

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**SOLUCIONES DEL KM 303+720 AL 10+000
AUTOPISTA TOLUCA – NAUCALPAN
LONGITUD 39.3 KM**

POR:

ING. MARCO ANTONIO LEÓN NARES

**ESTUDIO DE CASO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA**

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

ENERO DE 2019



Soluciones del km 303 + 720 al 10 + 000 autopista Toluca – Naucalpan, longitud 39.3 km. Estudio de caso presentado por Marco Antonio León Nares como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Vías Terrestres, ha sido aprobada y aceptada por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado

M.C. Alejandro Calderón Landaverde
Coordinador Académico

M.C. Alejandro Calderón Landaverde
Director(a) de Tesis

Fecha: **Enero 2019**

Comité:
Dr. José Castañeda Ávila
Dr. Alejandro Villalobos Aragón
M.C. Alejandro Calderón Landaverde
M.I. José Antonio Portillo Ocegüera

© Derechos Reservados

Marco Antonio León Nares.
Paquihuata # 315
Colonia Félix Ireta
Morelia, Michoacán.

ENERO 2019

<En esta página se inserta el oficio del índice de tesis>

Dedicatoria

En memoria de mis Padres.

A mi esposa Maria del Carmen.

A mis Hijos:

Marco Antonio, Carmen Yavari y Jose Miguel.

Mis Hermanos.

A la Universidad Autónoma de Chihuahua que hizo cambiar mi manera de ser en bien de la sociedad mexicana.

A mis Maestros M. en I. Julián Limón Limón.

Y a todos los que de alguna manera colaboraron en mi formación.

A la M en I. Itzel Aimee Valdez Hernández, al M en I. Alejandro Calderón Landa Verde.

Agradecimientos

< OPCIONAL: Centrado sin sangría. Si no se desea incluir agradecimientos, borrar toda la página **incluyendo la transición en la parte inferior de la página. No borre la transición de página en la página anterior (portada)**. Si lo hace se perderá la paginación del trabajo.>

Resumen

<OPCIONAL: si no se desea hacer el resumen, borrar toda la página, incluyendo la transición de página siguiente.>

Índice de Contenido

Dedicatoria	IV
Agradecimientos.....	V
Resumen	VI
Índice de Contenido.....	VII
Índice de Tablas.....	IX
Índice de Tablas Proyecto SABA.....	IX
Índice de Tablas de Serical.....	IX
Índice de Figuras	IX
Índice de Figuras Proyecto SABA.....	X
Índice de Figuras de Serical.....	X
Capítulo 1: Antecedentes, Hipótesis y Objetivos	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 HIPÓTESIS	3
1.3 OBJETIVOS	3
Capítulo 2: Metodología.....	4
2.1 INTRODUCCIÓN.....	4
2.2 TIPO DE METODOLOGÍA	4
2.3 TRAMO CRÍTICO.....	4
2.4 ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA.....	45
2.5 DIAGNÓSTICO	75
Capítulo 3: Resultados.....	76
3.1 OBTENCIÓN DE RESULTADOS.....	76
3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS	77
3.3 EVALUACIONES	77
3.4 ALTERNATIVAS	78
3.5 PROPUESTAS.....	79
3.6 Soluciones.....	81
4.1 CONCLUSIONES.....	83
4.2 RECOMENDACIONES	83



Referencias	84
Glosario	85
Apéndice	86
Curriculum Vitae	87

Índice de Tablas

Índice de Tablas Proyecto SABA.

Tabla 1. Carreteras aforadas. Secretaria de Comunicaciones y Transportes.	1
Tabla 2. Recomendaciones para cimentación de obras de drenaje (km 5+867 al 8+096) ...	11
Tabla 3. Recomendaciones para cimentación de obras de drenaje. (Km 8+219 al 9+980) .	12
Tabla 4. Características de una carretera tipo A4. Libro 2.01.01	22
Tabla 5. Anchos de corona, de calzada de acotamientos y de faja separadora central. Libro 2.01.01	23
Tabla 6. Clasificación y características de las carreteras. Libro 2.01.01	24
Tabla 7. Ampliaciones, sobreelevaciones y transiciones para carretera tipo A (A4S y A4). Libro 2.01.01	25

Índice de Tablas de Serical.

<i>Tabla Serical 1. Características de los sondeos.</i>	37
<i>Tabla Serical 2. Factor de seguridad contra falla por capacidad de carga.</i>	40

Índice de Tablas RVO y Cia.

Tablas RVO 1. Sondeos mixtos de penetración estándar	52
Tablas RVO 2. Coordenadas de los SEV	57
Tablas RVO 3. Tramo km 4+500 a 4+800	63
Tablas RVO 4. Tramo km 7+200 a 8+000	64
Tablas RVO 5. Tramo km 8+300 a 9+850	64
Tablas RVO 6. Tramo km 6+100 a 7+200	64
Tablas RVO 7. Tramo km 4+800 a 6+100	64
Tablas RVO 8. Tramo km 8+000 a 8+300	65

Índice de Figuras

Índice de Figuras Proyecto SABA.

Figura 1. Sección constructiva tipo.....	15
Figura 2. Km 6+400, zona plana arcillosa.....	17
Figura 3. Km 9+080, zona plana arcillosa.....	18
Figura 4. Km 9+080, zona plana arcillosa.....	18
Figura 5. Km 8+300. Zona plana, inundable, con material arcilloso	19
Figura 6. Panorámica del Km 9+080 hacia atrás.....	19
Figura 7. Km 8+300. Zona plana, inundable, con material arcilloso	20
Figura 8. Panorámica del Km 8+340 hacia atrás.....	20
Figura 9. Panorámica del Km 8+340 hacia adelante.....	21
Figura 10. Km 9+960, zona plana arcillosa.....	21
Figura 11. Sección tipo.....	22
Figura 12. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300	26
Figura 13. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300	27
Figura 14. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300	27
Figura 15. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300	28
Figura 16. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300	28

Índice de Figuras de Serical

Figura Serical 1. Ubicación del sitio.	30
Figura Serical 2. Localización aérea del sitio.....	30
Figura Serical 3. Localización geológica.	31
Figura Serical 4. Localización sísmica del México.....	32
Foto 01. Sondeo mixto 1 (SM-1).....	34
Foto 02. Sondeo mixto 2 (SM-2).....	34
Foto 03. Sondeo mixto 3 (SM-3).....	35
Foto 04. Sondeo mixto 4(SM-4).....	35
Foto 05. Sondeo mixto5 (SM-5).....	36
Foto 06. Sondeo mixto 6 (SM-6).....	36
Figura Serical 13. Sección de terraplén en zona de falla, km 8+160.	41
Figura Serical 15. Sección de terraplén modificado, km 8+000 a 8+300.	42
Figura Serical 14. Sección máxima permisible de terraplén, km 8+000 a 8+300.....	42

Índice de Figuras del Capítulo 3: Resultados.

Figura Soluciones 1. Asentamientos por consolidación a lo largo del tramo analizado (Rodríguez, G., 2013).....	82
--	----

Capítulo 1: Antecedentes, Hipótesis y Objetivos

1.1 ANTECEDENTES

La propuesta de este proyecto fue con el propósito de proporcionar una vía de comunicación más entre la ciudad de Toluca – Distrito Federal (Ciudad de México), en 2007 se tenía un Transito Diario Promedio Anual de 144,557 en la entrada al D.F de Toluca, como se indica en la Tabla 1 proporcionada por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Desde el mes de septiembre 2005 debido al temblor que ocurrió en la ciudad de México, la población se incrementó en la ciudad de Toluca, Metepec y alrededores, además de comunicar al centro turístico de Valle de Bravo con el Distrito Federal, con una vía rápida.

Tabla 1. Carreteras aforadas. Secretaria de Comunicaciones y Transportes.

80 CARR : CONSTITUYENTES - LA MARQUESA (CUOTA)		CLAVE: 00446				RUTA : MEX-DF							AÑO : 2007				
L U G A R	E S T A C I O N				CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO .												
	KM	TE	SC	TDPA	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D
T. C. MEXICO - TOLUCA (LIBRE) (LA MARQUESA)	19.20	1	1	14966	85.6	6.8	1	2	1.6	1.3	0.6	1.1	85.6	6.8	7.6	0.116	0.543
T. C. MEXICO - TOLUCA (LIBRE) (LA MARQUESA)	19.20	1	2	17760	85.1	7	1.6	1.8	1.3	1.1	0.7	1.4	85.1	7	7.9	0.109	0.543

85 CARR : MEXICO - TOLUCA		CLAVE: 00447				RUTA : MEX-015							AÑO : 2007				
L U G A R	E S T A C I O N				CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO .												
	KM	TE	SC	TDPA	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D
MEXICO	0.00	0	0														
ENT. CONSTITUYENTES Y REFORMA	12.84	3	1	71377	78.4	5.6	2.4	5.3	4.3	2.8	0.1	1.1	78.4	5.6	16	0.118	0.51
ENT. CONSTITUYENTES Y REFORMA	12.84	3	2	73180	77.3	5.3	5.4	3.5	4.2	3.4	0.1	0.8	77.3	5.3	17.4	0.091	0.51
T. DER. CUAJIMALPA (1° ACCESO)	20.56	1	1	36663	83.5	4.3	3.1	3.1	1.8	3	0.1	1.1	83.5	4.3	12.2	0.091	0.517
T. DER. CUAJIMALPA (1° ACCESO)	20.56	1	2	33895	81.3	6	3.8	3.3	1.9	2.8	0.1	0.8	81.3	6	12.7	0.112	0.517
T. IZQ. DESIERTO DE LOS LEONES	23.96	1	1	25377	80.3	7.1	4.3	2.7	1.9	2.2	0.2	1.3	80.3	7.1	12.6	0.147	0.539
T. IZQ. DESIERTO DE LOS LEONES	23.96	1	2	29322	82.9	6.9	2.9	1.5	1.6	2.9	0.1	1.2	82.9	6.9	10.2	0.134	0.539
LIM. EDOS. TERM. D.F. PPIA. MEX.	33.44	0	0														
T. DER. HUIXQUILUCAN	33.98	1	1	23481	81.7	7.1	2.8	2.2	2.8	2.1	0	1.3	81.7	7.1	11.2	0.135	0.516
T. DER. HUIXQUILUCAN	33.98	1	2	24746	81.6	7	3.7	3.2	0.3	2.9	0.1	1.2	81.6	7	11.4	0.149	0.516
X. C. AMOMOLULCO - STGO. TIANGUISTENCO	47.26	1	1	27908	73.4	11.5	2.6	4.2	2.9	2.5	0.3	2.6	73.4	11.5	15.1	0.077	0.505
X. C. AMOMOLULCO - STGO. TIANGUISTENCO	47.26	1	2	28081	73.7	11.5	3.2	4	2.7	2.3	0.2	2.4	73.7	11.5	14.8	0.091	0.505
T. DER. LERMA - IZQ. SAN PEDRO TULTEPEC	51.71	1	1	29273	78.7	8.4	3.8	2.9	1.7	1.9	0.2	2.4	78.7	8.4	12.9	0.08	0.503
T. DER. LERMA - IZQ. SAN PEDRO TULTEPEC	51.71	1	2	28361	79.1	8.3	4.8	3.7	1.6	0.6	0.2	1.7	79.1	8.3	12.6	0.076	0.503
T. IZQ. SAN MATEO ATENCO (ALTA)	52.00	3	1	35067	91.6	2.3	2.4	1.6	0.4	0.3	0.2	1.2	91.6	2.3	6.1	0.09	0.523
T. IZQ. SAN MATEO ATENCO (BAJA)	52.00	3	1	8865	71.5	8.6	5.8	3.9	3.3	2.8	0.4	3.7	71.5	8.6	19.9	0.109	0.505
T. IZQ. SAN MATEO ATENCO (ALTA)	52.00	3	2	37813	91.6	2.3	2.3	1.5	0.4	0.4	0.2	1.3	91.6	2.3	6.1	0.097	0.523
T. IZQ. SAN MATEO ATENCO (BAJA)	52.00	3	2	8941	68.6	8.6	6.5	5.5	3.6	2.8	0.4	4	68.6	8.6	22.8	0.115	0.505
X. C. LIBRAMIENTO DE TOLUCA (BAJA)	62.20	1	1	8839	80.6	7.3	5.3	2.8	1.1	1	0.1	1.8	80.6	7.3	12.1	0.148	0.502
X. C. LIBRAMIENTO DE TOLUCA (ALTA)	62.20	1	1	38297	88.3	4	3.3	1.9	0.4	0.4	0.2	1.5	88.3	4	7.7	0.102	0.51
MEXICO																	

85 CARR : MEXICO - TOLUCA		CLAVE: 00447				RUTA : MEX-015							AÑO : 2007				
L U G A R	E S T A C I O N				CLASIFICACION VEHICULAR EN PORCIENTO .												
	KM	TE	SC	TDPA	A	B	C2	C3	T3S2	T3S3	T3S2R4	OTROS	A	B	C	K'	D
X. C. LIBRAMIENTO DE TOLUCA (BAJA)	62.20	1	2	8855	79.5	7.3	5.3	3.2	1.1	1.2	0.1	2.3	79.5	7.3	13.2	0.106	0.502
X. C. LIBRAMIENTO DE TOLUCA (ALTA)	62.20	1	2	36952	88.8	4	3.1	1.7	0.4	0.4	0.2	1.4	88.8	4	7.2	0.088	0.51
TOLUCA	66.00	0	0														

La autopista Toluca – México se encontraba saturada a más del 100% rebasando su capacidad en el 2007, que es cuando se licitó este proyecto (Plano 1, Anexo 3).

El proyecto geométrico de esta autopista es el del tipo de una carretera con especificaciones A4, que se tienen en el libro: Proyecto Geométrico de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, libro 2 Norma de Servicios técnicos parte 2.01, Título 2.01.01 Carreteras.

Establecer nuevas rutas viales que eviten el paso por la Ciudad de México es una necesidad que obliga el desarrollo de nuevos proyectos carreteros, como esta autopista que se comunica con el norte del Distrito Federal, como es la ciudad de Naucalpan del Estado de México.

El gobierno del estado de México consideraba a este proyecto una vía importante rápida de comunicación de la capital del estado con Naucalpan. Lo anterior, además del crecimiento en nivel económico entre Toluca y el Distrito Federal, así como el intercambio de empleos en ambos sentidos, debido esto al desarrollo industrial del valle de Toluca. Por lo que se buscó un área lo menos poblada para la ubicación de esta Autopista y que acortara en longitud y tiempo su recorrido entre Toluca y Naucalpan.

El gobierno del Estado de México propuso a esta obra por el sistema de concesionada.

