspondiente espectro de peligro uniforme y espectro elástico. Adicionalmente, es importante hacer mención que para la construcción de este espectro se asumieron valores unitarios para los factores de irregularidad, comportamiento sísmico y de hiperestaticidad; por tanto, durante la fase de diseño estructural dicho espectro deberá modificarse tomando en cuenta los valores correspondientes de acuerdo con la estructuración de la estación.

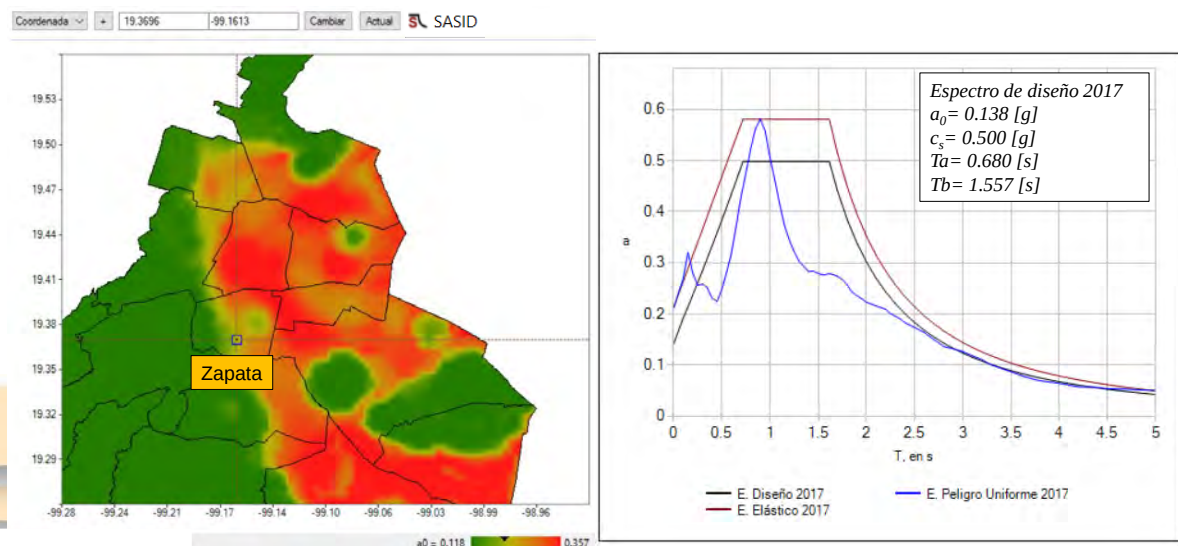


Figura 3.3. Espectro de diseño sísmico, estación Zapata, CDMX (SASID, 2017)

3.4 Atlas de riesgo de la Ciudad de México

El Atlas de Riesgos de la Ciudad de México, como lo indica la Ley de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México (LGIRPC-CDMX, 2019), es el sistema integral de información de la ciudad que identifica de forma conjunta los daños y pérdidas esperados a los que está expuesta la población de cada una de las Alcaldías de la Ciudad de México. Por tal motivo, esta base de datos es un gran apoyo para la identificación de riesgos geológico-geotécnicos generales de un determinado sitio de estudio dentro de la ciudad, como es el caso de la estación Zapata, ubicada sobre la Av. Cuauhtémoc, entre las calles Zaragoza y de la Misericordia, dentro de la Alcaldía Benito Juárez.

En la Figura 3.4 se muestra la ubicación de la estación Zapata en el contexto del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRPC, 2019), con énfasis en la capa de información geológica disponible a la fecha de elaboración del presente informe.



Figura 3.4. Ubicación general de la estación Zapata en el contexto del Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRPC, 2019)

3.5 Riesgos geológicos y geotécnicos

La LGIRPC-CDMX (2019), define como riesgo a todos aquellos daños y pérdidas probables sobre la población, resultado de la interacción entre las vulnerabilidades que esta tenga y la exposición ante la presencia de un fenómeno perturbador. Para el caso que compete al presente Estudio, se identificaron las vulnerabilidades de tipo geológico-geotécnico registradas en el Atlas de Riesgos de la Ciudad de México (SGIRPC, 2019), tales como: fallas geológicas inferidas, fracturas y puntos importantes durante eventos sísmicos ocurridos en el pasado.

De acuerdo con base de datos del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), a través del Atlas Nacional de Riesgos, mismo que está sujeto al Artículo 2 de la Ley General de Protección Civil, la distancia de la estación Zapata a la falla inferida más cercana es de aproximadamente 510 m; asimismo, la distancia al epicentro registrado más cercano es del orden de 880 metros, Figura 3.5.

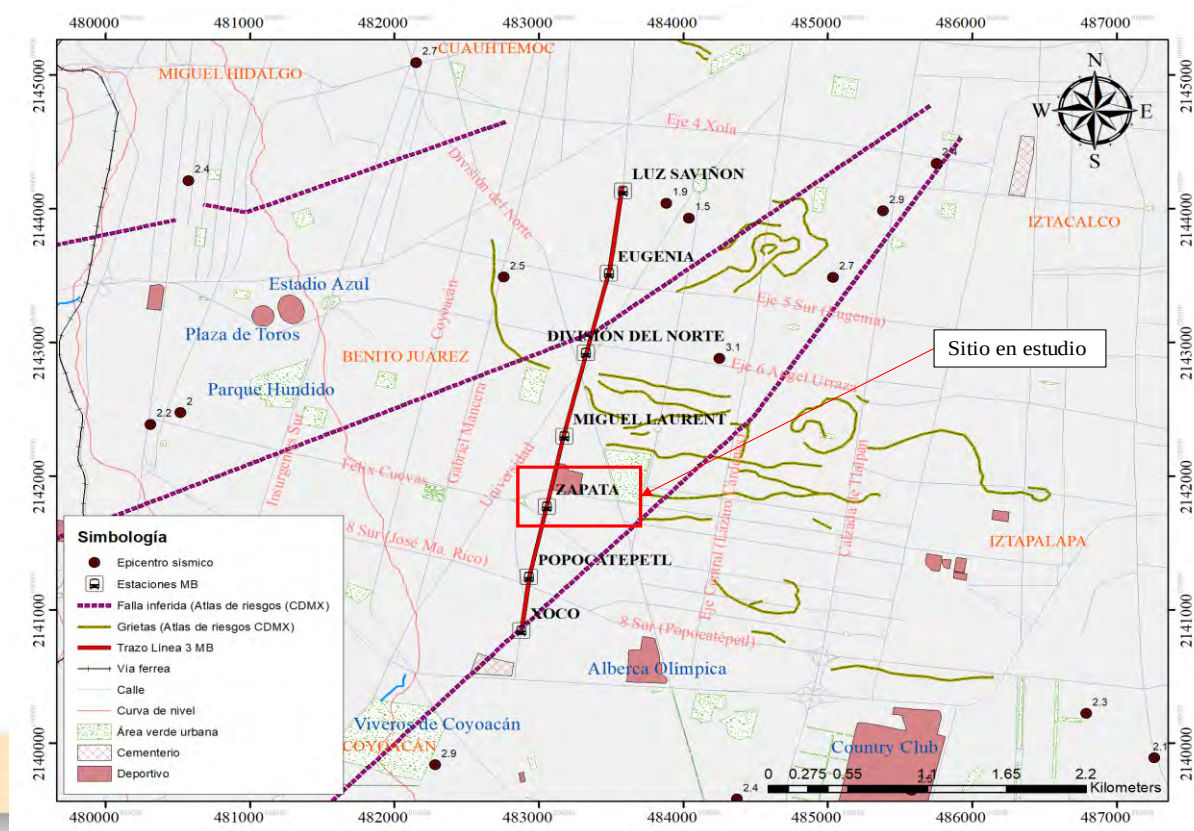


Figura 3.5. Riesgos geológico-geotécnicos identificados por medio del Atlas Nacional de Riesgos (CENAPRED, 2018)

3.6 Modelo geotécnico

Al sintetizar la información proporcionada por CEMEX (2019), la generada durante los trabajos de exploración geotécnica, las pruebas de laboratorio de Mecánica de Suelos hasta ahora realizadas y la información proveniente de investigaciones exhaustivas realizadas para caracterizar los suelos presentes en la cuenca del Valle de México, se propuso un modelo geotécnico conformado por las unidades estratigráficas siguientes:

- **UE-1. Relleno antrópico controlado: arena limosa con grava de compacidad muy densa (SM).** Esta unidad estratigráfica está compuesta predominantemente por materiales granulares compactados por medios mecánicos. A partir de los valores de VRS conocidos de las estaciones vecinas que forman parte del proyecto de ampliación de la Línea 3 del MB, se estimó el ángulo de fricción interna de esta unidad con base en el criterio establecido por Livneh (1989), en concomitancia con el criterio de Peck, Hanson y Thornburn (1974), el cual se obtuvo con un rango de entre 35° y 42°. A su vez, con base en las características de granulométricas y compacidad de esta unidad, se estimó un rango de módulo de elasticidad de 35 a 75 MPa. El espesor de esta unidad es del orden de 0.15 metros.
- **UE-2. Relleno antrópico NO controlado.** Esta unidad está compuesta por una mezcla heterogénea de residuos de mampostería de diferentes tamaños y suelos cuya composición granulométrica exhibió, durante ensayos de laboratorio, un porcentaje de gravas ($G\%$) de 4% a 31%, porcentaje de arenas ($A\%$) del orden de 50% y porcentaje de finos ($F\%$) de 19% a 46%. A partir de pruebas de compactación en laboratorio se obtuvo el peso volumétrico seco máximo de esta capa de material, el cual tiene un valor del orden de 15.6 kN/m³. Esta unidad alcanza una profundidad de 1.25 metros desde la superficie de rodamiento de Av. Cuauhtémoc.

UE-3. Arcilla arenosa de baja plasticidad de consistencia media a firme (CL) y arena limosa de compacidad media (SM). A partir de la exploración realizada para la estación Miguel Laurent y de las muestras recuperadas de los trabajos de exploración correspondientes a la estación Zapata, se sabe que esta unidad presenta un porcentaje de gravas ($G\%$) cercano al 1%, un porcentaje de arenas ($A\%$) que va de 36% a 65%, y un porcentaje de finos ($F\%$) que se encuentra en el rango de 34% a 64%. A su vez, esta unidad registró un contenido natural de agua desde 16% a 29%. A partir de pruebas de compresión triaxial de tipo UU se obtuvieron sus respectivos parámetros de resistencia al esfuerzo cortante y deformabilidad, como se ilustra en la Figura 3.6. Esta unidad presentó una cohesión no drenada (c_u) igual a 41 kPa, un ángulo de fricción interna (ϕ_u) igual a 19° y un módulo de elasticidad (E_u) promedio igual a 10.3 MPa. Por

su parte, los parámetros de compresibilidad de esta unidad fueron estimados a partir de diferentes correlaciones propuestas por el Instituto de Ingeniería de la UNAM (2016) para los suelos presentes en la cuenca del Valle de México; de esta manera se estableció que el índice de compresión (C_c) oscila entre 0.43 y 0.82, y el índice de recompresión (C_r) en un rango de 0.02 a 0.10. Asimismo, se consideró que la relación de sobreconsolidación (OCR) de estos suelos oscila entre 1.4 y 2.5. Finalmente, como criterio de diseño se asumió, desde un punto de vista conservador, que este estrato compresible se extiende hasta una profundidad de cuando menos 3.5 veces el ancho del cajón, es decir, hasta 12 metros de profundidad.

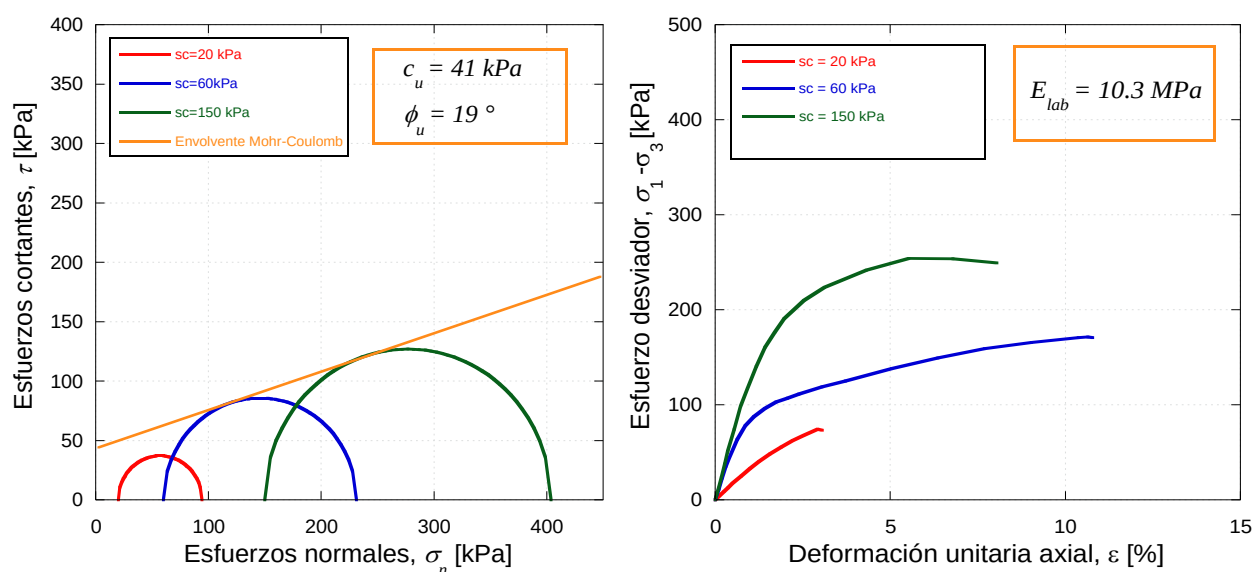


Figura 3.6 Prueba de compresión triaxial tipo UU, PCA-1 TS-01

Por otra parte, es importante destacar que durante los trabajos de exploración geotécnica no se detectó la presencia de nivel de aguas freáticas directamente. Sin embargo, se sabe que regionalmente el nivel de aguas freáticas en esta parte de la ciudad se encuentra en los primeros 5 metros de profundidad. Por tal razón, para el diseño geotécnico de la cimentación se asumió como nivel de aguas freáticas (NAF) la profundidad máxima de exploración, es decir, 3.10 metros respecto a la superficie vial.