1.2 HIPÓTESIS

Con la revisión de la documentación del proyecto propuesto y un estudio de mecánica de suelos, se investigará por qué ocurrió la falla en el km 08+300. Y con los resultados obtenidos del estudio mencionado en el párrafo anterior, elaborar un estudio de mecánica de suelos del tramo del km 303 + 720 al km 10 + 000, ya que es muy parecido el tipo de terreno entre estos kilómetros, para determinar un estudio estratigráfico del tipo de suelo que se tendría al construir la obra.

Obteniéndose como resultado, recomendaciones y soluciones que beneficiarán la elaboración de proyectos viables a construirse en este tramo de carretera, en los conceptos de terracerías, obras de drenaje, así como estructuras. Todo lo anterior, para beneficio de los usuarios que circularán, con seguridad y confort, sobre esta carretera.

1.3 OBJETIVOS

Los proyectos de las carretas concesionadas siempre son económicos en su propuesta, aunque se debe tener especial cuidado en la elaboración de proyectos, ajustándose a la normativa S. C. T.

1.3.1 *Objetivo General*

Se llevará a cabo un análisis y revisión de todos los estudios y proyectos ejecutados en el tramo que se analizará para determinar las mejores soluciones a la problemática que presenta el terreno en estudio, donde se proyectó el trazo para la construcción de la autopista.

1.3.2 *Objetivo Particular*

Los estudios que se ejecutaron posteriores a una falla ocurrida en el km 8+300, así como los obtenidos posteriores apoyados con la normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, así como con distintos libros de mecánica de suelos y otros en Terracerías, obras de drenaje, estructuras y pavimentos serán el sustento para la elaboración de mejores proyectos, que los originalmente ejecutados.

Capítulo 2: Metodología

Debe ser tomada muy en cuenta para dar una satisfactoria solución técnica a esta investigación.

2.1 INTRODUCCIÓN

Se debe tomar en cuenta todos los estudios que fueron ejecutados en el tramo a que se hace referencia en este documento.

2.2 TIPO DE METODOLOGÍA

2.2.1 *Recopilación de la información existente*

Es un método usado cuando se requiere de una investigación para analizar de una manera analítica los resultados obtenidos de estudios realizados antes y después de la falla anteriormente mencionada.

2.2.2 *Inspección y reconocimiento del sitio*

Realizada cuantas veces fue necesario antes, durante y después de la elaboración del proyecto del trazo, obras de drenaje, terracerías, estructuras y pavimentación para darle seguimiento a todo el proyecto.

2.3 TRAMO CRÍTICO

Se le ha llamado así, debido a la falla presentada entre el km 8+000 y km 8+300.

2.3.1.-*Estudios que se ejecutaron antes de la falla*

Estos estudios fueron elaborados para llevar a cabo el proyecto original con el que se dieron los datos de construcción de esta Autopista. A continuación, se presentan en este sub capítulo.

2.3.1.1.-Reporte de sondeo del km 3+000 al 10+000

Sondeo km 6+400

SABA proyectos. s.a.

REPORTE DE CAMPO DE ELABORACIÓN DE SONDEOS

CARRETERA: Toluca - Naucalpan	PROYECTO: Nuevo	
TRAMO: Toluca Naucalpan	SONDEO: PCA 033	
SUBTRAMO: KM. 6+000 A 38+000	Prof. de Sond.: 2.60	FECHA: 10.01.08
ORIGEN: Toluca, Edomex.	KILOMETRAJE: 6+400	CARRIL:

Profundidad	Simbología	Espesor	Descripción	Muestra
30 cm v	[Hatched Box]	30 cm	Arcilla color negro. Organica.	
1.30 m v				
2.60 m v		Indef.	Arena fina, suelta, color gris oscuro. NAF a 2.30 m de profundidad. (SC)	59 a 2.00 m de Prof.
Fin de Sondeo				

Notas y Observaciones:

La descripción y clasificación del material es visual y al tacto obtenida en campo, las muestras fueron enviadas al laboratorio para su clasificación y caracterización correspondiente.	N.A.F. a 2.30 m de profundidad.
--	---------------------------------



Sondeo Km 7+717

Profundidad	γ_d	γ_w	ϕ	C_u	E_m	v	C_v	C_s	ORC
	Kg/cm ²	Kg/cm ²	°	Kg/cm ²	Kg/cm ²		cm/seg	Cm/seg	
0.0 a 4.0	668	1270	10	0.45	12	0.33	0.004	0.003	2.25
4.0 a 10.0	510	1269	3.70	0.42	5	0.45	0.005	0.005	2.08
10.0 a 14.0	489	1243	4.0	0.42	4	0.45	0.004	0.005	2.25
14.0 a 16.0	1034	1604	20	1.4	16	0.45	0.004	0.005	4.16
16.0 a 18.0	1029	1555	20	1.4	18	0.45	0.004	0.005	4.16
18.0 a 30.0	Se encontró estrato resistente > 50 NSPT, Limo arenoso.								

Sondeo km 8+340

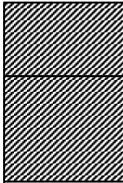
SABA proyectos. s.a.

REPORTE DE CAMPO DE ELABORACIÓN DE SONDEOS

CARRETERA: Toluca - Naucalpan
TRAMO: Toluca Naucalpan
SUBTRAMO: KM. 6+000 A 38+000
ORIGEN: Toluca, Edomex.

PROYECTO: Nuevo
SONDEO: PCA 030
Prof. de Sond.: 1.20
KILOMETRAJE: 8+340

FECHA: 10.01.08
CARRIL:

Profundidad	Simbología	Espesor	Descripción	Muestra
1.20 m - v Fin de Sondeo		1.20 m	Arcilla color negro. Organica., de consistencia blanga, organica. (CH).	M-556 a 1.20 m de Prof. N.A.F. a 1.20 m de Profundidad

Notas y Observaciones:

La descripción y clasificación del material es visual y al tacto obtenida en campo, las muestras fueron enviadas al laboratorio para su clasificación y caracterización correspondiente.

La Zona esta inundada con aguas negras para riego, la muestra se tomo del camino cerca del canal.



Sondeo km 9+080



REPORTE DE CAMPO DE ELABORACIÓN DE SONDEOS

CARRETERA: Toluca - Naucalpan	PROYECTO: Nuevo
TRAMO: Toluca Naucalpan	SONDEO: PCA 031
SUBTRAMO: KM. 6+000 A 38+000	Prof. de Sond.: 1.30
ORIGEN: Toluca, Edomex.	FECHA: 10.01.08
KILOMETRAJE: 9+080	CARRIL:

Profundidad	Simbología	Espesor	Descripción	Muestra
1.30 m √ Fin de Sondeo		1.30 m	Arcilla color negro. Organica., de consistencia blanga, organica. (CH).	N.A.F. a 1.30 m de Profundidad

Notas y Observaciones:

La descripción y clasificación del material es visual y al tacto obtenida en campo, las muestras fueron enviadas al laboratorio para su clasificación y caracterización correspondiente.	La Zona esta inundada con aguas negras para riego, la muestra se tomo del camino cerca del canal.
--	---



Sondeo km 9+960



REPORTE DE CAMPO DE ELABORACIÓN DE SONDEOS

CARRETERA: Toluca - Naucalpan	PROYECTO: Nuevo	
TRAMO: Toluca Naucalpan	SONDEO: PCA 032	
SUBTRAMO: KM. 6+000 A 38+000	Prof. de Sond.: 2.30	FECHA: 10.01.08
ORIGEN: Toluca, Edomex.	KILOMETRAJE: 9+960	CARRIL:

Profundidad	Simbología	Espesor	Descripción	Muestra
30 cm v		30 cm	Arcilla color negro. Organica.	
2.30 m v				N.A.F. a 2.30 m de Profundidad
Fin del Sondeo				

Notas y Observaciones:

La descripción y clasificación del material es visual y al tacto obtenida en campo, las muestras fueron enviadas al laboratorio para su clasificación y caracterización correspondiente.	Esta zona ya no esta inundada.
--	--------------------------------



2.3.2.1 Perfil del suelo del km 3+000 al 10+000

En el terreno del km 3+000 al km 10+000 existía una laguna, a la cual se le extrajo el agua mediante un dren, localizado aguas debajo de donde cruza la carretera en proyecto sobre el Rio Lerma (en el km 4+500).

Este es un terreno plano, con casi nada de pendiente en todas direcciones.

En profundidad en algunos lugares, se obtuvieron muestras, que contenían arcillas y materia orgánica, con poca capacidad de carga de este terreno, apto para la agricultura y ganadería.

Posteriormente se determinará la estratigrafía del terreno llevando a cabo los estudios que se quiere para la construcción de la carretera propuesta.

Se anexa plano 2 Anexo 3 RVO y Cia, para una mejor interpretación de lo anteriormente descrito.

2.3.2.2 Informe geotécnico del km 3+000 al 10+000

- **Morfología**

El trazo de la autopista Toluca - Naucalpan, se desarrolla principalmente sobre la sierra de Las Cruces atravesando también una planicie cerca de la Cd. De Toluca.

Del Km 0+000 al Km 10+000 aproximadamente, se tiene una zona plana.

- **Hidrología**

La zona plana del Km 6+400 al Km 10+000 es prácticamente suburbana y se encontraron encharcamientos y pequeñas lagunas. En esta zona se debe considerar un despalme fuerte y construir el terraplén con calidad de material para capa subyacente.

- **Climatología**

Se considera la clasificación de climas de Köppen modificada por Enriqueta García año de 1998, y tomando en cuenta también las propuestas del sitio web del INEGI, en la carta de Efectos Climáticos registro Noviembre-Abril con escala 1:250,000 E14-2 Edición 1985.

El clima en el tramo puede clasificarse CwH, subtropical de altura, tipo mexicano. Templado regular. Con precipitación media anual del orden de 800 mm y temperatura media anual del orden de 20°C. Enriqueta García año de 1998, y tomando en cuenta también las propuestas del sitio web del INEGI, en la carta de Efectos Climáticos registro Noviembre-Abril con escala 1:250,000 E14-2 Edición 1985.

- **Topografía**

Del Km 0+600 al Km 10+000, se tiene una zona plana, donde no habrá cortes y los terraplenes tendrán una altura del orden de 2.00m.

- **Drenaje**

La zona plana del Km 6+400 al Km 10+000 es prácticamente suburbana y se encontraron encharcamientos y pequeñas lagunas. En esta zona se debe considerar un despalme fuerte y construir el terraplén con calidad de material para capa subyacente.

Las recomendaciones para cimentación de obras menores de drenaje se encuentran en las Tabla 2 y 3, apoyadas con las observaciones del siguiente inciso.

Tabla 2. Recomendaciones para cimentación de obras de drenaje (km 5+867 al 8+096)

CARRETERA:TOLUCA - NAUCALPAN TRAMO: TOLUCA - NAUCALPAN SUB-TRAMO: DE KM 5+000 A KM 10+000 ORIGEN:							
RECOMENDACIONES PARA CIMENTACIÓN DE OBRAS MENORES DE DRENAJE							
Ubicación	Tipo de Obra y Dimensiones	Mateial sobre el que se efectuara el desplante	Altura del Terraplen m	Profundidad de Desplante m	Capacidad de carga Ton/m2	Tipo de Arrastre	OBSERVACIONES
5+867.00	L- 6.00x5.00 m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	2.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
5+956.00	Tc-1.20mø	Arcilla negra de consistencia blanda a media. (CH)	3.00	1.00	CAJÓN	Limo	D, E
6+200.00	Tc-1.20mø	Arcilla negra de consistencia blanda a media. (CH)	3.00	1.00	CAJÓN	Limo	D, E
6+395.00	L-6.00x3.00m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	3.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
6+513.00	Tc-1.20mø	Arcilla negra de consistencia blanda a media. (CH)	3.00	1.00	CAJÓN	Limo	D, E
6+748.50	L-6.0x2.5m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	3.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
7+200.00	L-2.0x1.5m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	2.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
7+471.00	L-2.0x2.0m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	4.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
7+609.00	L-2.0x1.5m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	6.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
7+793.00	L-5.0x3.5m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
8+095.00	L-4.0x3.0m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E

Tabla 3. Recomendaciones para cimentación de obras de drenaje. (Km 8+219 al 9+980)

CARRETERA: TOLUCA - NAUCALPAN TRAMO: TOLUCA - NAUCALPAN SUB-TRAMO: DE KM 5+000 A KM 10+000 ORIGEN:							
RECOMENDACIONES PARA CIMENTACIÓN DE OBRAS MENORES DE DRENAJE							
Ubicación	Tipo de Obra y Dimensiones	Mateial sobre el que se efectuara el desplante	Altura del Terraplen m	Profundidad de Desplante m	Capacidad de carga Ton/m2	Tipo de Arrastre	OBSERVACIONES
8+219.00	L-3.0x2.5m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
8+500.13	L-5.0x3.5m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
8+624.00	Tc-1.20mø	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
8+940.00	Tc-1.20mø	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
9+207.00	L-3.0x2.5m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
9+344.00	L-3.0x2.5m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	7.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
9+701.25	Tc-1.20mø	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
9+793.00	Tc-1.20mø	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E
9+980.00	L-5.0x3.5m	Arcilla gris oscuro, de consistencia blanda a media. (CH)	8.00	1.50	CAJÓN	Limo	D, E

- **Observaciones particulares a las tablas de curva masa**

A. En todos los casos el cuerpo de terraplén se compactará al 90% o se bandeará según sea el caso; las capas de transición y subrasante se compactarán al 95% y 100% respectivamente; los grados de compactación son con respecto a la prueba AASHTO

modificada. Cuando la altura de los terraplenes sea menor de 80 cm la inclinación del talud será de 3:1. Si la altura se encuentra entre 80 cm y 1.20 m, la inclinación del talud será de 2:1 y si la altura de los terraplenes es mayor de 1.20 m la inclinación del talud será de 1.5:1.

B. En todos los casos, cuando no se indique otra cosa, el terreno natural, después de haberse efectuado el despalme correspondiente, el piso descubierto deberá compactarse al 90% de su PVSM. en una profundidad mínima de 0.20 m; o bandearse según sea el caso.

C. Material que por sus características, no debe utilizarse ni en la formación del cuerpo de terraplén.

D. Material que por sus características, solo puede utilizarse en la formación del cuerpo de terraplén, mismo que deberá compactarse al 90% de su PVSM. o bandearse según sea el caso.

E. Material que por sus características, puede utilizarse en la formación del cuerpo de terraplén y capa de transición.

F. Material que por sus características, puede utilizarse en la formación del cuerpo de terraplén, capa de transición y capa subrasante.

G. En terraplenes formados con este material, se deberá construir capa de transición de 0.20 m. de espesor, cuando la altura de estos sea menor de 1.10 m. y cuando sea mayor, la transición será de 0.70 m.; y en ambos casos se proyectará capa subrasante de 0.40 m. de espesor.

H. En terraplenes formados con este material, se deberá construir capa de transición de 0.20 m. de espesor como mínimo, y capa subrasante de 0.40 m. compactadas al 95 y 100% respectivamente, las cuales se construirán con material de préstamo del banco más cercano.

I. En cortes formados en este material, la cama de corte se deberá compactar al 95% de su PVSM., en una profundidad mínima de 0.20 m. y se deberá proyectar capa subrasante de 0.40 m. de espesor, compactándola al 100%, con material procedente del banco más cercano.

J. En este tramo se deberán proyectar en cortes y en terraplenes bajos, capa de transición de 0.70 m. de espesor, como mínimo y capa subrasante de 0.40 m.; en caso de ser necesario se deberán abrir cajas de profundidad suficiente para alojar las capas citadas; ambas capas se proyectarán con préstamo del banco más cercano.

L. En cortes formados en este material, se proyectará únicamente capa subrasante de 0.40 m. de espesor, compactándola al 100 % y se construirá de préstamo del banco más cercano.

N. En caso de cortes y terraplenes formados con este material, se deberá proyectar capa de transición y capa subrasante de 0.20 m y 0.40 m respectivamente, compactando al 95 % y 100 % ambas se construirán con material de préstamo del banco más cercano.

Q. Se recomienda proyectar un talud de 1/3:1, medido en el punto donde se tiene la altura máxima del corte y hasta una altura de 20 m a partir del nivel de la cuneta; formar una berma de 6 m de ancho drenada con una cuneta revestida y continuar el corte con talud de 1/3:1 hasta su altura total.

- **Procedimientos de construcción**

I. La construcción de esta autopista deberá regirse por las Normas para Construcción e Instalaciones de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, así como por las Especificaciones Particulares (EP).

II. Las secciones transversales típicas son las indicadas en la Figura 1.

- III. Las especificaciones aquí descritas, serán estrictamente exigidas por la Supervisión y la Residencia de Construcción; por lo tanto, deberán de ser consideradas por la contratista e incluida su ejecución en los análisis y cálculos de los precios unitarios correspondientes, como pueden ser excavaciones en corte PUOT, o formaciones de terraplenes PUOT.

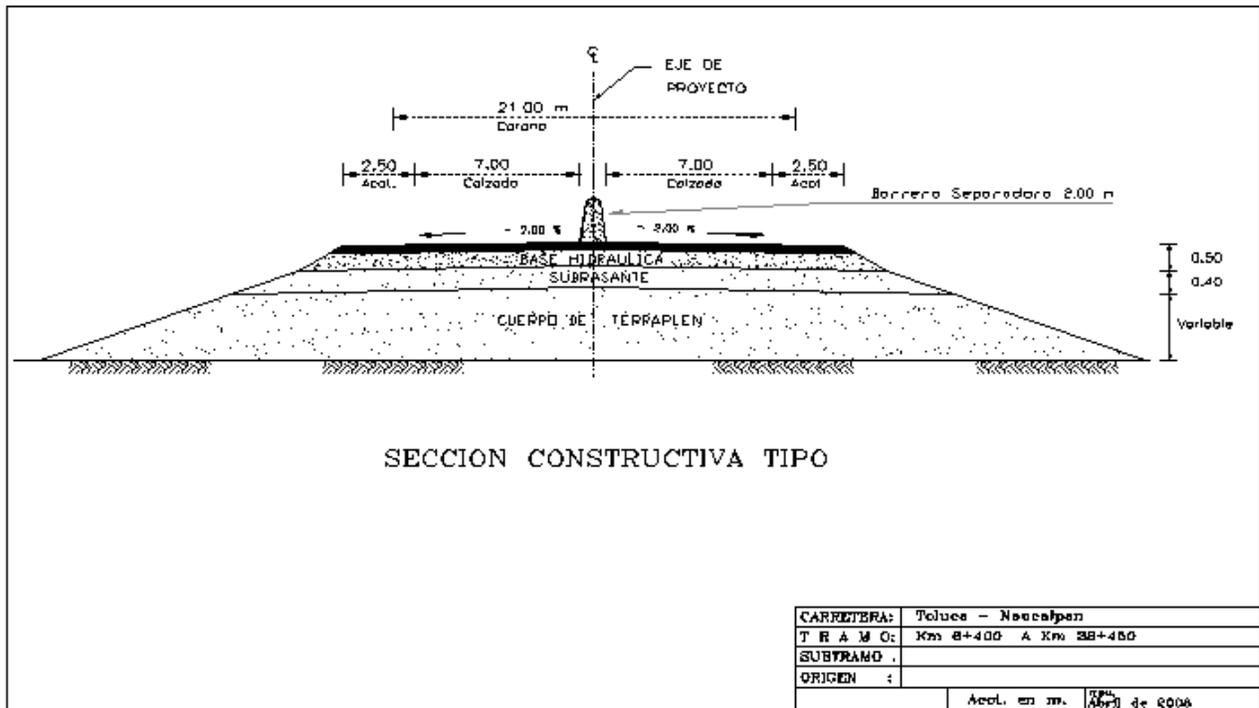


Figura 1. Sección constructiva tipo.

- IV. Inmediatamente después de efectuar el despalme, deberá retirarse el material obtenido, acarreándolo hacia los bancos de desperdicio o a los sitios asignados por la Dependencia.
- V. Los terraplenes formados en laderas con pendiente mayor de 15%, deberán empezarse a construir desde la parte inferior. Es decir, la construcción se iniciará en los cerros de aguas abajo del terraplén, formando capas horizontales.

- VI.** Para compactar los terraplenes que se formarán con los fragmentos de roca procedentes de excavaciones en roca, se deberá colocar el producto de la excavación en capas con espesor no mayor del tamaño de los fragmentos más grandes, pero en ningún caso mayor de 30 - 50 cm. (inciso 7) Compactar mediante bandeado con tractor D-9 o similar, ronceando y aplicando por lo menos 5 pasadas por cada punto de la superficie de la capa, manteniendo un regado continuo del área por compactar. (Compactación a toda agua).
- VII.** La capa subrasante deberá construirse con material seleccionado procedente de banco y deberá compactarse al 100% de su PVSM determinado en ensaye de AASHTO modificado.
- VIII.** La capa de transición deberá también construirse con material seleccionado procedente de banco, y compactado al 95 % de su PVSM determinado en ensaye de AASHTO modificado.
- IX.** En todas las uniones de corte a terraplén, deberá construirse un escalón de liga en sentido perpendicular al eje de la autopista y con un peralte mínimo de 1.10 m. y huella de 2.50 m. para alojar las capas subrasante y subyacente. Una vez abiertos dichos escalones, la Secretaría (Residencia de Construcción), determinará en cuales de ellas se colocará un dren transversal tipo zanja.
- X.** El talud del terraplén deberá afinarse como lo indica la norma 3.01.01.005-F.11
- XI.** En los análisis de precios unitarios, también deberá incluirse en los PU correspondientes, la construcción de los caminos de acceso (brechas) que sean necesarios para llegar a los bancos de desperdicio.

XII. En todas las áreas o cuencas que se formarán aguas arriba de los terraplenes, deberá cuidarse durante la construcción y al término de la misma, que no se formen encharcamientos o zonas potenciales de encharcamiento. Para ello no debe quedar ningún material de desperdicio en esas áreas, ni siquiera en forma provisional; asimismo, deben construirse las obras complementarias de canalización y encauzamiento hacia la obra de drenaje tan pronto como se detecte su necesidad durante el proceso de formación del terraplén.

2.3.2.3 Reporte fotográfico del km 3+000 al 10+000



Figura 2. Km 6+400, zona plana arcillosa.



Figura 3. Km 9+080, zona plana arcillosa



Figura 4. Km 9+080, zona plana arcillosa



Figura 5. Km 8+300. Zona plana, inundable, con material arcilloso



Figura 6. Panorámica del Km 9+080 hacia atrás.



Figura 7. Km 8+300. Zona plana, inundable, con material arcilloso



Figura 8. Panorámica del Km 8+340 hacia atrás.



Figura 9. Panorámica del Km 8+340 hacia adelante.



Figura 10. Km 9+960, zona plana arcillosa

2.3.3 Proyecto Geométrico

La siguiente tabla contiene las especificaciones con las que se proyectaron la construcción de la Autopista Toluca – Naucalpan.

Tabla 4. Características de una carretera tipo A4. Libro 2.01.01

Carretera	A4
Velocidad de proyecto	90 -110 km/h
Ancho de corona	21.00 m
Ancho de carpeta	2 de 7.00 m
Espesor de Pavimento	0.50 m
Curvatura máxima	2°45'
Pendiente máxima	6%

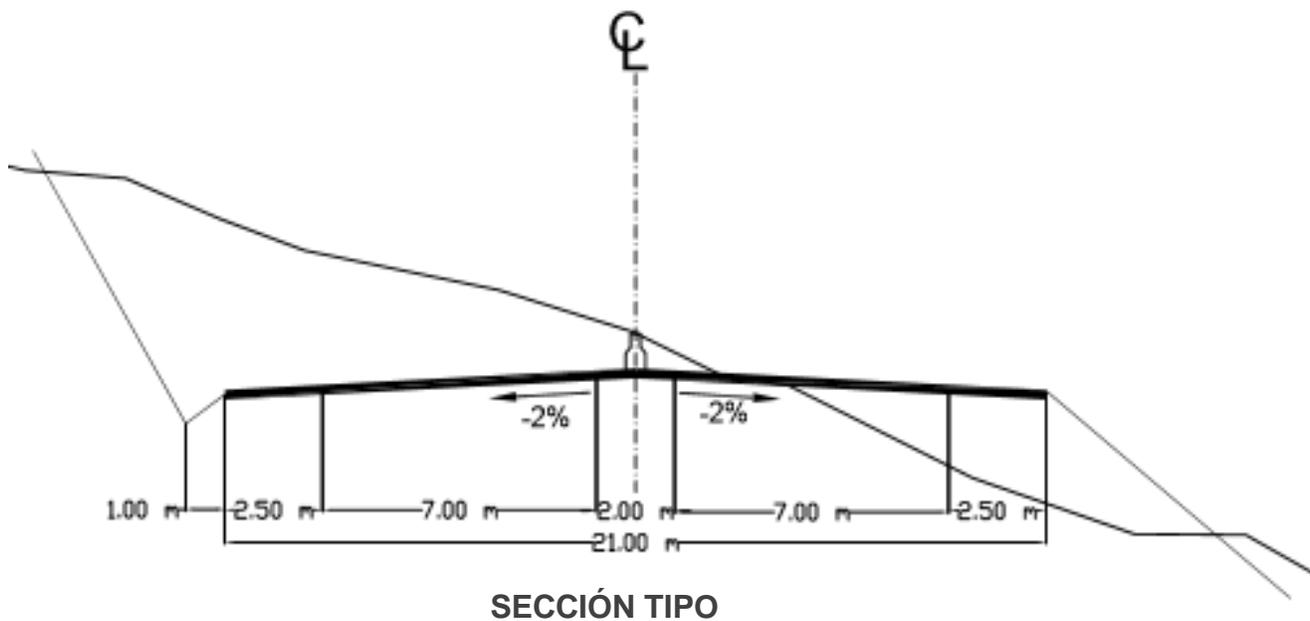


Figura 11. Sección tipo

Para la determinación de las especificaciones del proyecto se tomó como referencia las tablas siguientes proporcionadas por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes en su ejemplar de Normas y Servicios Técnicos para proyecto geométrico **CARRETERAS** Libro 2.01.01.

Tabla 5. Anchos de corona, de calzada de acotamientos y de faja separadora central. Libro 2.01.01

TIPO DE CARRETERA	ANCHOS DE					
	CORONA (m)	CALZADA (m)	ACOTAMIENTOS (m)		FAJA SEPARADORA CENTRAL (m)	
E	4.00	4.00	-		-	
D	6.00	6.00	-		-	
C	7.00	6.00	0.50		-	
B	9.00	7.00	1.00		-	
A	A2	12.00	7.00		2.50	-
	A4	22.00 MÍNIMO	2 X 7.00	EXT	INT	1.00 MÍNIMO
				3.00	0.50	
A4S	2 X 11.00	2 X 7.00	3.00	1.00	8.00 MÍNIMO	

Tabla 6. Clasificación y características de las carreteras. Libro 2.01.01

CONCEPTO		UNIDAD	TIPO DE CARRETERA																														
			E HASTA 100					D 100-500					C 500-1500					B 1500-3000					A MÁS DE 3000										
T. D. P. A		veh/día																															
TIPO DE TERRENO	MONTAÑOSO																																
	LOMERIO	-----																															
	PLANO																																
VELOCIDAD DE PROYECTO		km/h	30	40	50	60	70	30	40	50	60	70	40	50	60	70	80	90	100	50	60	70	80	90	100	110	60	70	80	90	100	110	
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE PARADA		m	30	40	55	75	95	30	40	55	75	95	40	55	75	95	115	135	155	55	75	95	115	135	155	175	75	95	115	135	155	175	
DISTANCIA DE VISIBILIDAD DE REBASE		m						135	180	225	270	315	180	225	270	315	360	405	450	225	270	315	360	405	450	495	270	315	380	405	450	495	
GRADO MÁXIMO DE CURVATURA		°	60	30	17	11	7.5	60	30	17	11	7.5	30	17	11	7.5	5.5	4.3	3.3	17	11	7.5	5.5	4.3	3.2	2.8	11	7.5	5.5	4.3	3.3	2.8	
CURVAS VERTICALES	K	CRESTA	m / %	4	7	12	23	36	3	4	8	14	20	4	8	14	20	31	45	57	8	14	20	31	43	57	72	14	20	31	43	57	72
		COLUMPIO	m / %	4	7	10	15	20	4	7	10	15	20	7	10	15	20	25	31	37	10	15	20	25	31	37	43	15	20	25	31	37	43
	LONGITUD MÍNIMA	m	20	30	30	40	40	20	30	30	40	40	30	30	40	40	50	50	60	30	40	40	50	50	60	60	40	40	50	60	60	60	
PENDIENTE GOBERNADORA		%	9	7	-	-	8	6	-	-	-	6	5	-	-	-	-	-	5	4	-	-	-	-	-	4	3	-	-	-	-		
PENDIENTE MÁXIMA		%	13	10	7	12	9	6	8	7	5	4	3	2	1	1	1	1	1	7	6	4	3	2	1	1	6	5	4	3	2	1	
LONGITUD CRÍTICA		m	VER FIGURA No IV-4					VER FIGURA No IV-4					VER FIGURA No I-4					VER FIGURA No IV-4					VER FIGURA No IV-4										
ANCHO DE CALZADA		m	4.0					6.00					6.00					7.00					A2	A4	A4S								
																							7.00	2 X 7.00	2 X 7.00								
ANCHO DE CORONA		m	4.0					6.00					7.00					9.00					12.00	>22.00	2 X 11.00								
ANCHO DE ACOTAMIENTOS		m	-					-					0.50					1.00					2.50	3.00 Ext, 0.50 Int	3.00 Ext, 1.00 Int								
ANCHO DE FAJA SEPARADORA CENTRAL		m	-					-					-					-						>1.00	>8.00								
BOMBEO		%	3					3.00					2.00					2.00					2.00										
SOBREELEVACIÓN MÁXIMA		%	10					10.00					10.00					10.00					10.00										
SOBREELEVACIÓN PARA GRADOS MENORES AL MÁXIMO		%	VER TABLA No. IV 5.1					VER TABLA No. IV 5.1					VER TABLA No. IV 5.2					VER TABLA No. IV 5.3					VER TABLA No. IV 5.4										
AMPLIACIONES Y LONGITUDES MÍNIMAS DE TRANSICIÓN		m	VER TABLA No. IV 5.1					VER TABLA No. IV 5.1					VER TABLA No. IV 5.2					VER TABLA No. IV 5.3					VER TABLA No. IV 5.4										