Así pues, el modelo geotécnico propuesto para la estación del MB Zapata se presenta a continuación en la Tabla 3.1, y se ilustra en la Figura 3.7.

Tabla 3.1 Modelo geotécnico propuesto para la estación de MB Zapata

Unidad	Prof. [m]		Descripción	ω [%]	SUCS	γ [kN/m³]	VRS [%]	c [kPa]	ϕ [°]	E [MPa]	e -	OCR -	C_c -	C_s -
	De:	A:												
UE-1	0.20	0.35	Estructura de pavimento: arena limosa con gravas	9-15	SM, SC	20.2	65-95	5-10	35-42	35-75	No aplica			
UE-2	0.35	1.25	Relleno no controlado; se detectaron residuos de mampostería			16.0	No aplica							
UE-3	1.25	12.00	Arena limosa de compactación media	29	CL, SM	14.3	-	41	19	11.3	0.9-2.3	1.4-2.5	0.10-0.39	0.02-0.06

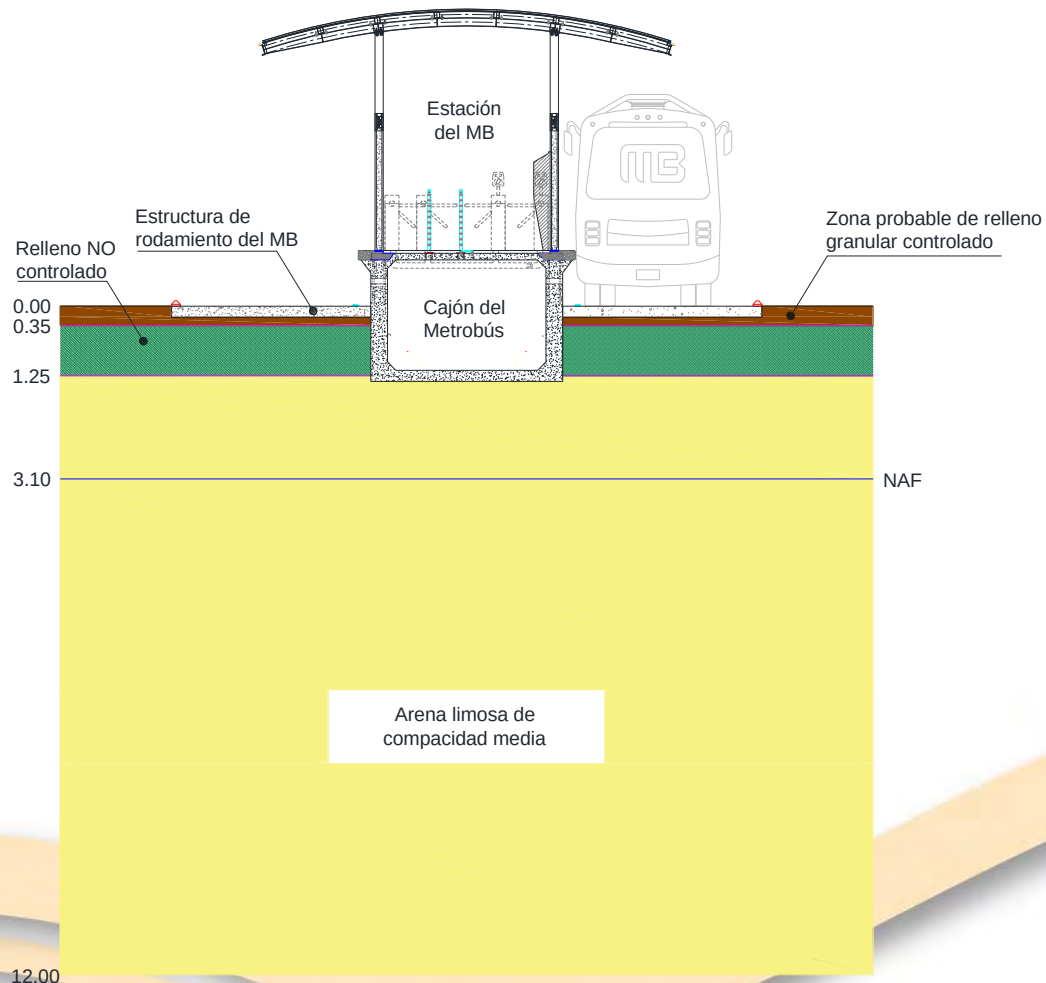


Figura 3.7 Modelo geotécnico propuesto para la estación del MB Zapata

4 ANÁLISIS GEOTÉCNICOS

4.1 Cargas a nivel de la cimentación e hipótesis de análisis

Al momento de la realización del presente informe se desconocen las cargas que incidirán a nivel de la cimentación para las diferentes combinaciones de diseño; por tal razón, a continuación, se presenta un análisis general de capacidad de carga para el caso de un cajón de cimentación desplantado a 1.3 m de profundidad, asimismo se presenta un análisis de sensibilidad de asentamientos, tanto a corto como a largo plazo, para diferentes niveles de carga.

Debido a lo anterior, se enfatiza que los valores de capacidad de carga que a continuación se presentan no toman en cuenta cargas horizontales, inclinadas o momentos de volteo. Estas condiciones deberán evaluarse en la fase de diseño definitivo de la cimentación, en concomitancia con los niveles reales de carga que demanden las estructuras a nivel de la cimentación, así como los niveles de desplazamiento permisibles. En el Anexo D se presentan las memorias de cálculo de los estados límites de falla y de servicio.

4.2 Propuesta para la cimentación de las estructuras

Debido a las condiciones estratigráficas, al sistema de estructuración de la estación del MB Zapata y a las características de resistencia y deformabilidad del depósito de suelo, se evaluó la alternativa de cimentación siguiente:

- **Cajón de cimentación** desplantado a una profundidad mínima de 1.3 metros. Esta profundidad se asumió debido al estrato de relleno no controlado que se detectó entre 0.35 y 1.25 metros.
- Sin embargo, también será aceptable desplantar el cajón a una profundidad de 0.8 m, siempre y cuando se sustituya el material que se encuentra entre 0.8 y 1.25 metros por materiales granulares con calidad de subrasante o superior, tal y como se indica en la Figura 4.1.

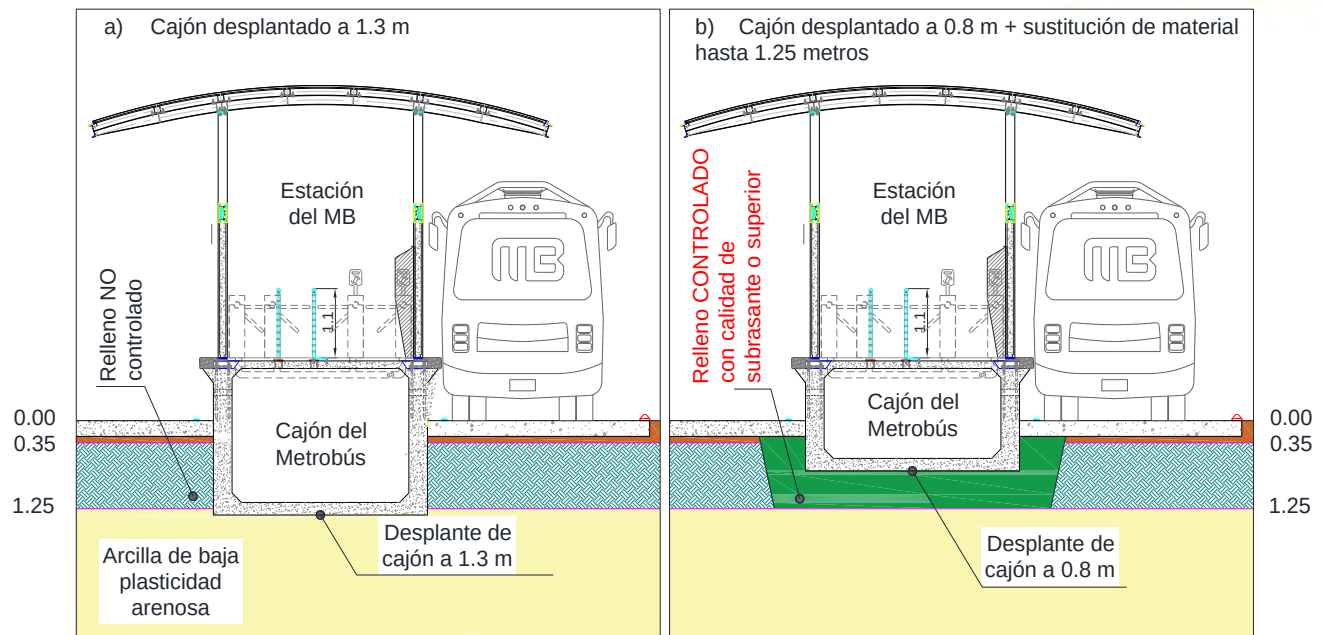


Figura 4.1 Propuesta general de desplante para el cajón de cimentación de la estación del MB Zapata

4.3 Hipótesis de análisis

Los análisis de comportamiento geotécnico del cajón de cimentación del Metrobús se hicieron tomando en cuenta las hipótesis de análisis siguientes:

- El análisis de capacidad de carga del cajón del Metrobús se estimó con base en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Cimentaciones publicadas en la Gaceta Oficial de la Ciudad de México en diciembre de 2017. Asimismo, se tomó en cuenta el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal publicado en la misma fecha.
- El cajón de cimentación del Metrobús se clasificó como perteneciente al subgrupo A1, puesto que es una estructura que requiere mantenerse en operación aún después de un sismo de magnitud importante.
- El cajón del Metrobús se desplantará sobre el terreno natural (UE-3: Arcilla de baja plasticidad arenosa) o bien sobre un relleno antrópico controlado de composición principalmente granular, de compacidad muy densa y con calidad de subrasante o superior.

- La capacidad de carga del cajón del Metrobús está dada por los parámetros de resistencia del terreno natural (UE-3), aún y cuando, eventualmente, el cajón se desplantase sobre un relleno controlado con calidad de subrasante.
- En el caso de la verificación de los niveles de servicio, se consideró que, al encontrarse la estación del MB Zapata dentro de la Zona II (transición), y tomando en cuenta que se trata de una estructura colindante, el diseño geotécnico se encamino a garantizar que el asentamiento o emersión máxima de la estructura siempre se mantenga por debajo de los 150 mm (15 cm), tal y como se señala en la Tabla 3.1.1 de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones (2017).
- Asimismo, para la verificación de los niveles de servicio se evaluaron diferentes niveles de carga viva media, desde 5 hasta 50 kPa (0.5 a 5 t/m²).

4.4 Revisión de los estados límite de falla (NTC-DC, 2017)

Se realizó la revisión general de los estados límite de falla de acuerdo con el Reglamento de Construcciones del Distrito Federal (RCDF) y sus Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones (NTC-DC, 2017). Se consideró un comportamiento puramente cohesivo del suelo para la evaluación de la capacidad de carga dada por la ecuación que se indica a continuación (Ecuación 3.3.2 del RCDF-NTC-DC):

$$r = [c_u N_c] F_R + p_v \quad \text{Ecuación 4.1}$$

donde:

- r es la capacidad de carga unitaria reducida (es decir afectada por el factor de resistencia correspondiente) de la cimentación
 p_v es la presión vertical total a la profundidad de desplante
 N_c coeficiente de capacidad de carga, el cual está dado por la expresión siguiente:

$$N_c = 5.14 \left(1 + 0.25 \frac{D_f}{B} + 0.25 \frac{B}{L} \right) \quad \text{Ecuación 4.2}$$

- F_R es el factor de reducción de resistencia que depende del tipo de suelo, tipo de cimentación y de la ubicación geotécnica. Se tomó igual 0.65 por tratarse de un cajón de cimentación desplantado en la Zona de Transición
 D_f profundidad de desplante
 B es el ancho del cimientto
 L es la longitud del cimientto

Los resultados de la revisión se muestran en la Tabla 4.1, en donde destaca que la capacidad de carga reducida de acuerdo con las NTC-DC (2017) es igual a 202 kPa (20.2 t/m²).

Tabla 4.1. Verificación del estado límite de falla de acuerdo con el NTC-DC (2017)

Cimentación	Capacidad de carga unitaria reducida, r [kPa]
Cajón desplantado a 1.3 m de profundidad	202 (20.2 t/m ²)

4.5 Revisión de los estados límite de servicio (RCCDMX, 2017)

La revisión de estado límite de servicio del cajón de cimentación de la estación Zapata del MB se efectuó con el objetivo de estimar los posibles asentamientos producto del nivel de cargas aplicado, para lo cual se tomaron en cuenta las consideraciones siguientes:

- Se considera la ocurrencia de asentamientos por deformación elástica de los materiales de desplante debidos a la presión de contacto ejercida por la cimentación.
- Debido a que la posición del nivel de aguas freáticas (NAF) se asumió igual a 3.1 metros y a que el cajón se desplantará en un depósito conformado por una arcilla de baja plasticidad arenosa (UG-3), se consideró que se presentarán asentamientos asociados con el efecto del fenómeno de consolidación.
- Con base en el RCDF (2017), los desplazamientos verticales permisibles para la estación del MB Zapata se deben mantener por debajo de los 15 cm, pues el cajón se desplantará en la zona geotécnica conocida como Transición.
- La deformación elástica del subsuelo se consideró a partir del nivel de desplante de la cimentación.
- Para la verificación de los niveles de servicio se evaluaron diferentes niveles de carga viva media, desde 5 hasta 50 kPa (0.5 a 5 t/m²).