Tabla 7. Ampliaciones, sobreelevaciones y transiciones para carretera tipo A (A4S y A4). Libro 2.01.01

VELOCIDAD		70						80						90						100						110					
Gc	Rc	Ac		Sc	Le		Ac		Sc	Le		Ac		Sc	Le		Ac		Sc	Le		Ac		Sc	Le						
		A4S	A4		A4S	A4	A4S	A4		A4S	A4	A4S	A4		A4S	A4	A4S	A4		A4S	A4	A4S	A4		A4S	A4	A4S	A4			
0°15'	4583.68	0	20	2.00	39	67	0	20	2.00	45	76	0	30	2.00	50	86	0	30	2.00	56	95	0	30	2.00	62	105					
0°30'	2291.84	20	30	2.00	39	67	20	30	2.00	45	76	20	40	2.00	50	86	20	40	2.30	56	95	20	50	2.70	62	105					
0°45'	1527.89	20	40	2.00	39	67	20	40	2.30	45	76	30	50	2.80	50	86	30	60	3.40	56	95	30	60	4.00	62	105					
1°00'	1145.92	20	50	2.50	39	67	30	50	3.00	45	76	30	60	3.60	50	86	30	70	4.50	56	95	30	70	5.20	62	105					
1°15'	916.14	30	50	3.00	39	67	30	60	3.70	45	76	40	60	4.50	50	86	40	70	5.50	56	95	40	80	6.30	62	105					
1°30'	763.94	30	60	3.50	39	67	30	60	4.40	45	76	40	70	5.30	50	86	40	80	6.40	56	95	40	90	7.30	64	109					
1°45'	684.81	30	60	4.10	39	67	40	70	5.00	45	76	40	80	6.10	50	86	40	90	7.30	58	99	50	100	8.10	71	121					
2°00'	572.96	30	70	4.60	39	67	40	80	5.70	45	76	40	90	6.70	50	86	50	90	8.10	65	110	50	100	8.90	78	133					
2°15'	509.30	40	80	5.10	39	67	40	90	6.20	45	76	50	100	7.30	53	89	50	100	8.70	70	118	60	110	9.40	83	141					
2°30'	458.37	40	80	5.50	39	67	50	90	6.80	45	76	50	100	7.90	57	97	60	110	9.20	74	125	60	120	9.80	86	147					
2°45'	416.70	40	80	6.00	39	67	50	90	7.30	47	79	50	110	8.40	60	103	60	110	9.60	77	131	60	120	10.00	88	150					
3°00'	381.97	50	90	6.40	39	67	50	100	7.70	49	84	60	110	8.80	63	108	60	120	9.90	79	135										
3°15'	352.40	50	90	6.70	39	67	50	110	8.10	52	88	60	120	9.20	66	113	60	130	10.00	80	136										
3°30'	327.40	50	100	7.10	40	68	60	110	8.50	54	92	60	120	9.60	69	118															
3°45'	305.58	50	110	7.50	42	71	60	120	8.80	56	96	60	130	9.80	71	120															
4°00'	286.48	50	110	7.80	44	74	60	120	9.10	58	99	70	130	9.90	71	121															
4°15'	269.63	60	110	8.10	45	77	60	130	9.40	60	102	70	140	10.00	72	122															
4°30'	254.65	60	120	8.40	47	80	70	130	9.60	61	104																				
4°45'	241.25	60	120	8.70	49	83	70	140	9.70	62	106																				
5°00'	229.28	60	130	8.90	50	85	70	140	9.90	63	108																				
5°15'	218.27	60	130	9.10	51	87	80	140	10.00	63	108																				
5°30'	208.35	70	140	9.30	52	89	80	150	10.00	64	109																				
5°45'	199.29	70	140	9.50	53	90																									
6°00'	190.99	70	150	9.60	54	91																									
6°15'	183.35	70	150	9.70	54	92																									
6°30'	176.29	80	160	9.80	55	93																									
6°45'	169.77	80	160	9.90	55	94																									
7°00'	163.70	80	160	9.90	55	94																									
7°15'	158.06	80	160	10.00	56	95																									
7°30'	152.79	80	170	10.00	56	95																									

2.3.4 Características generales de los alineamientos horizontal y vertical

En el alineamiento horizontal se tienen curvas con un grado máximo de curvatura de $1^{\circ} 30'$ en espiral, así como en el alineamiento vertical, pendientes entre 0.0 % y máxima de 3.24 %.

2.3.5 Falla del terraplén km 8 + 000 al km 8 + 300

Las siguientes fotografías se observa la falla del terraplén de 6.7 m de altura.



Figura 12. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300



Figura 13. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300



Figura 14. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300



Figura 15. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300



Figura 16. Falla del terraplén km 8+000 al 8+300

2.3.6 Estudios realizados en el tramo que falló.

Estudio de mecánica de suelos para definir el terraplén estable del km 8+000 al km 8+300 de la autopista Toluca-Naucaupan, Edo de México la empresa SERICAL S. A. de C.V da el lugar donde ocurrió la falla

2.3.6.1 Introducción

Con estos datos la **Empresa SERICAL, S. A. de C. V.**, elaboró el estudio de mecánica de suelos.

Carretera	A4
Velocidad de proyecto	90-110 km/h
Ancho de corona	21 m
Ancho de carpeta	2 a 7 m
Espesor de subbase, base	0.50 m

Durante la etapa constructiva se presentó una falla del terraplén (21/Abril/2010) que se ubica entre los cadenamientos km 8+000 y km 8+260, que se manifestó en agrietamientos y deformaciones superficiales.

2.3.6.2 Localización y descripción del sitio

La zona de interés se localiza hacia el suroeste del poblado de San Nicolás Peralta y al noroeste de Santa María Atarasquillo, del municipio Lerma de Villada, en el estado de México (Figs. 01 y 02). El tramo problemático se ubica en la coordenada UTM: X=447865, Y=2139146.

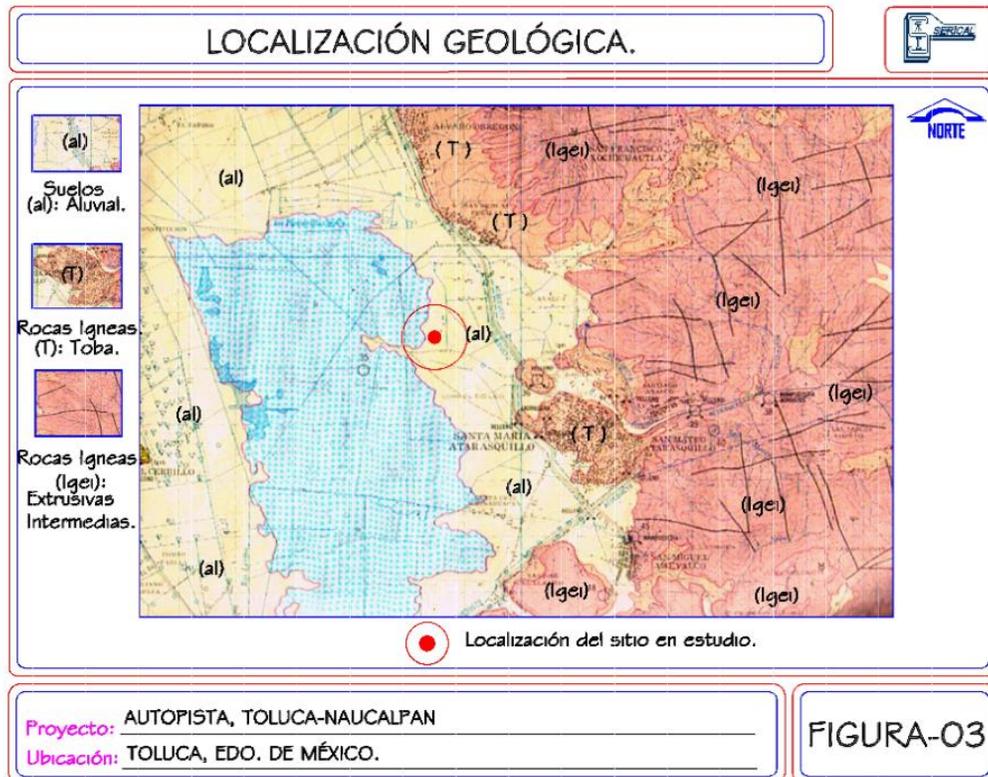


1.Figura Serical 1. Ubicación del sitio.



2.Figura Serical 2. Localización aérea del sitio.

El área de estudio se encuentra comprendida en la carta geológica 1:50,000 “Toluca E14A38, Tercera Impresión 1984”, del sitio web del INEGI, de la que se desprende que se ubica sobre suelos aluviales, flanqueados hacia el este por elevaciones armadas en tobas y andesitas (Fig. 03).



Carta de INEGI E14A38, Escala 1:50,000, Año 1984.

3. Figura Serical 3. Localización geológica.

Con base en la regionalización sísmica de la república mexicana, se determinó gráficamente que se localiza en la zona “B”, que se tipifica como de intensidad sísmica baja a media (Fig. 04).

Proyecto: AUTOPISTA TOLUCA-NAUCALPAN

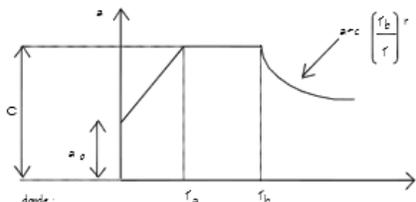
Ubicación: TOLUCA, EDO. DE MÉXICO.



UBICACIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

ESPECTROS DE DISEÑO PARA ESTRUCTURAS COMUNES						
Zona Sísmica	Modo de suelo	α	β	T_a (seg)	T_b (seg)	γ
A	I	0.05	0.05	0.2	0.4	1
	II	0.04	0.04	0.2	0.4	1.2
B	I	0.04	0.04	0.2	0.4	1
	II	0.03	0.03	0.2	0.4	1.2
C	I	0.03	0.03	0.2	0.4	1
	II	0.02	0.02	0.2	0.4	1.2
D	I	0.02	0.02	0.2	0.4	1
	II	0.01	0.01	0.2	0.4	1.2
E (Observatorio Catorce de Reyes)	I	0.01	0.01	0.2	0.4	1
	II	0.005	0.005	0.2	0.4	1.2

donde:
 I Corresponde a terreno FIENIE
 II Corresponde a terreno NIVENMEDIO
 III Corresponde a terreno BLANCO



donde:
 a Ordenada espectral
 a0 Ordenada espectral para $T = 0$
 c Coeficiente sísmico básico
 γ Exponente adimensional
 T Período natural de la estructura o uno de sus modos, en segundos
 T_a, T_b Períodos naturales que definen la forma del espectro, en segundos

REGIONALIZACIÓN SÍSMICA DE MÉXICO

FIGURA-04

4. Figura Serical 4. Localización sísmica del México

2.3.6.3 Datos de proyecto

Al presentarse el colapso del terraplén en construcción, tenía un espesor de 6.70 m, con base de 48.80 m, corona de 28.70 m y taludes 1.5:1. Posterior a la falla y durante la ejecución del presente estudio se modificaron las secciones de proyecto, las cuales tendrán en promedio una altura de 2.50 m, base de 30.50 m, corona de 23 m y taludes 1.5:1.

La información proporcionada indica que el pavimento tendrá un espesor de subbase más base de 0.50 m y la carpeta asfáltica de 0.05 m, para un total de 0.55 m.

Se consideró una carga viva de 1.50 ton/m², determinada a partir de la figura 5 del “Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 66.5, para el análisis transversal o tridimensional de puentes y estructuras similares”, contenida en la Norma SCT N-PRY-CAR-6-01-003/01.

A partir de los datos descritos se efectuó el análisis de estabilidad del terraplén, determinando la capacidad de carga admisible, resistencia al deslizamiento lateral, estabilidad general y asentamientos.

Adicionalmente a las secciones de falla y modificadas, se realizaron análisis para determinar la máxima altura de terraplén estable.

2.3.6.4 Exploración geotécnica

La exploración del subsuelo consistió en la ejecución de seis (6) sondeos mixtos, que se ubicaron dentro de la zona de interés, de común acuerdo con la supervisión del proyecto (*Figura - 05 Anexo1 Serical*).

Los sondeos profundos realizados fueron del tipo mixto continuo (*Fotos 01 – 06*, trabajos realizados en campo). El muestreo alterado se efectuó con la herramienta de penetración estándar, lo que permitió obtener muestras alteradas representativas, además de medir el índice de resistencia a la penetración (N) mediante el número de golpes en la prueba SPT (Standard Penetration Test).