En términos generales, la presión asociada con el desplazamiento permisible se estimó con la aplicación de la Ecuación 4.3. En particular se asumió que los desplazamientos por el efecto de consolidación se presentarán en la UG-3.

$$\delta_{perm} = \frac{q_{desp}}{\sum v_i \left(\frac{1 - v_i^2}{E_i} + m_{v,i} \right) \int_{z_{i-1}}^{z_i} w(z, B) dz} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

dónde:

δ_{perm} = desplazamiento, que deberá ser igual o menor que 15 cm (asentamiento permisible)

q_{desp} = presión asociada al desplazamiento permisible

E_i = módulo de deformación no drenado del estrato i .

$m_{v,i}$ = índice de compresibilidad volumétrica del estrato i

ν_i = relación de Poisson del estrato i

q = presión en el cimiento

El término de la integral representa la distribución de esfuerzos definida mediante la solución de Boussinesq

Al aplicar la Ecuación 4.3 para las condiciones particulares del cajón de cimentación de la estación del MB Zapata, y considerando una carga viva media menor que 50 kPa, se obtiene un asentamiento a largo plazo menor que 2.5 cm en todos los casos analizados, en estas condiciones de carga el cajón cumpliría cabalmente con los estados límites de servicio. Estos resultados se resumen en la Figura 4.2.

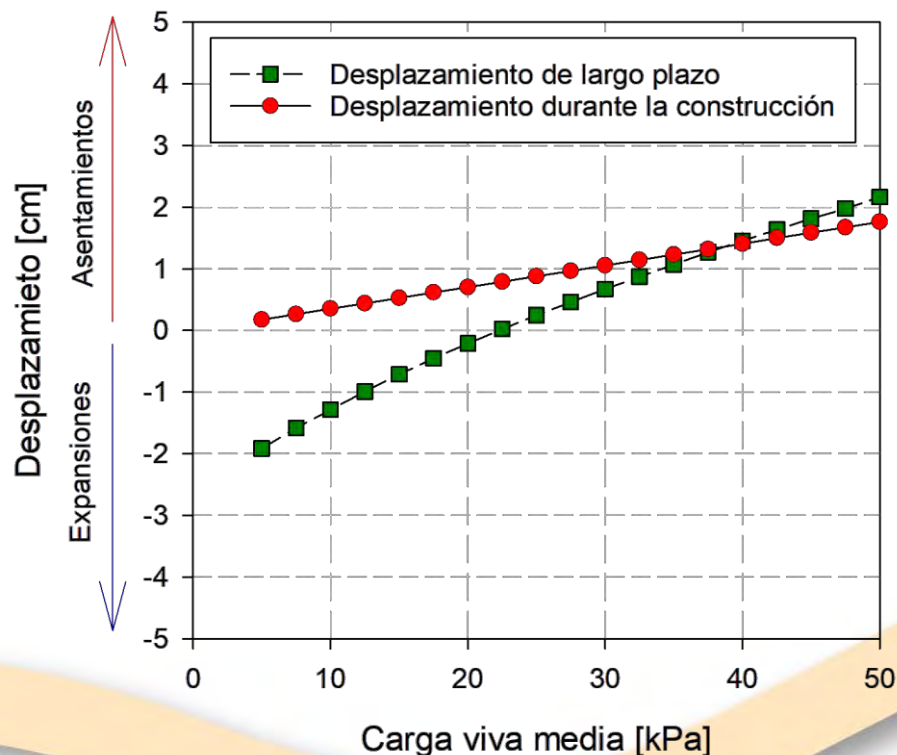


Figura 4.2 Desplazamientos generados para el cajón de cimentación de la estación del MB Zapata para diferentes valores de carga viva media

4.6 Módulos de reacción verticales

Los módulos de reacción verticales (k_s) ante carga de compresión, del cajón de cimentación inicialmente se estimaron con base en la expresión siguiente:

$$k_s = \frac{q}{\delta} \quad \text{Ecuación 4.4}$$

dónde:

q = presión de contacto incidente en el cimiento
 δ = asentamiento total del cimiento

Los módulos de reacción verticales al centro del cajón de cimentación de la estación Zapata son del orden de 2829.5 y 1280.6 kPa/m para condiciones de corto (construcción) y largo plazo (consolidación), respectivamente. En la Figura 4.3 se ilustra la variación de los módulos de reacción para diferentes niveles de carga incidente en el cajón de cimentación de la estación Zapata.

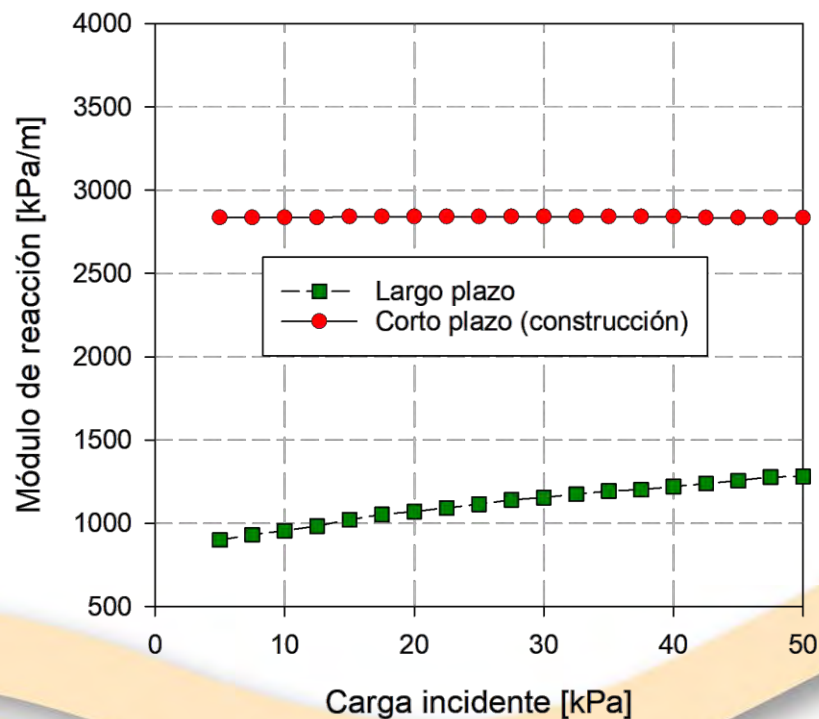


Figura 4.3 Módulos de reacción para el cajón de cimentación de la estación del MB Zapata para diferentes niveles de cargas incidentes

5 RECOMENDACIONES PARA LOS PROCESOS CONSTRUCTIVOS

Tomando en cuenta las características del subsuelo y los resultados obtenidos durante los trabajos de campo, laboratorio y gabinete, a continuación se describen las recomendaciones generales para los procesos constructivos del cajón de cimentación de la estación del Metrobús Zapata. Estas recomendaciones son las mínimas que se deben cumplir, pero de ningún modo tienen un carácter limitativo.

- **El cajón de cimentación** deberá estar desplantado a una profundidad mínima de 1.3 metros. Sin embargo, también será aceptable desplantar el cajón a una profundidad de 0.8 m, siempre y cuando se sustituya el material que se encuentra entre 0.8 y 1.3 metros por materiales granulares con calidad de subrasante o superior, tal y como se indica en la Figura 4.1 de la sección anterior.
- Se deberá ratificar que al nivel de desplante del cajón de cimentación del Metrobús no se tiene la presencia de estructuras subterráneas que pudiesen afectar el comportamiento del cajón, esto podrá realizarse con base en los resultados de los estudios geofísicos del proyecto.
- Los PCA realizados permitieron dilucidar que un relleno no controlado entre 0.35 y 1.25 metros de profundidad. Sin embargo, si durante la apertura de la trinchera para alojar el cajón se presentará que el espesor de estos materiales es superior al detectado en los PCA realizados, éstos deberán ser sustituidos por materiales granulares con calidad de subrasante o superior.
- La zanja donde se alojará la cimentación deberá tener el ancho y la profundidad indicados en el proyecto definitivo, se deberá garantizar que el desplante quede a una profundidad de cuando menos 0.8 m.
- Las excavaciones para la construcción de cimentaciones superficiales podrán ser verticales siempre y cuando no excedan 1.5 metros de profundidad y no se detecten materiales sueltos durante la excavación.
- Una vez que se realice la excavación del cajón de cimentación, deberá verificarse que el suelo de desplante no ha sufrido alteraciones por el proceso constructivo.
- En caso de ser necesario, el material que se colocará para rellenar la zanja del cajón deberá ser controlado, con calidad mínima de terraplén, y su compactación se realizará en capas de 20 cm de espesor máximo en estado suelto con el contenido de agua óptimo (+ 2% determinado en las pruebas de laboratorio que realice el área de control de calidad durante la construcción de la obra) y el número de pasadas del equipo de compactación necesarios.

- El material producto de la excavación, en ningún caso debe estar a menos de 2.0 m de distancia de la orilla de la zanja. Asimismo, este material no debe tener taludes mayores a 45° con respecto de la horizontal.

6 CONCLUSIONES

En este informe se presenta el marco geotécnico general de la estación Zapata, misma que forma parte del proyecto de ampliación de la Línea 3 del Metrobús. Asimismo, se da cuenta de la información geotécnica regional, de los trabajos de campo y laboratorio que se ejecutaron, del modelo geotécnico integrado y los resultados del análisis geotécnico de capacidad de carga con base en las NTC-DC (2017). A partir de lo cual se emiten las siguientes conclusiones:

- De acuerdo con la zonificación geotécnica del RCDF (2017), la estación del Metrobús Zapata se localiza dentro de la Zona II (Transición).
- La velocidad de hundimiento regional en la zona donde se construirá la estación Zapata es prácticamente nula (II-UNAM, 2010); por tanto, este fenómeno no tendrá un impacto en el comportamiento de la cimentación de la estación del Metrobús.
- El espectro de diseño sísmico transparente se determinó con base en lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo actualmente vigentes en la Ciudad de México (NTC-2017). La estación Zapata se clasifica como perteneciente al subgrupo A1, pues deberá mantenerse en operación ante la eventual ocurrencia de un evento sísmico de intensidad importante.
- Con base en el Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID), al espectro de diseño le corresponde un coeficiente sísmico de la meseta espectral (c_s) igual a 0.500 g y una aceleración pico del terreno (a_0) 0.138 g.
- En las inmediaciones de la estación Zapata, de manera puntual, no se tienen reportes de agrietamientos o lineamientos inferidos por parte del Atlas de riesgos de la Ciudad de México; sin embargo, dicha estación se encuentra a 510 metros de un posible lineamiento geológico, en donde se han registrado eventos sísmicos con magnitud menor que 3. Esta información, que es de carácter indicativo, deberá ratificarse con los resultados que se obtengan del Estudio Geofísico de la Ampliación de la Línea 3 del Metrobús que CEMEX actualmente está realizando.
- Se analizó un cajón de 3.4 m de ancho, desplantado a una profundidad de 1.3 m; obteniéndose una capacidad de carga reducida de acuerdo con las NTC-DC (2017) igual a 202 kPa (20.2 t/m²).
- Para la evaluación de los estados límite de servicio, se evaluaron diferentes niveles de carga incidentes en el cajón de cimentación, desde 5 hasta 50 kPa (0.5 a 5 t/m²). En todos los casos los desplazamientos máximos están por debajo de los 2.5 cm, denotando con ello que el cajón de cimentación, en las condiciones analizadas,



cumpliría a cabalidad con los estados límite de servicio establecidos en las NTC-DC (2017).

Finalmente, se hace notar que la información y recomendaciones generales que aparecen en el presente informe son responsabilidad de DICIMSA; sin embargo, ésta no se hace responsable del uso que de ella hagan las empresas que participen en la fase de ingeniería de detalle o en la construcción del proyecto.

REFERENCIAS

1. **INEGI (2018)**. Biblioteca digital de mapas. Ags. México. <http://inegi.org.mx/app/mapas/>
2. **CEMEX (2019)**. Ampliación del Metrobús Línea 3, longitud 4.27 km, seis estaciones y una terminal, Eje 1 Pte., de Av. Xola a Bruno Traven [PDF]. Marzo 2019.
3. **ASTM D2216-10**. Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.
4. **ASTM D 2488-17**. Standard Practice for Description and Identification of soils (Visual – Manual Procedure).
5. **ASTM D422-07**. Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
6. **ASTM D698-12**. Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort.
7. **ASTM D1883-16**. Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils.
8. **ASTM D2850-15**. Standard Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.
9. **ASTM D2487-11**- Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System).
10. **Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2018)**. Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal. Ciudad de México.
11. **Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2017)**. Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Cimentaciones. Ciudad de México.
12. **Carrillo, N. (1948)**. Influence of artesian wells on the sinking of Mexico City. In Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics. Holland.
13. **Marsal, R. J., y Mazari, M. (1959)**. The subsoil of Mexico City, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
14. **Marsal, R.J. (1992)**. Hundimiento de la Ciudad de México, El Colegio Nacional, México.

15. **Lesser, J. M. (1998).** El hundimiento del terreno en la Ciudad de México y sus implicaciones en el Sistema de drenaje. Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XIII.
16. **Santoyo, et al. (2005).** Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México.
17. **Gaceta Oficial de la Ciudad de México (2017).** Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo. Ciudad de México.
18. **Ley de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil de la Ciudad de México,** Ciudad de México, México, 5 de junio de 2019.
19. **Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (2019).** Atlas de Riesgos de la Ciudad de México. Ciudad de México. <http://atlas.cdmx.gob.mx>
20. **Centro Nacional de Prevención de desastres (CENAPRED 2018).** Atlas Nacional de Riesgos. Ciudad de México. <http://atlasnacionalderiesgos.gob.mx>
21. **Tan, C, K., Duncan, J., Rojiani, K., and Baker, R. (1991).** Engineering Manual for Shallow Foundations. Prepared for NCHRP Project 24-4, Charles E. Via, Jr. Department of Civil Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University.
22. **Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (2016).** Determinación experimental de la relación existente entre el índice de compresión de las arcillas del Ex Lago de Texcoco y sus propiedades índice. Ciudad de México, México.
23. **Bowles, Joseph E. (1968).** Foundation Analysis and design. McGraw Hill.
24. **Budhu, M. (2008).** Foundation and earth retaining structures, John Wiley & Sons, Arizona.