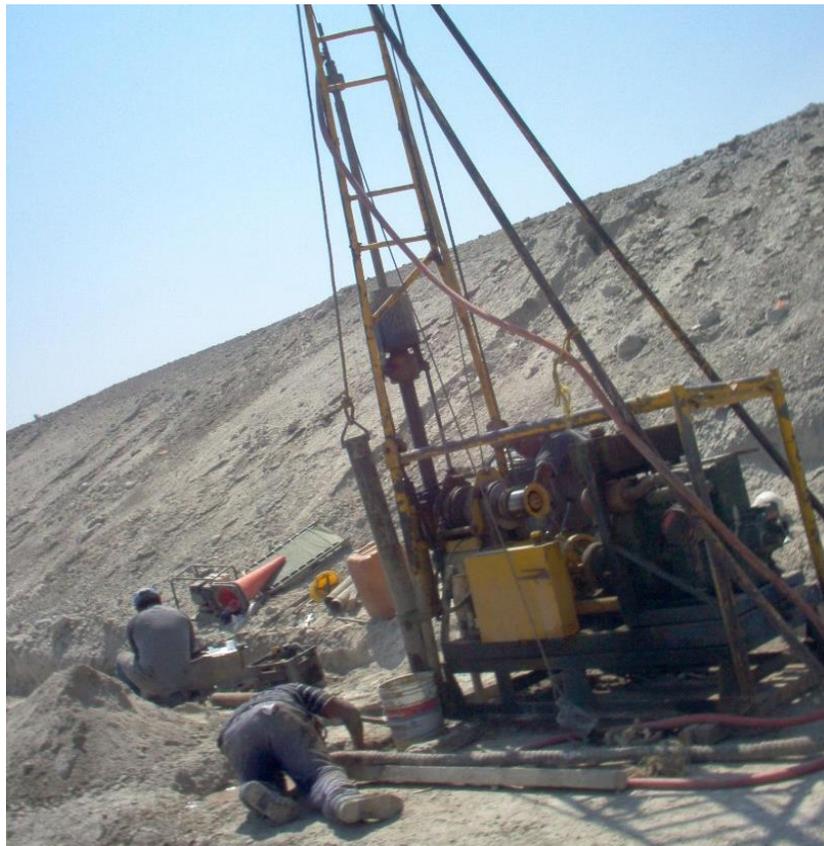
5. Foto 01. Sondeo mixto 1 (SM-1)



6. Foto 02. Sondeo mixto 2 (SM-2)



7. Foto 03. Sondeo mixto 3 (SM-3)



8. Foto 04. Sondeo mixto 4(SM-4)



9. Foto 05. Sondeo mixto5 (SM-5)



10. Foto 06. Sondeo mixto 6 (SM-6)

Las características de los sondeos mixtos son las siguientes:

Tabla Serical 1. Características de los sondeos.

Sondeo No.	Localización	Elevación del brocal	Profundidad alcanzada	Profundidad de agua freática
	(Km)	(m)	(m)	(m)
SM-1	7+900 (L/C)	2569.754	19.50	0.00
SM-2	8+290 (L/C)	2569.027	23.25	1.70
SM-3	8+120 (L/I)	2569.610	24.25	0.95
SM-4	8+180 (L/D)	2571.130	23.90	0.27
SM-5	8+160 (L/C)	2573.840	34.80	8.20
SM-6	7+695 (L/C)	2568.930	25.70	0.30

De cada sondeo se levantó el perfil estratigráfico a detalle, definiendo con precisión los espesores de cada capa de suelo encontrada.

Los resultados obtenidos durante la exploración, en cuanto a la resistencia a la penetración estándar, al tipo, ubicación de las muestras y características de los materiales muestreados, se presentan gráficamente en las Figuras 06 a la 11 “Anexo 1 Serical”.

2.3.6.5 Ensayes de laboratorio

Las pruebas realizadas fueron las siguientes:

- Clasificación SUCS.
- Contenido natural de agua.
- Granulometría por mallas o porcentaje de finos.
- Límites de consistencia.

- Peso volumétrico natural.
- Grado de saturación.
- Relación de vacíos.
- Compresión triaxial no consolidada no drenada (UU).
- Consolidación unidimensional.

Los perfiles estratigráficos de los pozos a cielo abierto, definidos mediante los trabajos de campo y laboratorio, se muestran gráficamente en las Figuras 06 a la 11 “Anexo 1 Serical”. Se incluye la descripción y clasificación de los materiales encontrados con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), los resultados gráficos de los límites de plasticidad, los resultados numéricos de los ensayos granulométricos de porcentaje de grava, arena y finos, y los resultados numéricos de las pruebas de resistencia.

En el “Anexo 2 Resultados de Laboratorio” se presentan las carátulas de los ensayos de laboratorio realizados, que incluyen las curvas esfuerzo deformación y diagrama de Mohr para las pruebas triaxiales y las tablas resumen de resultados.

2.3.6.6 Descripción geotécnica

Con base en los resultados obtenidos de la exploración de campo y ensayos de laboratorio realizados, se estableció que la estratigrafía encontrada hasta la máxima profundidad explorada corresponde superficialmente a la de suelos aluviales muy blandos, que cubren a suelos aluviales duros.

En los sondeos se detectó material de terraplén con espesores variables, desde 1.20 a 7.80 m. El terraplén compactado (SM-5) presenta número de golpes variable entre 21 y más de 50 en prueba de penetración estándar.

Subyaciendo al terraplén se localiza el terreno natural, que consiste en dos capas de arcilla que en conjunto presentan un espesor promedio de 11.80 m. La capa superior es de color café oscuro, orgánico, en general de consistencia muy blanda y blanda. La capa inferior es de color gris verdoso y de consistencia general muy blanda.

Por debajo de las capas de arcilla se ubica una sucesión de arcillas y limos arenosos de color gris verdoso, de consistencia muy firme y dura. Los limos cubren a capas arenolimosas, de color gris verdoso, compactas.

En la Figura 12 Anexo 1 Serical se muestra la sección estratigráfica obtenida del conjunto de sondeos realizados.

Se obtuvo que el contenido de agua “w” de las capas de arcilla está comprendido entre 100 y 400%, con relación de vacíos “e” comprendida entre 1.533 y 8.226. Peso volumétrico natural “ γ_m ” entre 1.072 y 1.534 ton/m³.

De prueba triaxial no consolidada no drenada (UU), se obtuvo que la cohesión “c” es variable de 0.8 a 3.8 ton/m², con ángulo de fricción interna “ ϕ ” de 1.0 a 7.00.

Por las características del subsuelo en el predio (Tipo III, suelo intermedio), su ubicación dentro de la zonificación sísmica de la república mexicana (Zona B, intensidad sísmica baja a media) y considerando que el terraplén se trata de una estructura del Grupo B), para fines de diseño se recomienda asignar un coeficiente sísmico básico “c” de 0.36.

La estratigrafía y propiedades mecánicas que se proponen para diseño geotécnico, se muestran en la memoria de cálculo.

2.3.6.7 Análisis de estabilidad

Para el análisis de estabilidad del terraplén se revisaron principalmente 4 mecanismos potenciales de falla:

- A) Falla por capacidad de carga del suelo de desplante.
- B) Inestabilidad global con propagación de la falla, dentro y a través del suelo de desplante.
- C) Corrimiento lateral del terraplén.
- D) Asentamientos.

La memoria de cálculo se realizó siguiendo los lineamientos indicados en el capítulo 8, tomo I del “Manual de Construcción Geotécnica”, Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos A. C. México, (2002).

- A) Capacidad de carga

Con la estratigrafía y propiedades mecánicas propuestas para diseño geotécnico, se calculó que el terraplén actual es inestable por capacidad de carga, sin considerar aún la

altura final de proyecto original y las cargas adicionales que representan el pavimento y las cargas vivas. Mientras que para las alturas modificadas de terraplén, con promedio de 2.50 m, considerando el peso del pavimento y la carga viva, el terraplén resulta estable por capacidad de carga.

Se calculó además la altura máxima para la cual sería estable el terraplén, considerando el peso del pavimento y la carga viva. La altura máxima de terraplén estable por capacidad de carga es de 3.50 m. Aquí se considera que a mediano plazo, por el efecto de consolidación de las arcillas blandas del lugar, se tendrán factores de seguridad mayores a los calculados.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla Serical 2. Factor de seguridad contra falla por capacidad de carga.

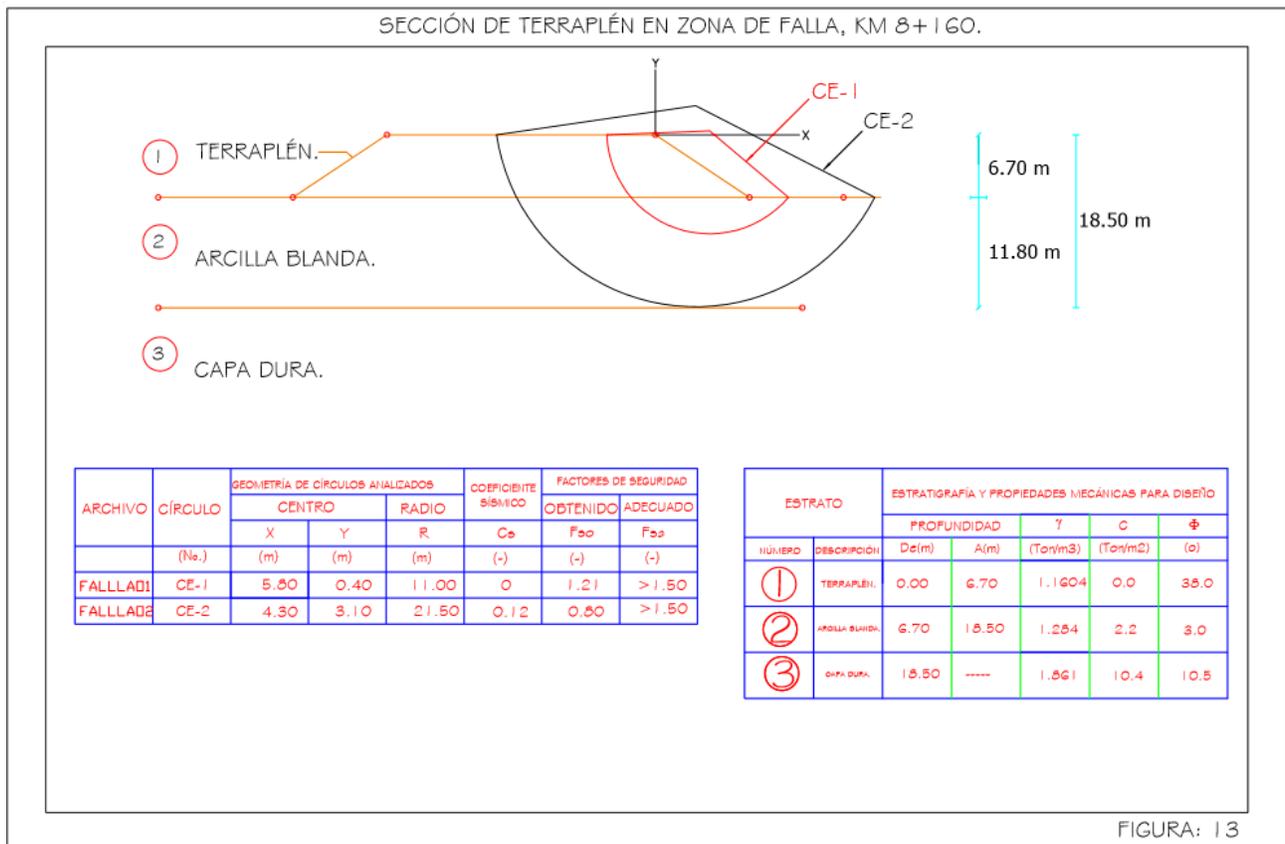
Altura terraplén “H” (m)	FACTOR DE SEGURIDAD CONTRA FALLA POR CAPACIDAD DE CARGA (F.S.)		
	Interface		
	Lisa	Medianamente lisa	Áspera
6.70	0.87	1.01	1.16
3.50	1.07	1.24	1.40
2.50	1.32	1.52	1.72

B) Inestabilidad global

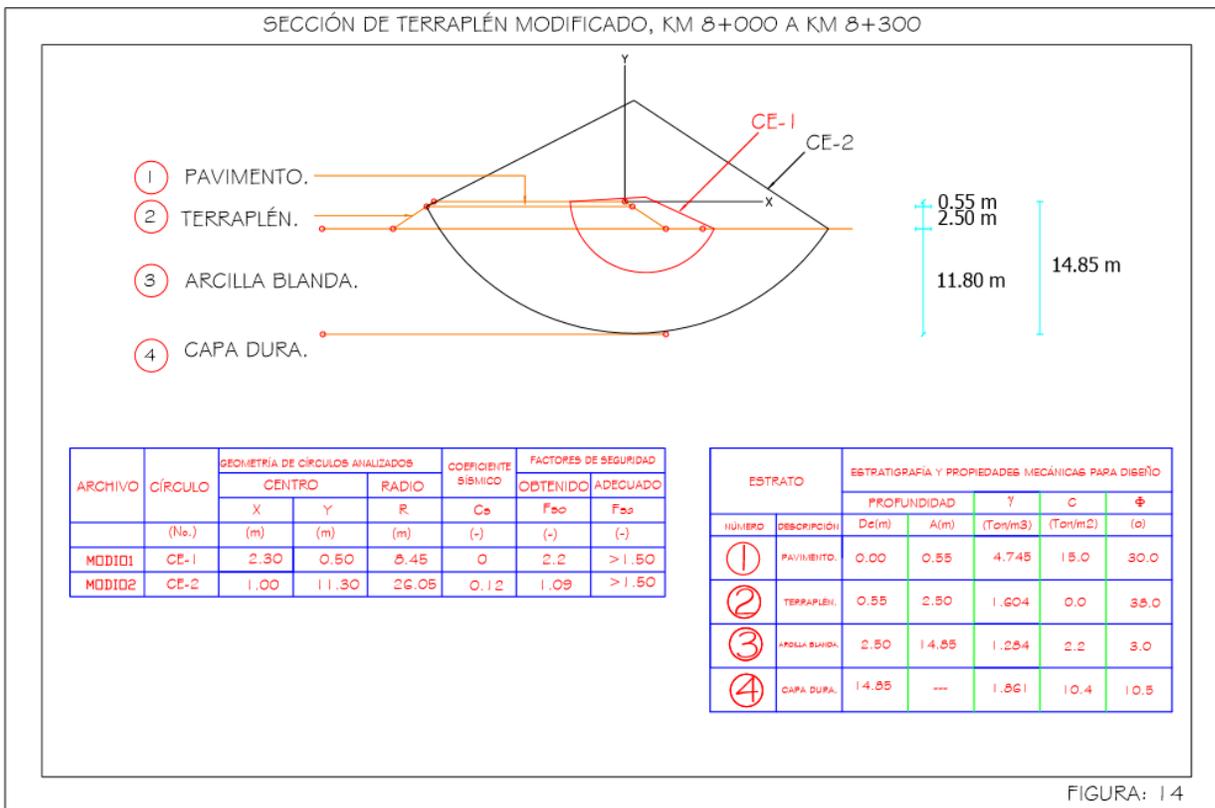
Para determinar cuál es su procesamiento se necesitó investigar la estabilidad global, se utilizó el programa de cómputo denominado “ESTÁBILI” en su “VERSIÓN 2.0”, que permite calcular la estabilidad de un talud en materiales térreos con base en el método de Fellenius.

Calcula el factor de seguridad “FS” de taludes homogéneos, con estratificación horizontal o inclinada de prácticamente cualquier geometría. Las limitaciones más importantes radican fundamentalmente en las impuestas por el mismo método de Fellenius y en sus hipótesis de desarrollo.

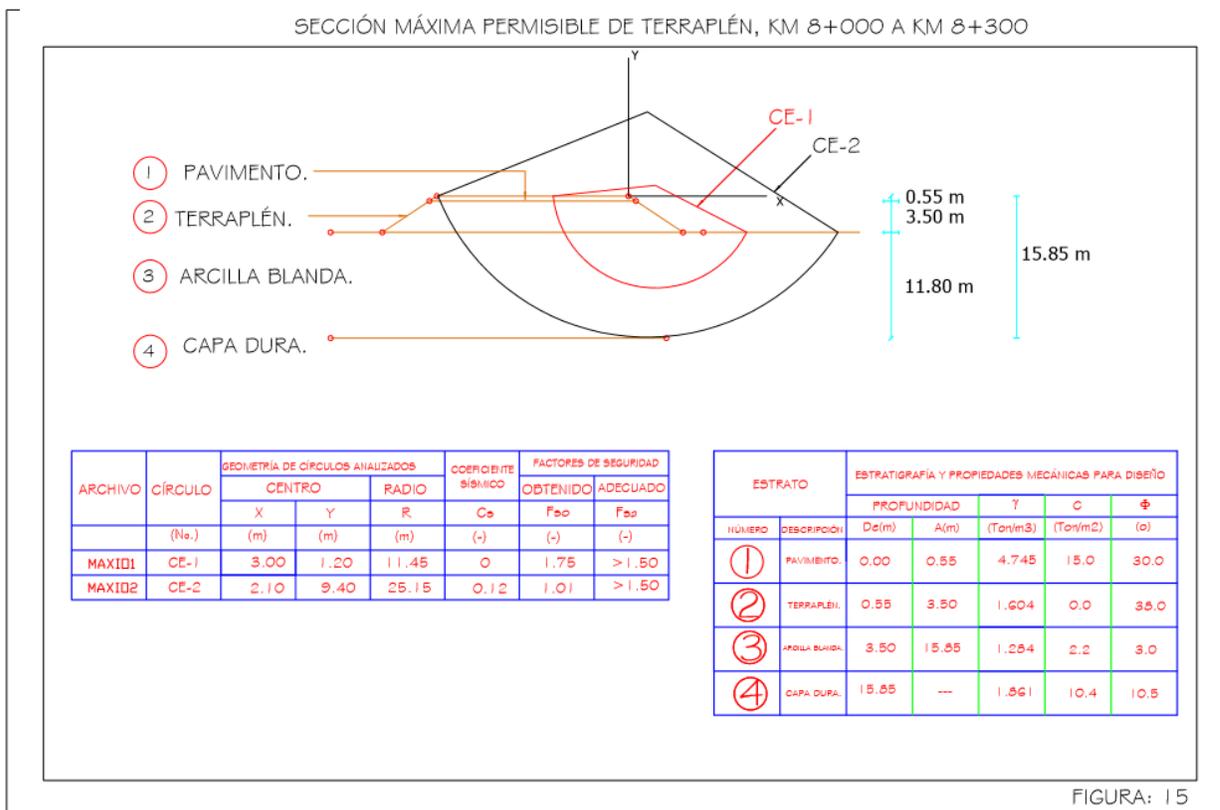
Las secciones analizadas corresponden a las alturas de terraplenes de 6.70, 3.50 y 2.50 m. La estratigrafía y propiedades mecánicas utilizadas corresponden a las indicadas en la memoria de cálculo. En las Figuras 13 a 15, se muestran las secciones analizadas y los círculos de falla críticos.



11. Figura Serical 13. Sección de terraplén en zona de falla, km 8+160.



13. Figura Serical 14. Sección máxima permisible de terraplén, km 8+000 a 8+300.



12. Figura Serical 15. Sección de terraplén modificado, km 8+000 a 8+300.

Para el terraplén de 6.70 m de altura, en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad contra falla de talud de 1.21. En condiciones sísmicas el factor de seguridad es de 0.80. Ambos valores se consideran insuficientes para la estabilidad del talud a corto, mediano y largo plazo.

Para el terraplén de 3.50 m de altura máxima, en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad contra falla de talud de 1.75. En condiciones sísmicas el factor de seguridad es de 1.01. En condiciones estáticas el factor de seguridad se considera suficiente para la estabilidad del talud a corto, mediano y largo plazo.

Para el terraplén de 2.50 m de altura, en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad contra falla de talud de 2.20. En condiciones sísmicas el factor de seguridad es de 1.09. Ambos valores se consideran suficientes para la estabilidad del talud a corto, mediano y largo plazo.

Corrimiento lateral

Los factores de seguridad contra corrimiento lateral del terraplén, con altura de 8.60 m, son los siguientes:

Para terraplén de 6.70 m de altura:

Para que terraplén deslice sobre del refuerzo, F.S. = 2.30.

Para que terraplén deslice sobre suelo de desplante, F.S. = 2.85.

Los factores de seguridad son adecuados, e indican que el terraplén no desliza

Para terraplén de 3.50 m de altura:

Para que terraplén deslice sobre del refuerzo, F.S. = 1.81.

Para que terraplén deslice sobre suelo de desplante, F.S. = 5.66.

Los factores de seguridad son adecuados, e indican que el terraplén no desliza.

Para terraplén de 2.50 m de altura:

Para que terraplén deslice sobre del refuerzo, F.S. = 1.51.

Para que terraplén deslice sobre suelo de desplante, F.S. = 8.41.

Los factores de seguridad son adecuados, e indican que el terraplén no desliza.

Asentamientos

Para el terraplén de 2.50 m de altura promedio, los asentamientos en el eje del terraplén serán del orden de 64 cm, para una descarga (Carga muerta) al suelo de cimentación de 5.12 ton/m². Dado que este valor es de gran magnitud, resulta conveniente

que el proceso constructivo contemple períodos prolongados (mínimo 6 meses) entre la construcción del terraplén y la sección estructural del pavimento, para que se lleve al cabo el proceso de consolidación y posteriormente efectuar renivelaciones.

Para terraplenes de mayor altura, los asentamientos se consideran inadmisibles.

Conclusiones y recomendaciones

Las conclusiones y recomendaciones, que se derivan del estudio de mecánica de suelos, realizado para la autopista Toluca-Naucalpan, en el tramo comprendido entre el km 8+000 y km 8+300, localizado en el municipio de Lerma de Villada, Edo. de México, son las siguientes:

Desde el punto de vista geológico, el proyecto se ubica en una zona de suelos aluviales arcillosos de consistencia muy blanda, que cubren hasta la profundidad alcanzada por la exploración realizada, a suelos aluviales arcillo arenosos y limos arenosos de consistencia dura y arena limosos compactos.

Los suelos arcillosos muy blandos tienen un espesor promedio de 11.80 m, definido mediante la ejecución de seis sondeos mixtos con profundidades comprendidas entre 19.50 y 34.80 m, que se ubicaron como se indica en la Figura 05 “Anexo 1 Serical”. En la Figura 12 “Anexo 1 Serical” se muestra la sección estratigráfica por el eje longitudinal del terraplén estudiado.

Para el coeficiente sísmico básico “c”, se recomienda adoptar el valor de 0.36.

El nivel de agua freática se detectó prácticamente superficial.

El terraplén de 6.70 m de altura, que manifestó fallamientos, es inestable por capacidad de carga. Respecto a la estabilidad global, los factores de seguridad resultan insuficientes en condiciones estáticas y sísmicas. Es estable contra deslizamiento lateral. Los asentamientos por consolidación, que induciría al estrato arcilloso, serían mayores a 1.30 m.

Para terraplén de 3.50 m de altura, se calculó que es la máxima altura de terraplén estable por capacidad de carga, considerando que a mediano plazo mejorarán las propiedades mecánicas de la arcilla compresible. Respecto a la estabilidad global, el factor

de seguridad en condiciones estáticas resulta suficiente; en condiciones sísmicas el factor de seguridad es insuficiente. Es estable contra deslizamiento lateral. Los asentamientos por consolidación, que induciría al estrato arcilloso, serían del orden de 1.00 m.

Para terraplén de 2.50 m de altura (Sección modificada), la sección es estable por capacidad de carga. Respecto a la estabilidad global, los factores de seguridad en condiciones estáticas sísmicas resultan suficientes. Es estable contra deslizamiento lateral. Los asentamientos por consolidación, que induciría al estrato arcilloso, serían del orden de 63 cm.

Se recomienda que el terraplén tenga una altura promedio de 2.50 m y de forma extraordinaria, se permitirá en tramos cortos, alturas hasta de 3.50 m.

Se recomienda que durante la construcción de la autopista, se permita un intervalo de al menos 6 meses, entre la finalización del terraplén y la construcción de la sección estructural del pavimento, con la finalidad de propiciar la generación de los asentamientos pronosticados y posteriormente facilitar la renivelación de las terracerías.

2.4 ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA

2.4.1 Causas

La falta de un estudio geotécnico bien elaborado al inicio del proyecto y trazo de la carretera en atención a la normativa de la S. C. T. y en especial a las normas N-PRY-CAR-1-03-001/00 y PRY-CAR-1-03-002/00.

Con el estudio de mecánica de suelos llevado a cabo por la empresa SERICAL, S. A. de C. V., se obtuvieron los siguientes datos:

Se obtuvo que el contenido de agua “w” de las capas de arcilla está comprendido entre 100 y 400 %.

Las secciones analizadas corresponden a las alturas de terraplenes de 6.70, 3.50 y 2.50 m. La estratigrafía y propiedades mecánicas utilizadas corresponden a las indicadas en la memoria de cálculo

Para el terraplén de 6.70 m de altura, en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad contra falla de talud de 1.21. En condiciones sísmicas el factor de seguridad es de

0.80. Ambos valores se consideran insuficientes para la estabilidad del talud a corto, mediano y largo plazo.

Para el terraplén de 3.50 m de altura máxima, en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad contra falla de talud de 1.75. En condiciones sísmicas el factor de seguridad es de 1.01. En condiciones estáticas el factor de seguridad se considera suficiente para la estabilidad del talud a corto, mediano y largo plazo. En condiciones sísmicas el factor de seguridad se considera insuficiente para la estabilidad del talud a corto plazo, pero podría ser adecuado a mediano y largo plazo, considerando que el estrato arcilloso blando se consolida por el peso del terraplén y mejore sus características mecánicas por lo que se deberá tener un mayor cuidado en las alturas del terraplén.

Para el terraplén de 2.50 m de altura, en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad contra falla de talud de 2.20. En condiciones sísmicas el factor de seguridad es de 1.09. Ambos valores se consideran suficientes para la estabilidad del talud a corto, mediano y largo plazo

Para el terraplén de 2.50 m de altura promedio, los asentamientos en el eje del terraplén serán del orden de 64 cm, para una descarga (Carga muerta) al suelo de cimentación de 5.12 ton/m². Para terraplenes de mayor altura, los asentamientos se consideran inadmisibles, por lo que se debe tener mucho cuidado en los terraplenes mayores de 2.50 m.

2.4.2 Perfil estratigráfico de todo el tramo en estudio

Este estudio se llevó a cabo una vez que se tuvieron los resultados del laboratorio SERICAL S. A. de C.V en diciembre del 2010.

2.4.2.1. Informe RVO y Cía. S. A de C. V,

2.4.2.1.1. Introducción

Como parte de la modernización de la red troncal de carreteras de Estado de México, el Gobierno del estado está construyendo la Autopista Toluca-Naucalpan.

En el tramo comprendido entre los km 4+500 y 10+000 del trazo de dicha autopista, se encuentra un terreno plano con algunas zonas de inundación, donde estudios geotécnicos realizados por las empresas INDISA (2010), JESA (2010), SERICAL (2010) y SABA

(2010), han señalado la presencia de arcilla (CH) y limo (MH) blandos de origen lacustre, hasta 30 m de profundidad en promedio, siendo aproximadamente los primeros 10 m a lo largo de todo el tramo, materiales arcillosos que contienen materia orgánica.

Teniendo en cuenta que se trata de una zona de depósitos lacustres compresibles y de baja capacidad de carga, donde se proyecta la construcción de terraplenes hasta 11 m de altura, se le encomendó a RVO y Cía. la revisión de su estabilidad ante condiciones de falla y de servicios de dichos terraplenes.

- **Antecedentes y objetivos**

Dadas las condiciones de los materiales blandas lacustres del tramo de interés del proyecto, el estudio geotécnico tiene la finalidad de evaluar los estados límites de falla y de servicio de los terraplenes del proyecto, así como de las obras de los caminos secundarios que cruzan la vía principal (Toluca-Naucalpan) para diferentes cargas aplicadas al terreno y definir las recomendaciones constructivas pertinentes.

- **Descripción general de la zona**

- Localización del sitio.

El sitio en estudio se proyecta entre el km 4+500 y km 10+000 de la Autopista Toluca- Naucalpan, en el Estado de México, entre las coordenadas UTM X=449379, Y=2140040 y X=445088, Y=2136623 (Figura 1, Anexo 3 RVO y Cia)

- Fisiografía

El Estado de México se localiza dentro de la provincia del Eje Neo-volcánico Transversal (Figura 2, Anexo RVO), en el que a su vez se encuentran áreas que pertenecen a tres subprovincias de esta región fisiográfica: Mil Cumbres, Llanos y Sierras de Querétaro e Hidalgo, Lagos y Volcanes de Anáhuac.

Subprovincia Mil Cumbres

Penetra en el occidente del estado de México, ocupa 6.49% (1,508.481 km²) de la superficie total estatal y abarca completamente el municipio de El Oro, y partes de los de Amanalco, Donato Guerra, Jocotitlán, San Felipe del Progreso, Temascalcingo, Temascaltepec,

Valle de Bravo, Villa de Allende y Villa Victoria. El sistema de topofomas más importante en la entidad es el de lomeríos de colinas redondeadas con mesetas de basalto.

Se presentan once tipos de suelo en la subprovincia, entre los que dominan el andosol húmico y el andosol órtico, suelos derivados de cenizas volcánicas, muy ligeros y con alta capacidad de retención de agua.