Elaboró:

Ing. Christian Juárez Estrada

Revisó

M. en I. José Ramón Cruz Águila

Aprobó

M. en I. José María Reyes
Mariano

Av. Dr. José Ma. Vértiz no. 1097
Col. Vértiz Narvarte, Del. Benito Juárez
México, D.F. C.P. 03600
Tel.: (55) 4753 3568

contacto@dicimsa.com
www.dicimsa.com





ANEXO A

REPORTES DE EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA



PROYECTO:

Ampliación del Metrobús Línea 3, longitud 4.27 km, seis estaciones y una terminal, Eje 1 Pte., de Av. Xola a Bruno Traven

LOCALIZACIÓN:

Estación Zapata

PCA
01

FECHA DE MUESTREO:

07/10/2019

COORDENADAS UTM:

X=483049 Y=2141745

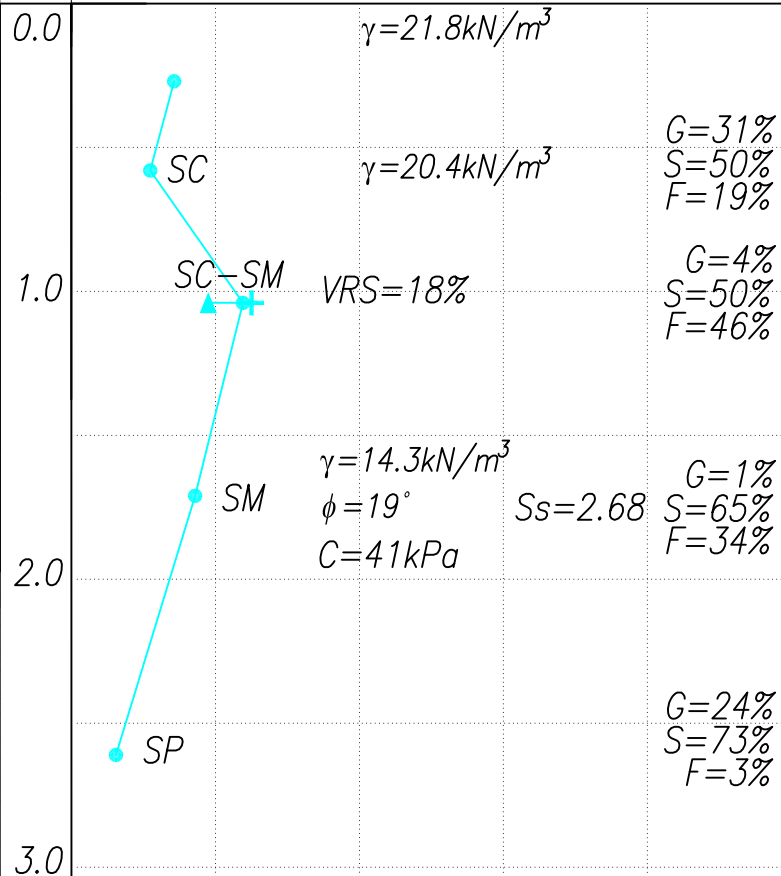
DESCRIPCIÓN GEOTÉCNICA DEL MATERIAL

Carpeta asfáltica	0.19 m	
Relleno compuesto por limo con arena y gravas	0.35 m	
Relleno compuesto por arena arcillosa con grava (SC), color café	0.81 m	
Relleno compuesto por arena limosa arcillosa (SC-SM) color café	1.26 m	
Arena limosa (SM) color café	TS	
	2.16 m	
Arena mal graduada con grava (SP), color café	TS	
	3.06 m	
Fin del PCA 01: 3.06 m		

PROF. m

● CONTENIDO DE AGUA $w\%$
▲ LÍMITE PLÁSTICO $LP\%$
+ LÍMITE LÍQUIDO $LL\%$

20 40 60 80%



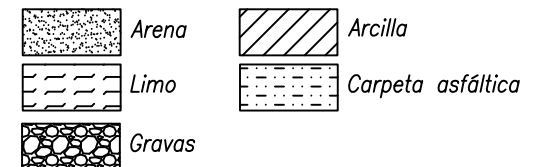
OBSERVACIONES



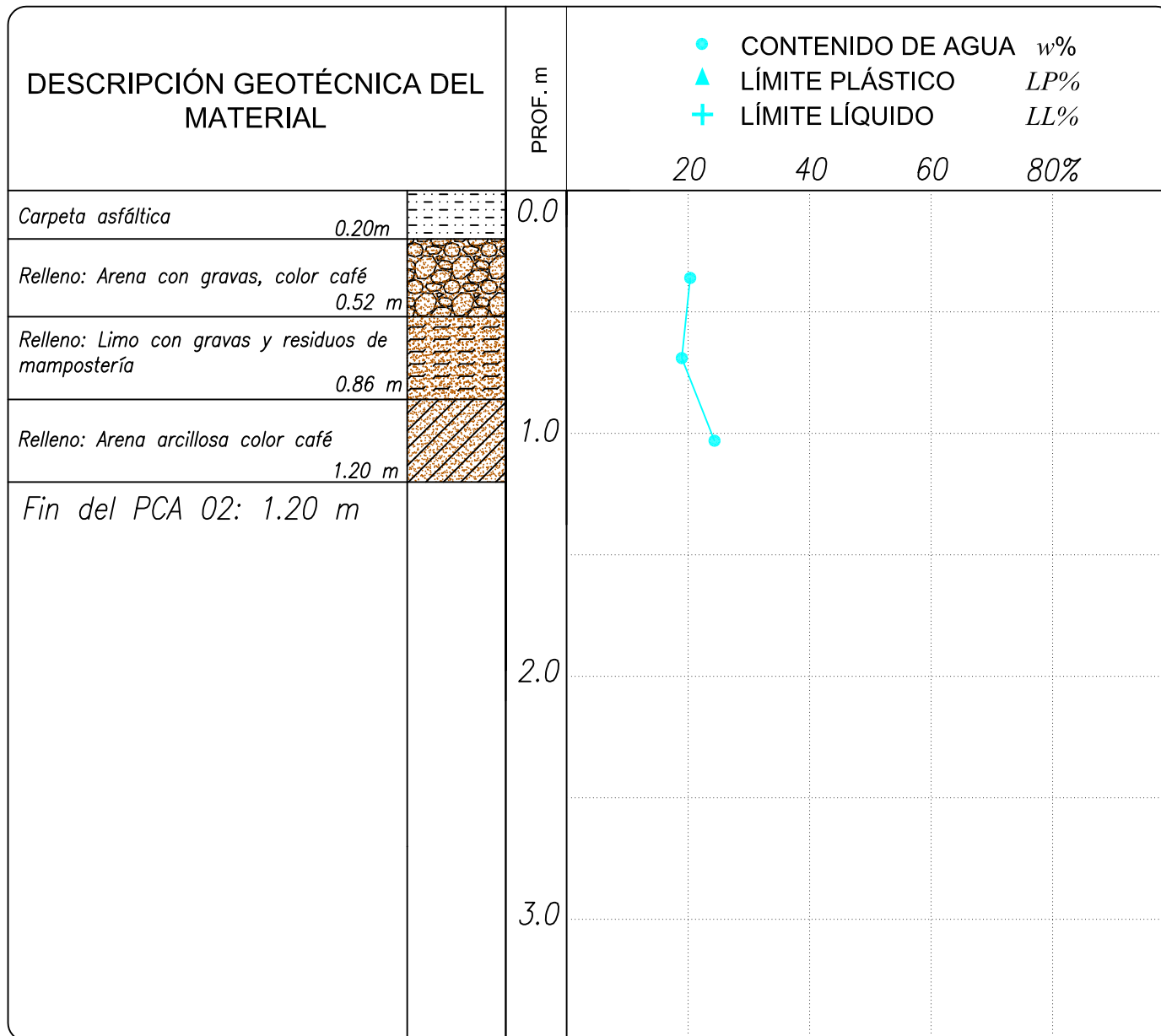
NOTA:

No se detectó presencia de NAF

Simbología



PROYECTO: Ampliación del Metrobús Línea 3, longitud 4.27 km, seis estaciones y una terminal, Eje 1 Pte., de Av. Xola a Bruno Traven			
LOCALIZACIÓN: Estación Zapata	PCA	FECHA DE MUESTREO:	COORDENADAS UTM:
	02	07/10/2019	X=483054 Y=2141772

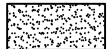
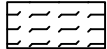
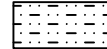


OBSERVACIONES



NOTA:
No se detectó presencia de NAF

Simbología

	Arena		Arcilla
	Limo		Carpeta asfáltica
	Gravas		



FECHA DE TERMINACIÓN: 07-oct-19

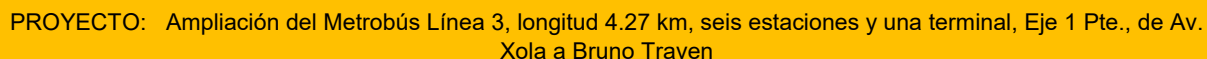
OBSERVACIONES:	PROF. DE PROYECTO:	-	PROF. REAL:	-
	ADEME:	N/A	N. A. F.:	N/A



ANEXO B

RESULTADOS DE LABORATORIO



[illegible]

Donde:

LL [%]	Límite líquido	G [%]	Gravas	γ [kN/m ³]	Peso volumétrico natural	e	Relación de vacíos
LP [%]	Límite plástico	S [%]	Arenas	c_u [kPa]	Resistencia no drenada al esfuerzo cortante	$\gamma_{d,max}$ [kN/m ³]	Peso volumétrico seco máximo
IP [%]	Índice de plasticidad	F [%]	Finos	ϕ_u [°]	Ángulo de fricción interna	W_{opt} [%]	Contenido de agua óptimo
w [%]	Contenido de agua			E_{50} [MPa]	Módulo de elasticidad al 50% del esfuerzo de falla	VRS [%]	Valor Relativo de Soporte

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos





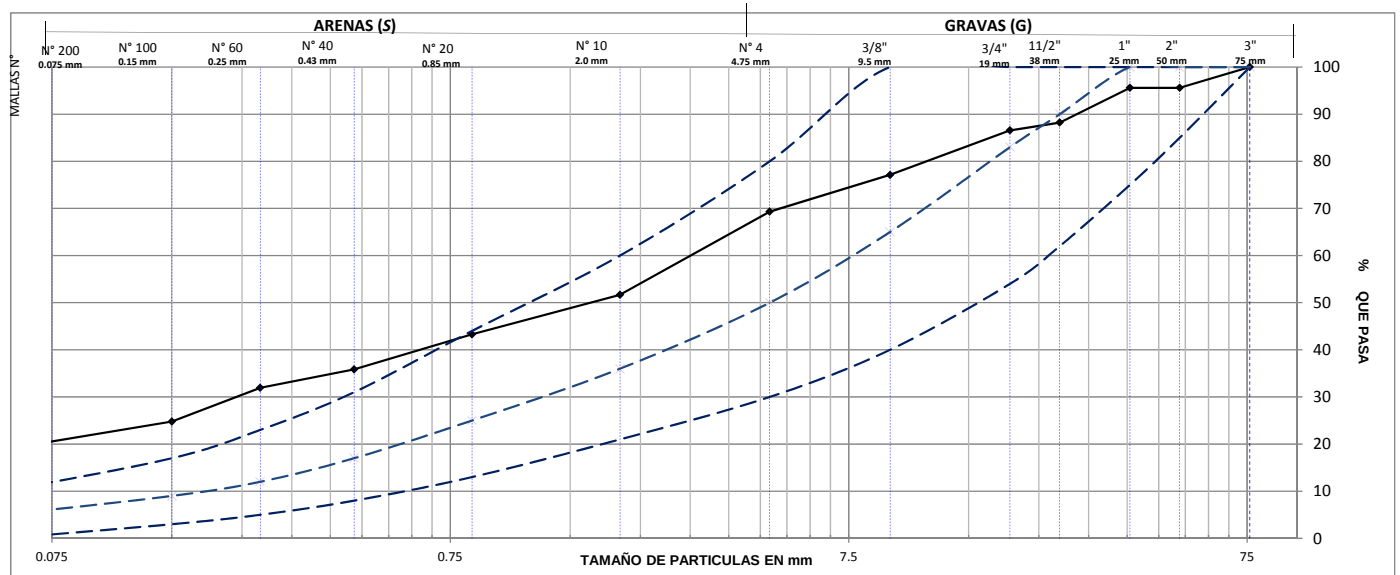
Reporte de Análisis Granulométrico

M-MMP-1-06/03

Cliete :	CEMEX	Capa :	Costal 2
Obra :	Ampliación Línea 3 del Metrobús	Fecha de muestreo:	8 de octubre de 2019
Ubicación :	Estación Zapta	Fecha de prueba :	14 de octubre de 2019
Sondeo :	PCA-01	Laboratorista :	Germán Aguilar Ramírez
Profundidad :	0.35-0.81 m		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Peso Total de la Muestra :	7878.00 (g)	Fracción Retenida en Malla N°4 :	2927.85 (g)
Fracción que Pasa la Malla N°4 :	4950.15 (g)	Peso Corregido por Humedad :	0.00 (g)
Material más Fino que la Malla (0.075 mm)	Peso Tara (g) 0.00	Peso Mat. + Tara (g)	Peso de muestra de material fino: 585.78
	P. Mat. Ret + Tara 159.60	P. Mat. Retenido (g) 159.60	Pérdida por Lavado (%) 0.73
MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA N° 4			
Malla N°	Peso Retenido (g)	Retenido Parcial %	Material que Pasa (%)
76.2 mm (3")	510.75	6.48	51.68
50.8 mm (2")	346.35	4.40	43.29
38.1 mm (1 1/2")	0.00	0.00	35.85
25.4 mm (1")	580.75	7.37	31.95
19.05 mm (3/4")	132.37	1.68	24.79
9.525 mm (3/8")	744.42	9.45	18.89
4.75 mm N°4	613.21	7.78	
Pasa 4.75 mm N°4	4950.15	62.84	
Sumas	7878.00	100.00	
Peso Total de la Muestra	7878.00		
MATERIAL QUE PASA EN LA MALLA N° 4			
Malla N°	Peso Retenido (g)	Retenido Parcial (%)	Material que Pasa (%)
2.0 mm N°10	149.04	17.64	51.68
0.85 mm N°20	70.93	8.39	43.29
0.43 mm N°40	62.85	7.44	35.85
0.25 mm N°60	33.00	3.91	31.95
0.15 mm N°100	60.49	7.16	24.79
0.075 mm N°200	49.87	5.90	18.89
Pasa 0.075 mm N°200	159.60	18.89	
Sumas	585.78	69.32	
Análisis Efectuado con :	585.78		



$$D_{10} = 0.00$$

$$D_{30} = 0.11$$

$$D_{60} = 3.00$$

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} = N/A$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = N/A$$

RETENIDO EN %

3"	6.48
G	30.68
S	50.43
F	18.89
%	106.48

SUCS:

SC

Laboratorista	Elaboró	Revisó
Germán Aguilar Ramírez	Ana Paola Ramírez Delgado	Adrián Iván Cázares Acosta

[illegible]



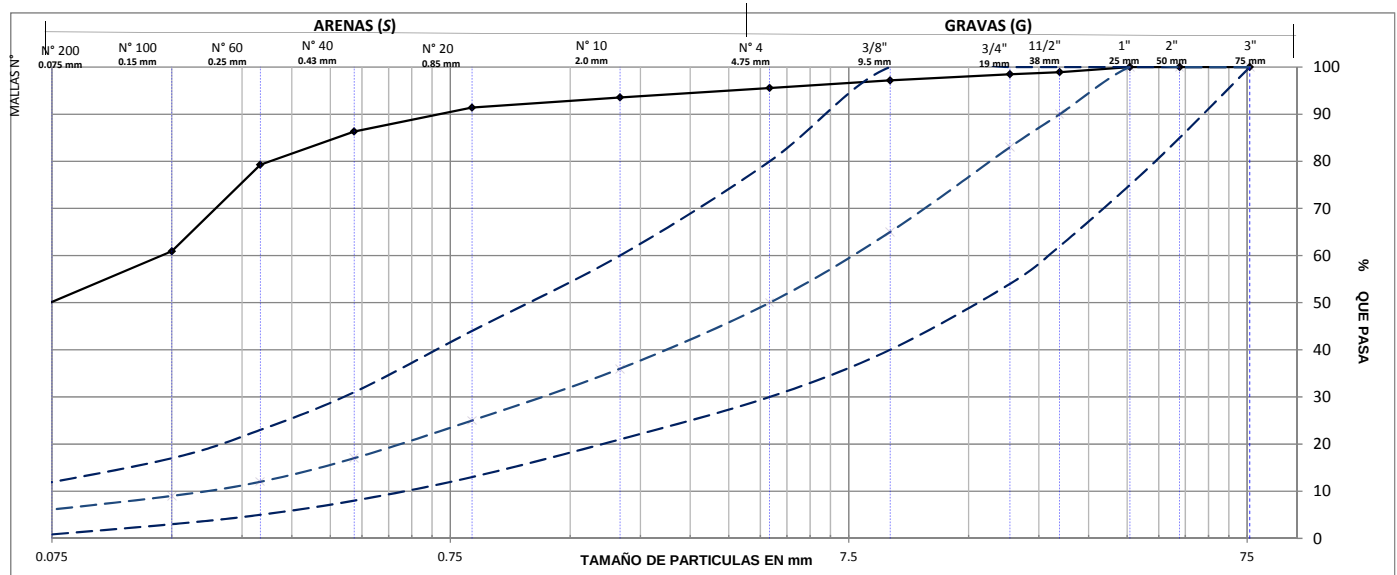
Reporte de Análisis Granulométrico

M-MMP-1-06/03

Cliente :	CEMEX	Capa :	Costal 3
Obra :	Ampliación Línea 3 del Metrobús	Fecha de muestreo:	8 de octubre de 2019
Ubicación :	Estación Zapata	Fecha de prueba :	14 de octubre de 2019
Sondeo :	PCA-01	Laboratorista :	Germán Aguilar Ramírez
Profundidad :	0.81-1.20 m		

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Peso Total de la Muestra :		4081.00	(g)	Fracción Retenida en Malla N°4 :		181.65	(g)
Fracción que Pasa la Malla N°4 :		3899.35	(g)	Peso Corregido por Humedad :		0.00	(g)
Material más Fino que la Malla (0.075 mm)	Peso Tara (g)	0.00	Peso Mat. + Tara (g)	Peso de muestra de material fino:		512.47	
		P. Mat. Ret + Tara	246.11	P. Mat. Retenido (g)	246.11	Pérdida por Lavado (%)	0.52
MATERIAL RETENIDO EN LA MALLA N° 4				MATERIAL QUE PASA EN LA MALLA N° 4			
Malla N°	Peso Retenido (g)	Retenido Parcial %	Material que Pasa %	Malla N°	Peso Retenido (g)	Retenido Parcial (%)	Material que Pasa (%)
							95.55
76.2 mm (3")	0.00	0.00	100.00	2.0 mm N°10	10.73	2.00	93.55
50.8 mm (2")	0.00	0.00	100.00	0.85 mm N°20	11.53	2.15	91.40
38.1 mm (1 1/2")	0.00	0.00	100.00	0.43 mm N°40	27.19	5.07	86.33
25.4 mm (1")	43.57	1.07	98.93	0.25 mm N°60	37.87	7.06	79.27
19.05 mm (3/4")	17.90	0.44	98.49	0.15 mm N°100	98.51	18.37	60.90
9.525 mm (3/8")	53.77	1.32	97.18	0.075 mm N°200	80.53	15.01	45.89
4.75 mm N°4	66.41	1.63	95.55	Pasa 0.075 mm N°200	246.11	45.89	
Pasa 4.75 mm N°4	3899.35	95.55		Sumas	512.47	95.55	
Sumas	4081.00	100.00		Análisis Efectuado con :	512.47		
Peso Total de la Muestra	4081.00						



$$D_{10} = 0.00$$
$$D_{30} = 0.00$$
$$D_{60} = 0.16$$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = N/A$$
$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = N/A$$

RETENIDO EN %

$$3'' = 0.00$$
$$G = 4.45$$
$$S = 49.66$$
$$F = 45.89$$
$$\% = 100.00$$

SUCS:

SC-SM

Laboratorista	Elaboró	Revisó
Germán Aguilar Ramírez	Ana Paola Ramírez Delgado	Adrián Iván Cázarez Acosta

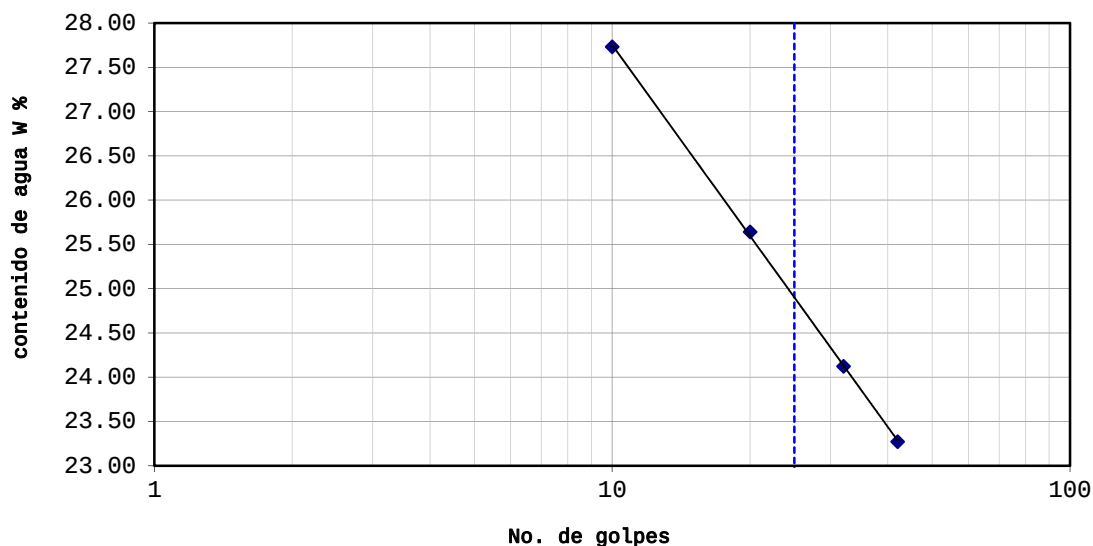
LÍMITES DE CONSISTENCIA



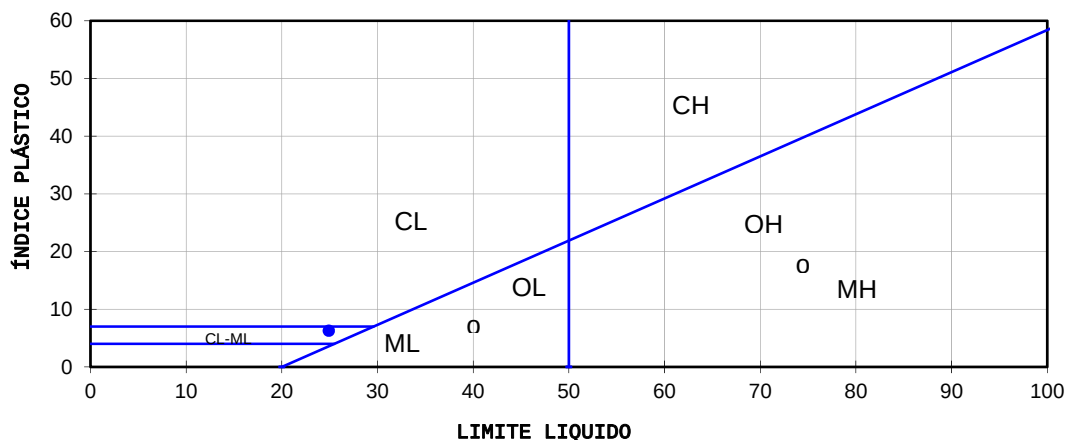
CLIENTE:	CEMEX
FECHA:	18-oct-19
PROYECTO:	Ampliación L3 MB

SONDEO:	PCA-1
MUESTRA:	Costal 3
PROF.	0.81-1.20 m

GRÁFICA DE LÍMITE LÍQUIDO



CARTA DE PLASTICIDAD



CLASIFICACIÓN S.U.C.S.

CL-ML

límite liquido % :	24.9
límite plastico % :	18.60
índice plastico % :	6.30

OBSERVACIONES

ARCILLA LIMOSA COLOR CAFÉ

MATERIAL CRIBADO POR LA

MALLA No 40

contracción lineal

N/A



Obra:	Ampliación de la Línea 3 del Metrobús
Ubicación:	Estación Zapata

[illegible]

COMPACTACIÓN

ASTM- D698-70 Y D1557-70
AASHTO T99-70 (ESTÁNDAR)

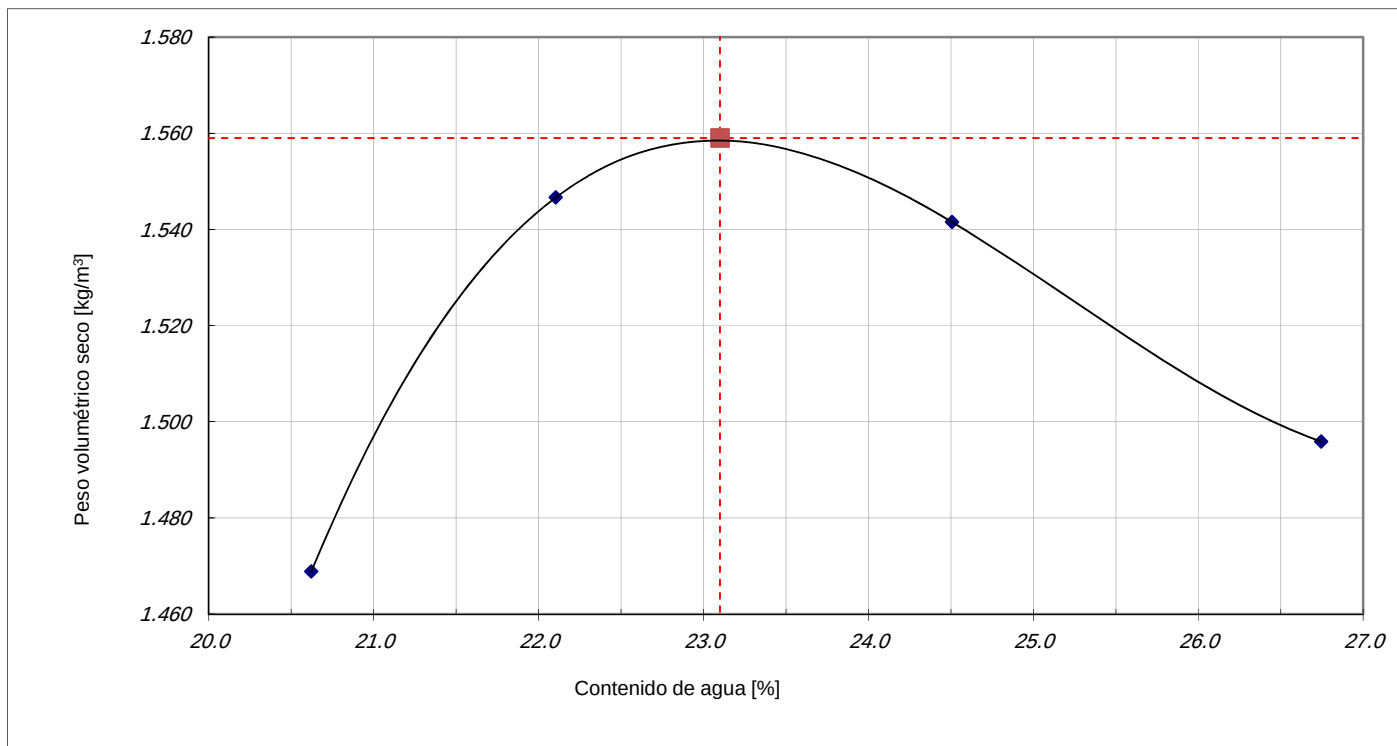
PROYECTO	Ampliación Línea 3 del Metrobús
LOCALIZACIÓN	Estación Zapata
BANCO	PCA-01
MUESTRA	Costal 3
PROF. (m)	0.81 - 1.20
FECHA	12/10/2019
OPERADOR	Germán Aguilar Ramírez

DIAM. MOLDE	VOL.MOLDE	PESO MOLDE	PESO MARTILLO	DIAM.MARTILLO	ALT.CAÍDA.	GOLPES/CAPA	CAPAS	ENERGÍA C.
cm	L	kg	kg	cm	cm	No	No	kg/cm ²
10.15	0.942	4.418	2.494	5.08	30.5	25	3	6.056

CONTENIDO DE AGUA

DATOS MOLDE

CAPSULA	PESO CAPS	WC+SH	WC + Ss	AGUA	WH + MOLDE	W H	WS	PESO VOL.S.
No	g	g	g	%	kg	kg	No	t/m ³
25	60.54	189.28	167.27	20.62	6.087	1.669	1.384	1.469
47	72.63	192.50	170.80	22.10	6.197	1.779	1.457	1.547
20	60.53	187.95	162.87	24.51	6.226	1.808	1.452	1.542
11	60.24	186.06	159.51	26.75	6.204	1.786	1.409	1.496



PESO VOLUMÉTRICO SECO MÁXIMO

CONTENIDO DE AGUA ÓPTIMO

1.559	t/m ³
23.1	w%

OBSERVACIONES.