Subprovincia de los Llanos y Sierras de Querétaro e Hidalgo

La subprovincia penetra en tres puntos de la parte norte del estado de México y cubre 1,415.294 km² (6.08% de la superficie total de la entidad). Los municipios que quedan dentro de esta son: Polotitlán y Soyaniquilpan (completos) y parte de Jilotepec, Aculco, Acambay, Chapa de Mota y Hueypoxtla. Únicamente se presentan cuatro sistemas de topofomas: la sierra de laderas tendidas (es un sistema en el que las laderas del macizo montañoso son tendidas, al menos en alguno de sus lados), los escudo-volcanes aislados o en conjunto (son volcanes apartados y de poca altura), la llanura de pico rocoso (es una llanura de aluviones profundos), y el lomerío de colinas redondeadas (sistema formado por lomas suaves, redondeadas).

La diversidad de suelos no es muy grande, sin embargo, se caracterizan por ser muy fértiles y aptos para la agricultura y la ganadería.

Subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac

Esta subprovincia ocupa 14,315.69 km² (61.6% de la superficie total del Estado de México), abarcando 84 municipios en su totalidad y 18 parcialmente. Es dentro de esta última subprovincia donde se encuentra el área objeto del presente estudio.

- Geología del área de estudio

El predio en cuestión se ubica en las planicies aluviales del ejido Emiliano Zapata, a escasos 1.5 km al SE del aeropuerto de la ciudad de Toluca y 750 m al sur del cráter volcánico llamado genéricamente “El Cerrillo”, donde se asienta la comunidad que lleva el mismo nombre, el cual está constituido por derrames volcánicos principalmente de

composición básica, así como tobas arenosas que se encuentran bordeando este edificio volcánico del cuaternario.

La Figura 3 Anexo 3 RVO y Cia, muestra el mapa geológico de la cuenca de Toluca, la cual está constituida por seis unidades geológicas principales las cuales se describen a continuación:

Qal: Depósitos aluviales del Cuaternario, constituidos por abanicos aluviales y depósitos de Piamonte, con potentes intercalaciones de material piroclástico. Estos abanicos bordean el margen de los antiguos lagos y planicies.

QV: Vulcanitas félsicas del Cuaternario, conformadas por derrames basálticos, los cuales constituyen los edificios volcánicos más jóvenes de la cuenca, unidad geológica a la que corresponde el edificio volcánico llamado El Cerrillo.

QT: Tobas y depósitos de flancos, unidad constituida por lavas y tobas basálticas encontradas principalmente en el cerro de Tlazala.

T: Formación Tarango, unidad geológica constituida por tobas, aglomerados, grava volcánica y capas delgadas de pómez depositadas en la base de las montañas que limitan la cuenca.

Tmv: Vulcanitas máficas del Mioceno, unidad constituida por rocas ácidas del terciario, las cuales se encuentran en los lomeríos de la Cd. de Toluca.

QC: Sierra de las Cruces, unidad geológica del Terciario, constituida por lavas andesíticas y dacíticas, porfiríticas, las cuales delimitan la cuenca de Toluca al Oriente.

A profundidad es factible encontrar estos paquetes arenosos y/o conformados por materiales piroclásticos con buenas posibilidades acuíferas, así como roca volcánica fracturada la cual constituye el basamento local del sitio.

A profundidades mayores de 100 m, se encuentra la formación rocosa de buena permeabilidad constituida posiblemente por roca extrusiva, materiales piroclásticos, gravas y arenas, que resultan los de mayor interés geohidrológico en el área y potencialmente son los que presentan mejores posibilidades acuíferas para la explotación a través de pozos profundos, así como para la descarga de aguas pluviales a través de pozos de absorción.

El área en estudio se encuentra sobre planicies aluviales arcillo-arenosas y limo-arenosas, en una superficie homogénea y de topografía sensiblemente plana, conformada por suelos fundamentalmente arcillosos de gran espesor. Estos materiales presentan cierta permeabilidad, aunque el agua se infiltra principalmente en los bordos de la subcuenca (cerros y lomeríos), en donde los materiales aflorantes son más gruesos y constituyen la zona de recarga de los acuíferos del lugar.

Se recomienda utilizar los aparatos volcánicos del Cuaternario como minas de agregados, debido a que son principalmente de composición pumicítica, materiales ligeros y de alta resistencia. Dichos aparatos volcánicos se observan marcados por color café y rótulos Qv.

- Fotointerpretación de estructuras regionales

A partir de una imagen de satélite descargada del software Google Earth Plus, se realizó un análisis de los lineamientos geológicos estructurales regionales que se encuentran en la zona (ver Figura 4 Anexo 3 RVO y Cia) y que pueden afectar a la misma. En este análisis se observan dos sistemas principales de fallamientos y fracturamientos regionales. El primero con rumbo prácticamente NW-SE y el segundo con rumbo NE-SW.

En la Figura 4 del “Anexo 3 RVO y Cia” también se observan las cuencas de Toluca y Valle de México, en donde se aprecia el sistema de esfuerzos que provocó fracturamientos y fallamientos preferenciales con rumbo NE-SW, los cuales coinciden en muchos casos con los rumbos de los agrietamientos encontrados en las planicies aluviales. En esta figura se marcan con lineamientos rojos, estructuras asociadas a posibles fallas geológicas que pudieran afectar las planicies aluviales de la cuenca de Toluca, mientras que con lineamientos verdes, se marcan estructuras geológicas pertenecientes a fracturamientos y fallamientos de la Sierra de las Cruces.

Atendiendo a la información geológica recopilada del área de estudio, el sitio se encuentra en una zona que, en el pasado geológico, ha presentado eventos tectónicos muy diversos, como lo muestran la gran cantidad de lineamientos geológico-estructurales que se observan en la imagen de satélite.

- Sismicidad

Para efectos de diseño sísmico se consideró al subsuelo Tipo III ubicado en la Zona B de la regionalización sísmica de la República Mexicana, de acuerdo con las recomendaciones formuladas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 1993).

2.4.2.1.2. Condiciones geotécnicas del sitio.

El objetivo primordial de los programas de investigación del subsuelo, además de conocer las características físicas y mecánicas de los estratos que lo constituyen, es determinar la existencia de rellenos superficiales antiguos o recientes, variaciones fuertes de estratigrafía, suelos inestables o colapsables, grietas y cavernas, mantos de agua colgada y espesor de los suelos compresibles, o cualquier otro factor que pueda originar asentamientos o condiciones de inestabilidad de importancia de modo que todos ellos puedan tomarse en cuenta en el diseño de los terraplenes.

Los trabajos de campo se realizaron en tres etapas: la primera consistió en la recopilación de la información existente, la segunda en el reconocimiento de la zona en estudio y sus inmediaciones, y la tercera, en la exploración directa e indirecta.

- **Recopilación de la información.**

Se realizó un acopio de la información disponible en la literatura técnica, referente a la estratigrafía y geomorfología de la región en estudio. Las fuentes bibliográficas empleadas corresponden a López Ramos (1985), en el sitio web del INEGI, además de cartas topográficas, geológicas y de climas escalas 1:50,000, 1:250,000 y 1:1, 000,000 editadas por el INEGI.

Así mismo se revisó la información suministrada por el cliente, consistente en los estudios geotécnicos previos realizados en el tramo de estudio por las empresas IDINSA (2010), JESA (2010), SERICAL (2010) y SABA (2010).

- **Reconocimiento superficial**

Personal técnico de RVO y Cía., S.A. de C.V., a cargo de un especialista en Mecánica de Suelos, realizó un recorrido por el sitio de proyecto, con el objeto de interpretar la geología superficial y la fisiografía de la zona; de esta manera se obtuvo información geotécnica preliminar que permitió definir la estrategia de ejecución de los sondeos.

- **Trabajos de campo y laboratorio**

Los trabajos de campo consistieron en la exploración y el muestreo de forma directa con la ejecución de cinco sondeos mixtos de penetración estándar (SM) con muestreo inalterado para la ejecución de pruebas de laboratorio y la exploración de manera indirecta, con la ejecución de 12 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) y una prueba de Down-Hole.

- **Exploración y muestreo directo**

Con objeto de identificar los diferentes estratos del subsuelo del trazo en estudio, así como el de conocer las propiedades índices y mecánicas de los materiales que los integran, se elaboró un programa de exploración con base en el reconocimiento superficial antes mencionado. El programa consistió en la ejecución de cinco (5) sondeos mixtos de penetración estándar con recuperación de muestras inalteradas, con muestreador tipo Shelby, denominados SM-2, SM-4, SM-7, SM-11 y SM-28, que se ubicaron dentro de la zona de interés de común acuerdo con el cliente, teniendo en cuenta los trabajos realizados previamente mencionados en la recopilación de información existente.

Sondeo	Ubicación	Elevación (m)	Profundidad (m)
SM-2	4+500	2570.36	30.40
SM-4	4+600	2568.64	30.40
SM-7	5+400	2567.93	40.60
SM-11	6+300	2567.23	30.10
SM-28	9+850	2572.15	30.87

Tablas RVO 1. Sondeos mixtos de penetración estándar

Los sondeos mixtos se efectuaron con máquina rotatoria, utilizando para su ejecución la técnica de penetración estándar de acuerdo con la norma ASTM-D-1586. Este método consiste en el hincado a golpes de un tubo muestreador (también conocido como penetrómetro) de 60 cm de longitud y 5 cm de diámetro, empleando para tal fin un martinete de 63.5 kg de peso que se deja caer desde una altura de 76 cm. La prueba tiene como objetivo definir la resistencia a la penetración que presentan las capas de suelo, midiendo el número de golpes N necesarios para penetrar los 30 cm intermedios del tubo partido, así como recuperar muestras alteradas de suelo.

La profundidad de los sondeos se definió de acuerdo con las características estratigráficas del sitio, tomándose los siguientes criterios para suspenderlos:

- a) Cuando se penetró 5.0 m en arenas y/o arcillas con número de golpes mayor a 50 de acuerdo con la prueba de penetración estándar.
- b) Cuando se detectó una masa rocosa, se verificó un espesor de ésta de 4.0 m como mínimo.

En las figuras 5 a 9 Anexo 3 RVO y Cia, se presentan los registros de cada uno de los sondeos realizados y en el Anexo RVO, el reporte fotográfico de la exploración en campo.

- Ensayes de laboratorio.

Las muestras obtenidas durante la exploración se protegieron contra la pérdida de humedad, se identificaron y se empaquetaron cuidadosamente para su posterior traslado al laboratorio de mecánica de suelos y rocas en la ciudad de México. En todas las muestras se realizó la clasificación visual y al tacto en estado seco y húmedo, y se determinó el contenido natural de agua (w%). Con base en la estratigrafía preliminar encontrada se elaboró un programa de ensayos de laboratorio, suficiente para clasificar el suelo y obtener sus propiedades índices y mecánicas, como se menciona a continuación:

- Límites de consistencia
- Clasificación S.U.C.S.
- Porcentaje de finos
- Densidad de sólidos

- Compresión axial no confinada (muestras inalteradas)
- Compresión triaxial rápida (muestras inalteradas)
- Consolidación unidimensional (muestras inalteradas)

Los resultados de las pruebas realizadas se presentan en forma resumida en las tablas 1 a 5 en el Anexo 3 RVO y Cia. Estos resultados sirvieron para determinar los parámetros de resistencia y deformación necesarios para los análisis que se presentarán más adelante.

Con base en los datos obtenidos en campo y laboratorio se elaboraron las figuras 5 a 9 en el Anexo 3 RVO y Cia, mencionadas anteriormente, donde se presentan los estratos identificados en cada uno de los sondeos.

- Exploración Geofísica

Como parte de los estudios complementarios para el proyecto se ejecutó una prueba Down-Hole y 12 Sondeos Eléctricos Verticales (figura 10 del Anexo 3 RVO y Cia), con el fin de elaborar un modelo geológico estructural, así como un perfil a profundidad, determinando la secuencia estratigráfica del tramo en cuestión y las posibles zonas de fallas o transiciones abruptas, hasta una profundidad mínima de 100 m.

- Exploración Geosísmica

La prueba de Down Hole (DH), la cual permite determinar la variación de la velocidad de propagación de ondas con la profundidad, mediante pruebas de baja deformación, realizadas in situ, se realizó en las inmediaciones del cadenamamiento 5+400, con el fin de lograr una caracterización de las propiedades dinámicas del terreno en los primeros 40 m de profundidad.

Los trabajos de campo de DH consistieron en introducir en un sondeo ademado en un diámetro de 2", un geófono (de 3 componentes sismo detectores Mark Producto de 14 Hz ensamblados ortogonalmente entre sí) que tiene como función registrar las ondas sísmicas producidas en la superficie mediante el impacto de golpes de marro asentados sobre un riel de acero colocado a 4 m de distancia del barreno y enviar la señal a un

sismógrafo donde es amplificada y digitalizada, para posteriormente ser almacenadas en una computadora portátil.

Las mediciones se realizaron a cada metro de profundidad con el fin de determinar las velocidades y características elásticas de las capas con grosores mayores a ese intervalo.

Con el análisis de los registros capturados en campo, se elaboró la figura 11 del Anexo 3 RVO y Cia, curva dromocrónica, en la cual se asocian la profundidad de análisis con el tiempo de arribo de las ondas de compresión y las ondas de cortante. La pendiente establecida en esta curva refleja la velocidad con que se propagan las ondas sísmicas en los materiales estudiados.

Con base en la determinación de las velocidades y los pesos volumétricos (γ_m), se calcularon los módulos elásticos dinámicos a cada metro de profundidad en el subsuelo, con las siguientes expresiones:

Para la relación de Poisson:

$$\nu = \frac{0.5(V_p/V_s)^2 - 1}{(V_p/V_s)^2 - 1} \quad \text{Ec. 1}$$

Módulo de rigidez al esfuerzo cortante

$$G_d = \rho V_s^2 \quad \text{Ec. 2}$$

Módulo de elasticidad

$$E_d = 2\rho V_s^2(1 + \nu) \quad \text{Ec. 3}$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6 Anexo 3 RVO y Cia.

- Exploración Geoeléctrica

En el proyecto se ejecutaron doce Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), con abertura semi-electrónicas $AB/2=300$ m, con el fin de determinar las unidades geoeléctricas que se encuentran en los primeros 100 m de profundidad.

Los métodos eléctricos de resistividad en DC consisten en inyectar corriente a los terrenos mediante dos electrodos que son clavados en el suelo, conocidos como A y B. El campo eléctrico así generado se monitorea a través de mediciones de diferencias de potencial, ΔV , entre dos electrodos, conocidos como M y N. El cociente de la corriente inyectada entre la diferencia de potencial ΔV multiplicado por la constante geométrica del arreglo, K, determina el valor del parámetro medio conocido como resistividad aparente, en unidades Ohm-m y que físicamente representa la dificultad que encuentra la corriente eléctrica para fluir a través de un material.

Las mediciones de resistividad de los SEV se efectuaron al ras del terreno y a diferentes aberturas interelectrónicas en arreglo Schlumberger, con el fin de determinar el número de capas presentes en cada sitio a estudiar. Las aberturas interelectrónicas “AB/2” fueron de 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200 y 300 m, para alcanzar profundidades de investigación del orden de 100 m.