VALOR RELATIVO DE SOPORTE (VRS)

(ASTM D1883-79)

Proyecto.: Ampliación L3 Metrobús	POZO: PCA-01	Operador: GAR Revisó: AICA	Descripción del suelo.: (SC-SM) ARENA LIMOSA ARCILLOSA COLOR CAFÉ
Localización: Estación Zapata	Muestra: Costal 3		
Fecha: 18-oct-2019	Prof: (m): 0.81-1.20		

Peso de la muestra.		Peso específico seco máximo. 1571 kg/m ³ Contenido de agua sat. 25.27 % Contenido de agua natural. N/A % Reproducción a.: 100 % Constante de calibración. 1
Cilindro.: 3	Natural 3	
W cil + W m = 9.418 kg	9.640 kg	
W cil = 4.741 kg	4.741 kg	
W m = 4.677 kg	4.899 kg	

Contenido de agua.		Energía Específ. de Compact. kg-cm/cm ³ 27.258
Al compactar		
Tara No. 19	338	
Tara + W h = 134.67 g	146.81 g	
Tara + W s = 121.73 g	120.55 g	
Agua w = W h - W s = 12.94 g	26.26 g	
Tara = 60.04 g	16.65 g	
W s = 61.69 g	103.9 g	
w = 20.98 %	25.27 %	

Datos del cilindro.		Resultados = w i = 20.98 % w sat. = 25.27 % γ h = 1901 kg/m ³ γ sat = 1991 kg/m ³ γ d = 1571 kg/m ³ CBR 1 = 0.0 % CBR 2 = 18.4 % δ / L = 0.68 %	Datos del cilindro saturado.	
Altura faltante = 0 cm			Altura faltante = 0 cm	
Peso = 4.741 kg			peso = 4.741 kg	
Altura = 12.71 cm			Altura = 12.71 cm	
Area = 193.59 cm ²			Area = 193.59 cm ²	
Volumen = 2460.53 cm ³		Volumen = 2460.53 cm ³		
Altura corregida. = 12.71 cm		Altura corregida = 12.71 cm		
Volumen corr. = 2460.53 cm ³		Volumen corregido. = 2460.53 cm ³		
Deformación al sat. = 0.0864 cm		Deformación al saturar (δ) = 0.0864 cm		

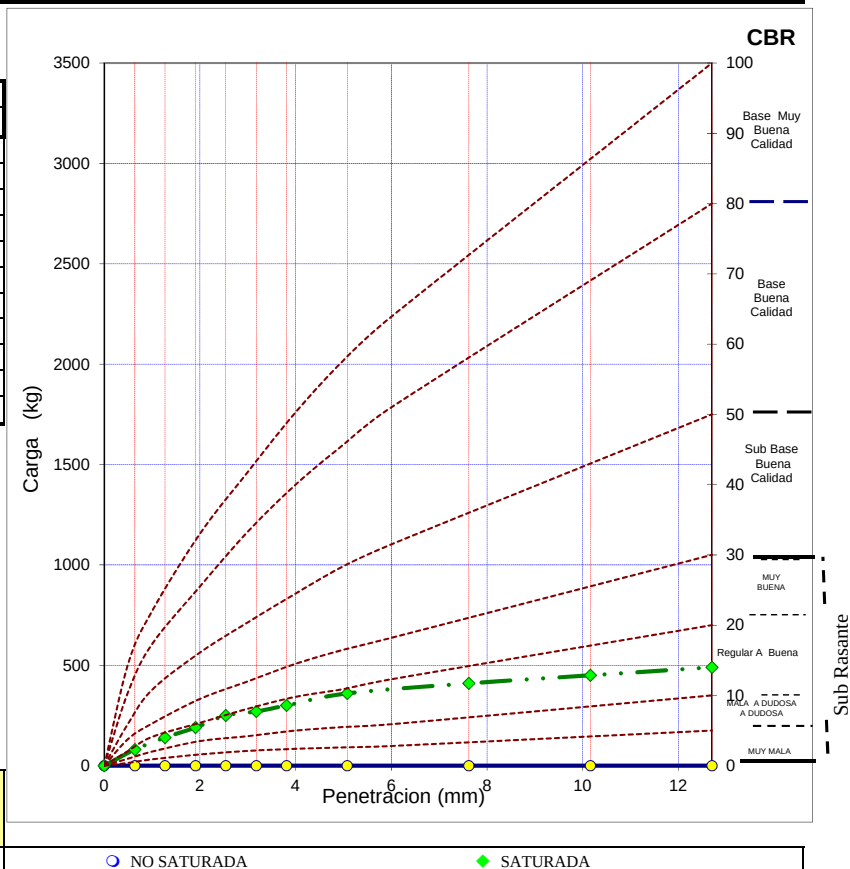
L. Inic. mm 3.000	L. Fin. mm 3.864
--------------------------	-------------------------

Resistencia a la penetración.

Hincado (mm)	Anillo (mm)	F (kg)	Hincado * (mm)	F * (kg)
0.00	0.000	0.0	0.000	0.0
0.64	0.000	0.0	80.000	80.0
1.27	0.000	0.0	140.000	140.0
1.91	0.000	0.0	190.000	190.0
2.54	0.000	0.0	250.000	250.0
3.18	0.000	0.0	270.000	270.0
3.81	0.000	0.0	300.000	300.0
5.08	0.000	0.0	360.000	360.0
7.62	0.000	0.0	410.000	410.0
10.16	0.000	0.0	450.000	450.0
12.70	0.000	0.0	490.000	490.0

* - SATURADA.

Observaciones:





PRUEBA TRIAXIAL U U

Proyecto: **AMPLIACIÓN L3 MB, ESTACIÓN ZAPATA**

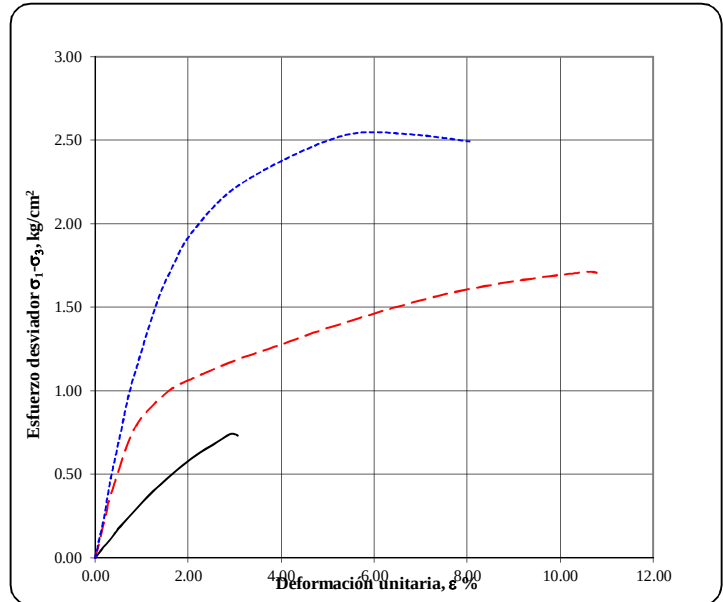
Realizó: **GAR**

Ing. de proyecto: **CJE**

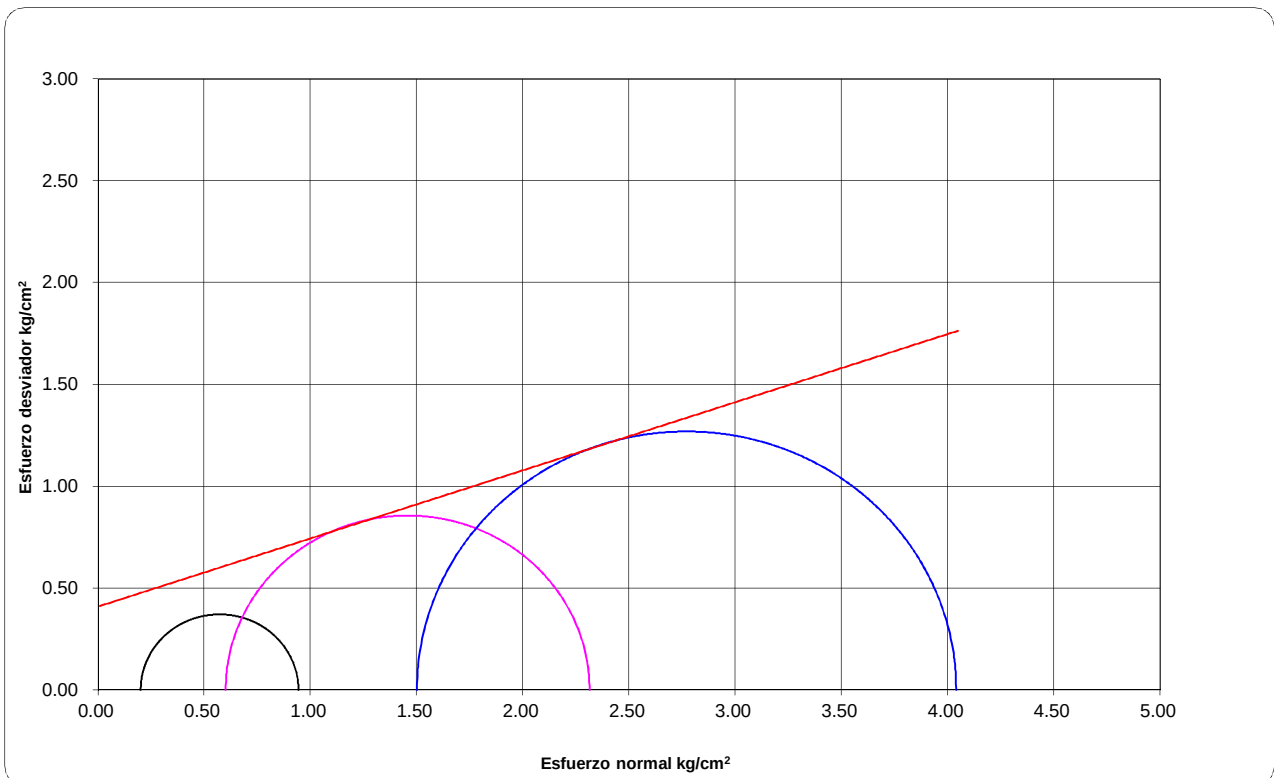
Fecha: **OCT 19**

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL			
(SM) ARENA LIMOSA COLOR CAFÉ OSCURO			

SÍMBOLO	σ_3 kg/cm ²	E_{50} kg/cm ²	NOTAS
	0.20	32.46	
	0.60	84.43	
	1.50	122.56	



SONDEO	PROF.	MUESTRA	σ_3 kg/cm ²	σ_d kg/cm ²	w_i %	w_f %	S_s	e_i	Gw_i %	Gw_f %	γ_m kg/m ³	γ_{mf} kg/m ³	c ton/m ²	ϕ grados
TS	1.26-2.16 m	M-1	0.20	0.74	16.24	16.00	2.683	1.219	35.73	35.20	1.405	1.402	4.1	19
			0.60	1.71	16.18	16.18		1.185	36.64	36.64	1.427	1.427		
			1.50	2.54	16.73	16.62		1.145	39.19	38.94	1.460	1.459		





ANEXO C

REPORTE FOTOGRÁFICO



PROYECTO:	PROFUNDIDAD EXPLORADA:	SONDEO:	PCA-01 Zapata
AMPLIACIÓN L3 METROBÚS	1.26 m	PCA-01 Zapata	

SUPERVISOR: ING. RICARDO BARAJAS DOMINGUEZ
PERFORADORA: N/A
PROFUNDIDAD EXPLORADA: 1.26 m
FECHA EJECUCIÓN: 07 OCTUBRE DE 2019

COORDENADAS:
X: 483049
Y: 2141745



Figura 1. Excavación de PCA-01



Figura 2. Excavación de PCA-01

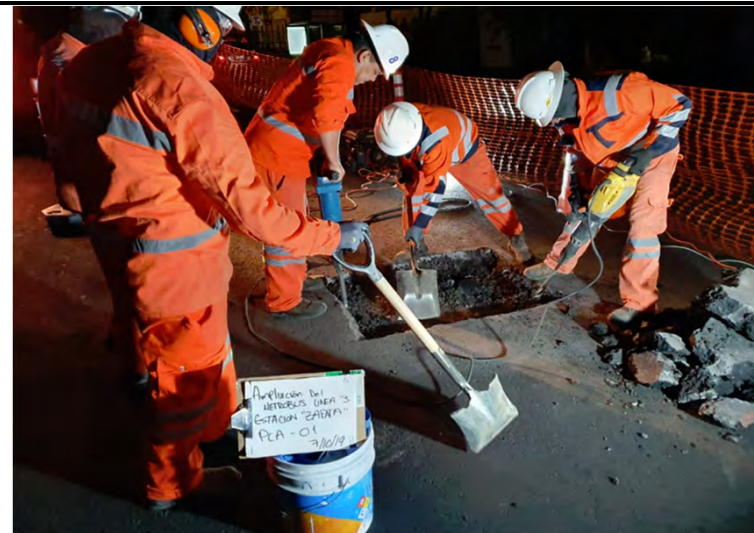


Figura 3. Perfil estratigráfico PCA-01



Figura 4. Levantamiento geotécnico y muestreo PCA-01



PROYECTO:	PROFUNDIDAD EXPLORADA:	SONDEO:	PCA-01 Zapata
AMPLIACIÓN L3 METROBÚS	1.26 m	PCA-01 Zapata	

SUPERVISOR: ING. RICARDO BARAJAS DOMINGUEZ
PERFORADORA: N/A
PROFUNDIDAD EXPLORADA: 1.26 m
FECHA EJECUCIÓN: 07 OCTUBRE DE 2019

COORDENADAS:
X: 483054
Y: 2141772



Figura 5. Maniobra de extracción de muestra inalterada PCA-01



Figura 6. Maniobra de extracción de muestra PCA-01



Figura 7. Colocación de asfalto en el PCA-01



Figura 8. Colocación de asfalto en el PCA-01



PROYECTO:	PROFUNDIDAD EXPLORADA:	SONDEO:	PCA-02 Zapata
AMPLIACIÓN L3 METROBÚS	1.20 m	PCA-02 Zapata	

SUPERVISOR: ING. RICARDO BARAJAS DOMINGUEZ
PERFORADORA: N/A
PROFUNDIDAD EXPLORADA: 1.20 m
FECHA EJECUCIÓN: 07 OCTUBRE DE 2019

COORDENADAS:
X: 483054
Y: 2141772



Figura 9. Excavación de PCA-02



Figura 10. Levantamiento geotécnico y muestreo PCA-02



Figura 11. Perfil estratigráfico PCA-02



Figura 12. Colocación de asfalto en el PCA-02





ANEXO D

MEMORIA DE CÁLCULO



Proyecto: Ampliación de la Línea 3 del Metrobús, estación del MB Zapata

Parámetros geométricos de la cimentación

$D_f := 1.3$ Profundidad de desplante, m

$B := 3.4$ Ancho del cimiento, m

$L := 72.0$ Longitud del cimiento, m



Propiedades del suelo

$\gamma := 17.1$ Peso volumétrico del terreno de cimentación, kN/m³

$\phi := 19$ Ángulo de fricción interna del terreno de cimentación, °

$c := 41$ Cohesión del terreno de cimentación, kPa

$p_v := \gamma \cdot D_f$ $p_v = 22.2$ Presión total al nivel de desplante, en kPa

$\phi_w := \frac{\phi}{180} \cdot \pi$ Ángulo de fricción interna del terreno de cimentación, rad

$NAF := 3.1$ Nivel del agua freática, m

NOTA: Si $NAF=0$ => Considera que los elementos estarán sumergidos (parámetros efectivos)

$\gamma_w := 9.81$ Peso volumétrico del agua, kN/m³

$c_u := c + p_v \tan(\phi)$ Resistencia no drenada del terreno de cimentación, kPa

CONDICIONES DE CARGA DEL CAJÓN DE CIMENTACIÓN

CARGAS: al momento de la realización de la presente memoria de cálculo no se tiene conocimiento de las cargas incidentes a nivel de la cimentación; por tanto, se presenta la capacidad de carga reducida de la cimentación

CONDICIÓN DE CARGA VERTICAL MAX

Condiciones de carga en el cimiento:

$\Sigma Q := 0$ Carga en sentido vertical, en kN

$F_x := 0$ Fuerza horizontal x, en kN

$F_z := 0$ Fuerza horizontal z, en kN

$M_B := 0$ Momento flexionante en dirección del ancho, en kN-m

$M_L := 0$ Momento flexionante en dirección del largo, en kN-m

$FC_{cv} := 1.5$ Factor de carga, estructura del grupo A

Excentricidades de carga:

$e_B := \frac{M_B}{\Sigma Q}$ $e_B = 0$ Excentricidad de carga en dirección del ancho, en m

$e_L := \frac{M_L}{\Sigma Q}$ $e_L = 0$ Excentricidad de carga en dirección del largo, en m

$R_h := \sqrt{F_x^2 + F_z^2}$ Resultante horizontal, en t

Primer término de la desigualdad:

$$A' := (B - 2 \cdot e_B) \cdot (L - 2 \cdot e_L)$$

$$A' = 244.8$$

Área reducida del cimiento, en m²

$$CVMAX := \frac{\Sigma Q \cdot FC_{cv}}{A'}$$

$$\frac{\Sigma Q \cdot FC_{cv}}{A'} = 0$$

Primer término de la desigualdad 3.3.1 de las NTC-DC (2017), en kPa

Capacidad de carga unitaria reducida para suelos cohesivos NTC-DC (2017):

Coefficientes de capacidad de carga:

$$N_c := 5.14 \cdot \left(1 + 0.25 \cdot \frac{D_f}{B} + 0.25 \cdot \frac{B}{L} \right)$$

$$N_c = 5.69$$

Carga unitaria reducida para suelos friccionantes:

$$F_R := 0.65 \quad \text{Factor de reducción considerado. Inciso 3.2 de las NTC-DC (2017)}$$

$$r_{CVMAX} := (c_u \cdot N_c) \cdot F_R + p_v$$

Ecuación modificada para tomar en cuenta el efecto de la presencia del cajón de la Línea 3 STC-Metro

$$r_{CVMAX} = 202.2$$

Carga unitaria reducida para suelos friccionantes, segundo término de la desigualdad 3.3.1 y 3.3.2 de las NTC-DC (2017), en kPa

Revisión de los estados límite de servicio NTC-DC (2017):

$$\delta_{per_aset} := 0.15$$

$$100\delta_{per_aset} = 15$$

Asentamiento máximo permisible, cm

$$\delta_{per_emer} := 0.15$$

$$100\delta_{per_emer} = 15$$

Emersión máxima permisible, cm

Límites máximos para construcciones colindantes en la Zona Geotécnica II (Transición). Tabla 3.3.1. de las NTC-DC (2017)

Modelo geotécnico considerado:

UNIDAD 1* UNIDAD 2 UNIDAD 3 UNIDAD 4 UNIDAD 5

$$\gamma_1 := 20.2 \quad \gamma_2 := 16 \quad \gamma_3 := 14.3 \quad \gamma_4 := 14.3 \quad \gamma_5 := 14.3$$

$$C_{c1} := 0.0001 \quad C_{c2} := 0.0001 \quad C_{c3} := 0.39 \quad C_{c4} := 0.39 \quad C_{c5} := 0.39$$

$$C_{r1} := 0.0001 \quad C_{r2} := 0.0001 \quad C_{r3} := 0.06 \quad C_{r4} := 0.06 \quad C_{r5} := 0.06$$

$$e_{01} := 0.50 \quad e_{02} := 0.7 \quad e_{03} := 1.7 \quad e_{04} := 1.7 \quad e_{05} := 1.7$$

$$OCR_1 := 1 \quad OCR_2 := 1 \quad OCR_3 := 1.95 \quad OCR_4 := 1.95 \quad OCR_5 := 1.95$$

$$E_1 := 45 \quad E_2 := 45 \quad E_3 := 11.3 \quad E_4 := 11.3 \quad E_5 := 11.3$$

$$\nu_1 := 0.30 \quad \nu_2 := 0.30 \quad \nu_3 := 0.45 \quad \nu_4 := 0.45 \quad \nu_5 := 0.45$$

$$z_1 := 0.96 \quad z_2 := 1.4 \quad z_3 := 3.5 \quad z_4 := 9.0 \quad z_5 := 12.0$$

γ : Peso volumétrico, kN/m³

C_c : Coeficiente de compresión

C_r : Coeficiente de recompresión

e_0 : relación de vacíos inicial

OCR : relación de sobreconsolidación

E : Módulo de elasticidad, MPa

ν : Relación de Poisson

z : Profundidad del estrato, m

1.- Esfuerzos efectivos

$$u(z) := \begin{cases} 0 & \text{if } z \leq NAF \\ \gamma_w \cdot (z - NAF) & \text{if } z > NAF \end{cases}$$

$$\sigma_v(z) := \begin{cases} \gamma_1 \cdot z & \text{if } 0 \leq z \leq z_1 \\ \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_2 \cdot (z - z_1) & \text{if } z_1 < z \leq z_2 \\ \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_2 \cdot (z_2 - z_1) + \gamma_3 \cdot (z - z_2) & \text{if } z_2 < z \leq z_3 \\ \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_2 \cdot (z_2 - z_1) + \gamma_3 \cdot (z_3 - z_2) + \gamma_4 \cdot (z - z_3) & \text{if } z_3 < z \leq z_4 \\ \gamma_1 \cdot z_1 + \gamma_2 \cdot (z_2 - z_1) + \gamma_3 \cdot (z_3 - z_2) + \gamma_4 \cdot (z_4 - z_3) + \gamma_5 \cdot (z - z_4) & \text{if } z_4 < z \leq z_5 \end{cases}$$

$$\sigma'_v(z) := \sigma_v(z) - u(z)$$

$$\text{NAF} = 3.1$$

$$z := 0.01, 0.015 \dots z_5$$

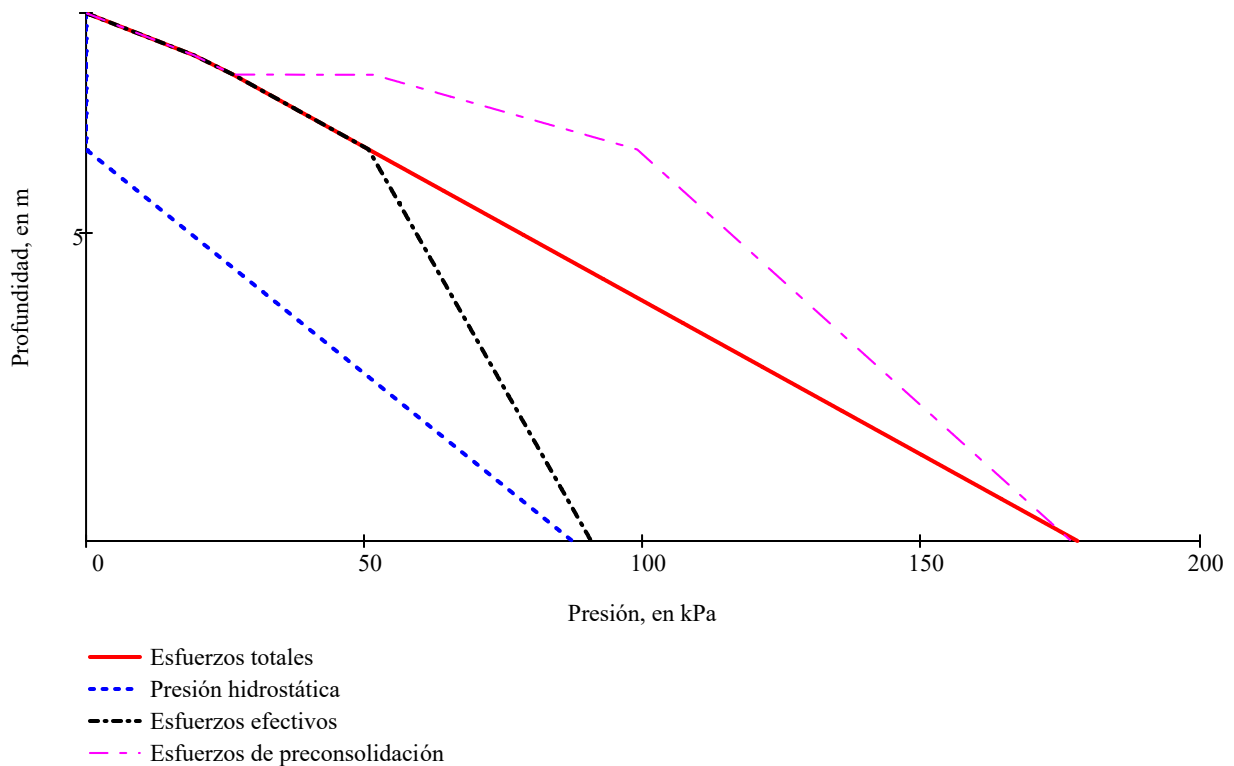
$$C_c(z) := \begin{cases} C_{c1} & \text{if } 0 \leq z \leq z_1 \\ C_{c2} & \text{if } z_1 < z \leq z_2 \\ C_{c3} & \text{if } z_2 < z \leq z_3 \\ C_{c4} & \text{if } z_3 < z \leq z_4 \\ C_{c5} & \text{if } z_4 < z \leq z_5 \end{cases} \quad C_r(z) := \begin{cases} C_{r1} & \text{if } 0 \leq z \leq z_1 \\ C_{r2} & \text{if } z_1 < z \leq z_2 \\ C_{r3} & \text{if } z_2 < z \leq z_3 \\ C_{r4} & \text{if } z_3 < z \leq z_4 \\ C_{r5} & \text{if } z_4 < z \leq z_5 \end{cases}$$

z =	$\sigma_v(z) =$	u(z) =	$\sigma'_v(z) =$
0	0.2	0	0.2
0	0.3	0	0.3
0	0.4	0	0.4
0	0.5	0	0.5
0	0.6	0	0.6
0	0.7	0	0.7
0	0.8	0	0.8
0	0.9	0	0.9
0.1	1	0	1
0.1	1.1	0	1.1
0.1	1.2	0	1.2
0.1	1.3	0	1.3
0.1	1.4	0	1.4
0.1	1.5	0	1.5
0.1	1.6	0	1.6
...	...	...	...

$$E(z) := \begin{cases} E_1 & \text{if } 0 \leq z \leq z_1 \\ E_2 & \text{if } z_1 < z \leq z_2 \\ E_3 & \text{if } z_2 < z \leq z_3 \\ E_4 & \text{if } z_3 < z \leq z_4 \\ E_5 & \text{if } z_4 < z \leq z_5 \end{cases} \quad e_0(z) := \begin{cases} e_{01} & \text{if } 0 \leq z \leq z_1 \\ e_{02} & \text{if } z_1 < z \leq z_2 \\ e_{03} & \text{if } z_2 < z \leq z_3 \\ e_{04} & \text{if } z_3 < z \leq z_4 \\ e_{05} & \text{if } z_4 < z \leq z_5 \end{cases}$$

$$\text{OCR}(z) := \begin{cases} \text{OCR}_1 & \text{if } 0 \leq z \leq z_1 \\ \text{OCR}_2 & \text{if } z_1 < z \leq z_2 \\ \text{OCR}_3 & \text{if } z_2 < z \leq z_3 \\ \text{OCR}_4 & \text{if } z_3 < z \leq z_4 \\ \text{OCR}_5 & \text{if } z_4 < z \leq z_5 \end{cases} \quad \nu(z) := \begin{cases} \nu_1 & \text{if } 0 \leq z \leq z_1 \\ \nu_2 & \text{if } z_1 < z \leq z_2 \\ \nu_3 & \text{if } z_2 < z \leq z_3 \\ \nu_4 & \text{if } z_3 < z \leq z_4 \\ \nu_5 & \text{if } z_4 < z \leq z_5 \end{cases}$$

$$\sigma'_{pc}(z) := \text{OCR}(z) \cdot \sigma'_v(z)$$



Esfuerzos inducidos por la cimentación

Al centro del área cargada

Solución de Boussinesq

$$x(B) := \frac{B}{2} \quad y(L) := \frac{L}{2}$$

$$M(B, z) := \frac{x(B)}{z - Df} \quad N(B, z, L) := \frac{y(L)}{z - Df}$$

$$AB(B, z, L) := M(B, z)^2 + N(B, z, L)^2 + 1$$

$$BB(B, z, L) := M(B, z) \cdot N(B, z, L)$$

$$CB(B, z, L) := M(B, z)^2 + N(B, z, L)^2 + 2$$

$$DB(B, z, L) := \operatorname{atan} \left[\frac{2 \cdot BB(B, z, L) \cdot \sqrt{AB(B, z, L)}}{(AB(B, z, L) - BB(B, z, L)^2)} \right] \quad EB(B, z, L) := \begin{cases} 0 & \text{if } DB(B, z, L) \geq 0 \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$w(B, z, L) := \begin{cases} 0 & \text{if } z \leq Df \\ \frac{1}{\pi} \left[\frac{2 \cdot BB(B, z, L) \cdot CB(B, z, L) \cdot \sqrt{AB(B, z, L)}}{AB(B, z, L) \cdot (AB(B, z, L) + BB(B, z, L)^2)} + DB(B, z, L) + EB(B, z, L) \right] & \text{if } z > Df \end{cases}$$

Distribución de esfuerzos en el punto considerado

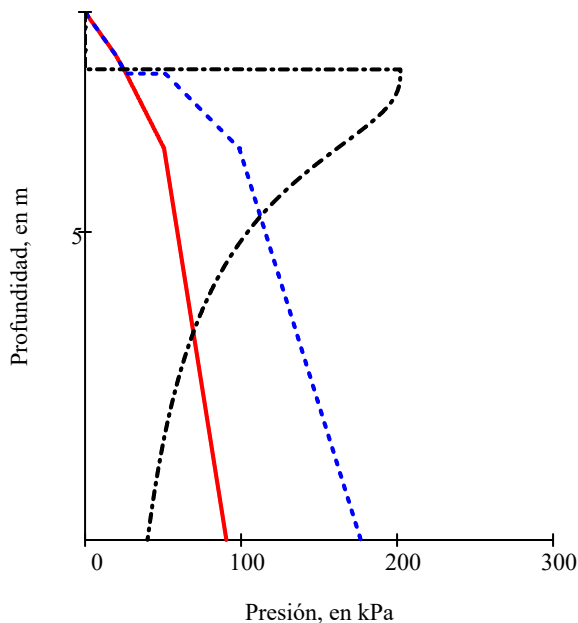
$$q_{\text{est}} := 5,7.5 \dots 250 \quad \text{Presión de servicio de la estructura (carga viva media), en kPa}$$

$$q_{\text{net}}(q_{\text{est}}) := q_{\text{est}} - \gamma \cdot Df$$

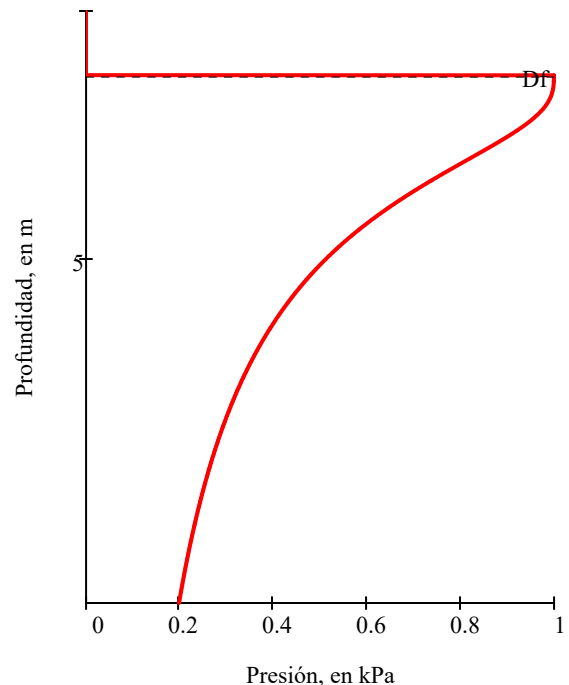
$$w_{\text{carga}}(B, z, L, q_{\text{neta}}) := q_{\text{neta}} \cdot w(B, z, L)$$

$$w_{\text{carga}}(B, z_3, L, r_{\text{CVMAX}}) = 147$$

$$\sigma'_{\text{final}}(B, z, L, q_{\text{neta}}) := w_{\text{carga}}(B, z, L, q_{\text{neta}}) + \sigma'_v(z) \quad \sigma'_{\text{final}}(B, z_3, L, r_{\text{CVMAX}}) = 199.5$$



- Esfuerzos efectivos
- - - Esfuerzos de preconsolidación
- - - Esfuerzos inducidos por la sobrecarga



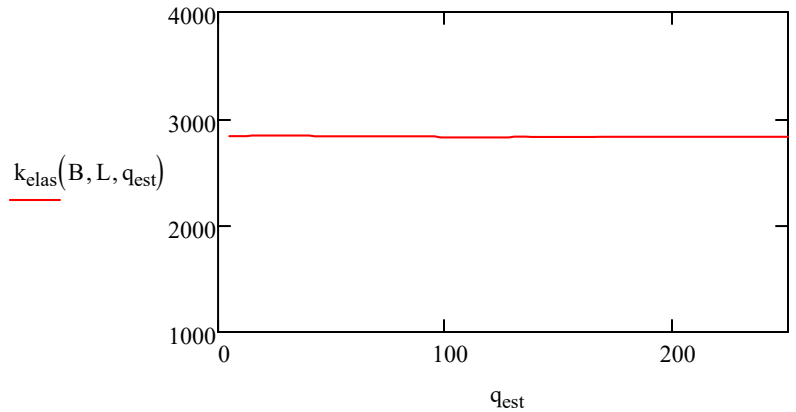
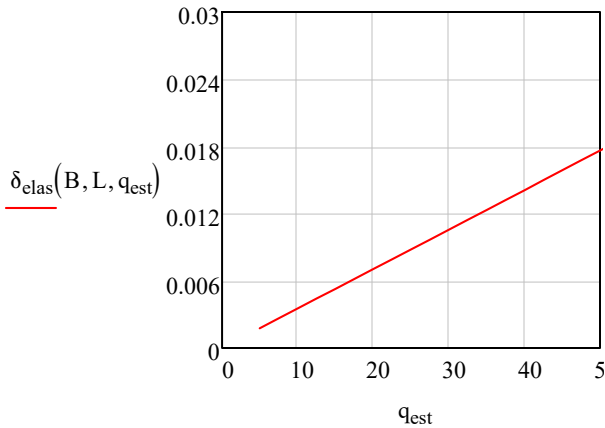
- Esfuerzos inducidos por la sobrecarga

2.- Asentamientos a corto plazo

$$Es(z) := \frac{1000 E(z)}{(1 - \nu(z)^2)}$$

$$\delta_{elas}(B, L, q_{est}) := \int_{Df}^{z5} \frac{w_{carga}(B, z, L, q_{est})}{Es(z)} dz$$

$$k_{elas}(B, L, q_{est}) := \frac{q_{est}}{\delta_{elas}(B, L, q_{est})}$$



$$100 \delta_{elas}(B, L, r_{CVMAX}) = 7.15$$

Asentamiento de corto plazo (construcción) asociado con la capacidad de carga reducida, cm

$$k_{elas}(B, L, r_{CVMAX}) = 2829.5$$

Modulo de reacción vertical en condiciones de corto plazo (construcción), kPa/m

3.- Asentamientos a largo plazo

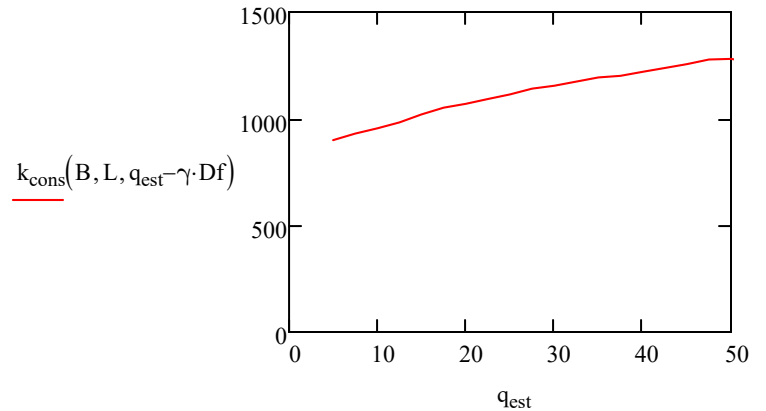
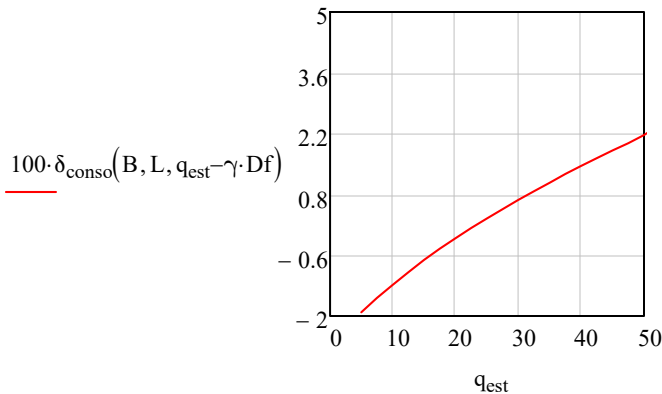
$$\Delta p_1(z) := \sigma'_{pc}(z) - \sigma'_v(z)$$

$$\Delta p_2(B, z, L, q_{neta}) := \sigma'_{final}(B, z, L, q_{neta}) - \sigma'_{pc}(z)$$

$$d\delta_{conso}(B, z, L, q_{neta}) := \begin{cases} \frac{C_r(z)}{1 + e_0(z)} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_v(z) + w_{carga}(B, z, L, q_{neta})}{\sigma'_v(z)}\right) & \text{if } \sigma'_{final}(B, z, L, q_{neta}) < \sigma'_{pc}(z) \\ \frac{C_r(z)}{1 + e_0(z)} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_v(z) + \Delta p_1(z)}{\sigma'_v(z)}\right) + \frac{C_c(z)}{1 + e_0(z)} \cdot \log\left(\frac{\sigma'_{pc}(z) + \Delta p_2(B, z, L, q_{neta})}{\sigma'_{pc}(z)}\right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\delta_{conso}(B, L, q_{neta}) := \int_{Df}^{z5} d\delta_{conso}(B, z, L, q_{neta}) dz$$

$$k_{cons}(B, L, q_{neta}) := \frac{q_{neta}}{\delta_{conso}(B, L, q_{neta})}$$



$$100 \delta_{\text{conso}}(B, L, r_{\text{CVMAX}} - \gamma \cdot Df) = 23.92$$

Asentamiento de largo plazo (consolidación) asociado con la capacidad de carga reducida, cm

$$k_{\text{cons}}(B, L, r_{\text{CVMAX}} - \gamma \cdot Df) = 752.6$$

Modulo de reacción vertical en condiciones de largo plazo (consolidación), asociado con la capacidad de carga reducida, kPa/m

Asentamiento esperado mayor que el permisible; por tanto, la carga viva media tendría que ser menor que 141 kPa.

$$\text{CVM} := 50$$

Carga Viva Media supuesta, kPa

$$100 \delta_{\text{conso}}(B, L, \text{CVM} - \gamma \cdot Df) = 2.17$$

Asentamiento de largo plazo (consolidación) asociado con la Carga Viva Media supuesta, cm

$$k_{\text{cons}}(B, L, \text{CVM} - \gamma \cdot Df) = 1280.6$$

Modulo de reacción vertical en condiciones de largo plazo (consolidación), asociado, kPa/m

$$\text{CVMin} := 22.23$$

Carga Viva Media mínima, kPa

$$100 \delta_{\text{conso}}(B, L, \text{CVMin} - \gamma \cdot Df) = 0$$

Asentamiento de largo plazo (consolidación) asociado con la Carga Viva Media máxima permisible, cm

$$k_{\text{cons}}(B, L, \text{CVMin} - \gamma \cdot Df) = 9541.2$$

Modulo de reacción vertical en condiciones de largo plazo (consolidación), asociado con la capacidad de carga reducida, kPa/m