La ubicación y posicionamiento de los SEV se estableció con unidades GPS. Las coordenadas UTM de cada SEV, con referencia en el elipsoide WGS84, se indican a continuación:

Coordenadas UTM de los SEV			
SEV	X	Y	Z
SEV-01	449370	2140040	2581
SEV-02	448980	2139915	2582
SEV-03	448681	2139618	2580
SEV-04	448347	2139407	2577
SEV-05	447978	2139249	2577
SEV-06	447640	2139031	2576
SEV-07	445917	2137210	2569
SEV-08	445638	2136924	2577
SEV-09	447333	2138766	2580
SEV-10	446154	2137534	2570
SEV-11	445431	2136804	2581
SEV-12	445088	2136623	2580

Tablas RVO 2. Coordenadas de los SEV

Los resultados obtenidos de los doce SEV se resumen en la sección de isorresistividad aparente de la figura 12 Anexo 3 RVO y Cia.

- **Estratigrafía y propiedades**

Los resultados obtenidos a partir de la exploración de campo y laboratorio se analizaron e interpretaron para definir las características estratigráficas individuales de cada sondeo, así como la estratigrafía representativa de la zona que se infiere a partir de la correlación de propiedades geotécnicas entre vario de ellos.

- **Sondeos mixtos**

Como se mencionó anteriormente, la empresa RVO y Cía. realizó cinco sondeos mixtos de penetración estándar con recuperación de muestras inalteradas. A continuación, se hace una descripción de las unidades estratigráficas identificadas en cada uno de los sondeos.

SONDEO MIXTO SM-2 (km 4+500)**PROFUNDIDAD****(m)****DESCRIPCIÓN**

0.00-1.20	Arcilla de color café oscuro, con algunas gravillas, consistencia muy firme a dura, con número de golpes Nspt entre 16 y 49
1.20-10.00	Arcilla de color café a negra, con materia orgánica en algunas partes, consistencia muy blanda a muy firme, con numero de golpes Nspt de 1 a 18.
10.00-17.00	Arena gruesa de color rojo con gravas y arcilla, de compacidad suelta a muy densa y numero de golpes Nspt mayor a 15.
17.00-30.40	Arena gruesa de color rojo con gravas, de compacidad media a muy densa y, numero de golpes Nspt mayor a 20.

SONDEO MIXTO SM-4 (km 4+600)**PROFUNDIDAD****(m)****DESCRIPCIÓN**

0.00-3.60	Arcilla de color negro, con algunas raíces y lentes de arena fina, consistencia muy blanda, con número de golpes Nspt menos a 5.
3.50-10.20	Arena de tezontle media a gruesa, color café grisáceo, compacidad media a densa, con número de golpes Nspt de 11 a 34.
10.20-18.00	Gravas y gravillas de tezontle empacadas en arena gruesa, de color grisáceo, compacidad media y número de golpes Nspt de 16 a 30.
18.00-30.40	Gravas y gravillas de tezontle empacadas en arena gruesa, de color rojizo, compacidad media a densa y, numero de golpes Nspt de 17 a 40

SONDEO MIXTO SM-7 (km 5+400)

PROFUNDIDAD

(m)

DESCRIPCIÓN

0.00-2.40	Arcilla de color café a verde, con algunas raíces, consistencia firme, con números de golpes Nspt entre 8 y 14.
2.40-17.00	Arcilla de color verde a gris verdosa, consistencia muy blanda a muy firme, con número de golpes Nspt menos a 6.
17.00-21.60	Limo verde con arena fina, consistencia dura, con número de golpes Nspt mayor a 50.
21.60-40.60	Arena arcillosa de color negra, con algunas gravillas, de compacidad muy densa, número de golpes Nspt mayor a 50.

SONDEO MIXTO SM-28 (km 9+850)

PROFUNDIDAD

(m)

DESCRIPCIÓN

0.00-3.60	Arcilla color café con lentes de arena media, de consistencia muy blanda a muy firme, con números de golpes Nspt entre 2 y 18.
3.60-14.00	Arcilla color café y gris verdosa, con lentes de arena fina, de consistencia blanda a muy firme, número de golpes Nspt entre 2 y 31.
14.00-20.00	Arcilla de color verde con arenas, de consistencia firme a dura, de número de golpes Nspt de 12 a 49.
20.00-23.40	Arcilla de color café con arena, de consistencia firme a muy firme, número de golpes Nspt entre 14 y 23
23.40-30.87	Arena media a fina de color café con lentes de arcilla, de compacidad suelta a muy densa, numero de golpes Nspt mayor a 6.

- Exploración geofísica

Se llevo a cabo la prueba de Down Hole realizada, se identifican tres unidades estratigráficas como se describe a continuación.

PROFUNDIDAD

(m)

DESCRIPCIÓN

0.00-3.00	Arcillas negras orgánicas con presencia de raíces, con velocidades de propagación de onda $V_p=363$ m/s y $V_s=71$ m/s, con relación de Poisson promedio de 0.48, y módulos dinámicos elásticos de Young $E=234$ kg/cm ² (22,988 kPa y de rigidez a cortante $G=80$ kg/cm ² (7,815 kPa).
3.00-28.00	Arcilla lacustre de consistencia muy blanda, con velocidades de propagación de onda $V_p=1385$ m/s y $V_s=74$ m/s, con relación de Poisson promedio de 0.50, y módulos dinámicos elásticos de Young $E=241$ kg/cm ² (23,622 kPa y de rigidez a cortante $G=80$ kg/cm ² (7,879kPa).
28.00-40.00	Arena fina a media con gravilla, con velocidades de propagación de onda $V_p=1589$ m/s y $V_s=378$ m/s, con relación de Poisson promedio de 0.50, y módulos dinámicos elásticos de Young $E=7469$ kg/cm ² (732,741 kPa y de rigidez a cortante $G=80$ kg/cm ² (249,649 kPa).

Como resultado de los doce Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) se identifican las siguientes unidades estratigráficas:

UNIDAD	DESCRIPCIÓN
U0	Superficialmente se detectan resistividades bajas, comprendidas en el intervalo de 1 a 20 Ohm-m y espesor variable entre 10 y 30 m (color azul oscuro). Esta zona se asocia con materiales sedimentarios lacustres, arcillosos de alta compresibilidad y consistencia blanda a muy blanda.
U1	Por debajo del paquete anterior se detectan resistividades de bajas a media, de 25 a 40 Ohm-m con espesores que varían desde 5m en la parte SW de la sección y se engrosan hacia el NE alcanzando espesores de hasta 40 m (color azul claro). Este paquete se asocia co-materiales aluviales arcillosos, de alta plasticidad, de consistencia de blanda a muy dura.
U5	Subyaciendo al paquete U1 se localizan dos paquetes diferentes; el primero entre el inicio de la sección y el cadenamamiento 4+635, aproximadamente, con resistividades medias a altas, de 60 a 100 Ohm-m asociados a materiales piroclásticos volcánicos areno-gravosos, de la formación cerrillo, con espesor promedio de 75 m.
U2	El segundo paquete que subyace al U1 presenta resistividades entre 40 y 220 Ohm-m, asociadas a materiales areno limosos y limos arenosos de consistencia muy dura, con espesor entre 50 m a los costados de la sección y poco más de 100 m al centro de esta.
U4	Se observa que debajo del paquete de materiales piroclásticos (U5) la resistividad disminuye, y se localiza entre 20 y 60 Ohm-m, asociada a materiales limo arenosos y areno limosos de consistencia dura. Este paquete se observa desde el principio de la sección y hasta el cadenamamiento 4+635 lateralmente, mientras que en profundidad abarca el resto de la sección, por lo que su espesor es indefinido.
U3	Lateralmente, y en contacto con el paquete U4, se define un paquete con resistividades altas, mayores a 200 Ohm-m, asociados a

materiales piroclásticos arena gravosos muy densos, que se consideran el basamento geotécnico, con espesor indefinido debido a que aparecen hasta el fondo de la sección.

En la sección geoelectrica se observó un cambio lateral a la altura del cadenamiento 4+635, que puede resultar en un plano de debilidad y/o falla al momento de aplicar carga sobre el terreno.

- Modelo estratigráfico

Según los resultados de la exploración directa, indirecta y los ensayos de laboratorio realizados por RVO y Cía., así como la recopilación de la información de los estudios geotécnicos previos realizados en el tramo de estudio por las empresas IDINSA (2010), SERICAL (2010) y SABA (2010), se propuso el perfil estratigráfico del tramo 4+500 a 10+000, como se observa en los Planos 1 al 4 del Anexo 3 RVO y Cia, el cual está constituido por 14 materiales que se describen de manera general a continuación:

MATERIAL	DESCRIPCIÓN
1	Arcilla orgánica de color café a negra, de consistencia blanda a muy firme (OH/CH), con numero de golpes Nspt promedio de 5, ubicada en la superficie del perfil estratigráfico y con espesor variable.
2	Arcilla color gris verdosa, de consistencia muy blanda a media (CH), con numero de golpes Nspt promedio de 3 y espesor variable.
3	Arcilla de color gris verdoso con arena, de consistencia media a dura (entre CH y CL), con numero de golpes Nspt promedio de 26 y espesor variable.
4	Arena limosa con contenido de arcilla color gris verdoso, de compacidad media a densa (SM a SC), con numero de golpes Nspt promedio de 35 y espesor variable.
5	Arena arcillosa y arena limosa de color gris verdoso, de compacidad suelta a media (SC y SM), con número de golpes Nspt promedio de 7 y espesor entre 1 m y 2 m.
6	Limo con arena y lentes de ceniza volcánica, de color café oscuro y de

- consistencia media (MH), con número de golpes N_{spt} promedio de 6 y espesor entre 1m y 2 m.
- 7 Arena limosa con contenido de arcilla gris clara a verdosa, de compactación firme a dura (MH), con número de golpes N_{spt} promedio de 35 y espesor variable.
- 8 Limo arcilloso orgánico de color café oscuro, y de consistencia media a muy firme (MH-OH), con número de golpes N_{spt} promedio de 8 y espesor variable
- 9 Arena de tezontle media a gruesa, de color café grisáceo y de compactación media a densa (SC), con número de golpes N_{spt} promedio de 18 y espesor variable.
- 10 Arena gruesa con gravas de tezontle, de color rojizo y de compactación suelta a media (SW), con número de golpes N_{spt} promedio de 26 y espesor variable.
- 11 Gravas y gravillas de tezontle empacadas en arena gruesa de color rojizo, de compactación media a densa (GW a SW), con número de golpes N_{spt} promedio de 30 y espesor variable.
- 12 Arcilla limosa gris a café oscura, de consistencia muy blanda a firme, con número de golpes N_{spt} promedio de 8 y espesor variable.
- 13 Intercalaciones de arena y arcillas de color gris oscuro a verdoso y de consistencia blanda a muy firme, con número de golpes N_{spt} promedio de 13 y espesor variable.
- 14 Arena fina gris clara de compactación muy suelta, con número de golpes N_{spt} promedio de 1 y espesor variable.

Los parámetros de diseño de estos materiales se presentan a continuación, agrupados por tramos de similares características geotécnicas.

TRAMO km 4+500 A 4+800

Material	N_{spt}	γ (kN/m^3)	ϕ ($^\circ$)	c (kPa)	E_{so} (kPa)	ν	e_1	W_{prom} (%)
1	8	12.75	0	25.50	1471	0.4	3.554	94
9	18	17.66	33.0	0.00	29700	0.30		28
10	26	19.62	35.0	0.00	35693	0.30		33
11	30	37.00	19.6	0.00	38340	0.30		35

Tablas RVO 3. Tramo km 4+500 a 4+800

TRAMO km 4+800 A 6+100

Material	N _{spt}	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	E ₅₀ (kPa)	v	e _i	W _{prom} (%)
1	4	12.75	0.0	25.5	1471	0.40	3.554	133
2	3	13.03	0.0	39.2	3034	0.40	2.315	153
3	27	14.00	0.0	122.0	9810	0.40	1.930	49
4	40	17.66	35.0	0.0	44272	0.30		22
5	8	16.68	28.0	0.0	19979	0.30		47
12	8	13.03	0.0	39.2	3034	0.40	2.300	79

Tablas RVO 4. Tramo km 4+800 a 6+100

TRAMO km 6+100 a 7+200

Material	N _{spt}	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	E ₅₀ (kPa)	v	e _i	W _{prom} (%)
1	4	12.75	0	25.5	1471	0.40	3.550	141
2	3	13.05	0	41.2	5214	0.40	3.100	162
3	23	14.09	0	122.0	9810	0.40	1.930	54
4	30	17.66	35	0.0	38340	0.30		28
5	3	16.68	27	0.0	12124	0.30		79

Tablas RVO 5. Tramo km 6+100 a 7+200

TRAMO km 8+300 a 9+850

Material	N _{spt}	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	E ₅₀ (kPa)	v	e _i	W _{prom} (%)
1	4	13.60	0	27.47	2332	0.40	3.418	149
2	2	13.93	0	98.10	8371	0.40	2.000	119
3	28	17.95	0	294.30	42674	0.40	0.930	42
4	31	17.66	35	0.00	38974	0.30		28
5	8	16.68	32	0.00	22136	0.30		54
13	10	14.72	0	65.40	5650	0.35		54

Tablas RVO 6. Tramo km 8+300 a 9+850

TRAMO km 7+200 a 8+000

Material	N _{spt}	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	c (kPa)	E ₅₀ (kPa)	v	e _i	W _{prom} (%)
1	4	13.34	0.0	31.39	2616	0.40	2.950	126
2	2	12.46	0.0	29.32	3205	0.40	4.500	162
3	23	14.09	0.0	122.0	9810	0.40	1.930	45
4	28	17.66	35.0	0.00	37040	0.30		48
5	10	16.68	31.0	0.00	22136	0.30		47
6	6	14.72	0.0	39.24	3750	0.35		114
7	35	17.66	35.0	0.00	41412	0.30		155
8	8	14.72	0.0	52.32	4700	0.35		100

Tablas RVO 7. Tramo km 7+200 a 8+000

TRAMO km 8+000 a 8+300

Material	N _{spt}	γ (kN/m ³)	ϕ (°)	C (kPa)	E ₅₀ (kPa)	ν	e _i	W _{prom} (%)
1	4	13.60	0.0	27.46	2332	0.40	3.418	125
2	3	12.53	0.0	18.77	2261	0.40	3.700	159
3	31	18.25	0.0	122.65	7063	0.40	0.832	40
4	44	17.66	38.0	0.00	473	0.30		22
5	7	16.68	30.0	0.00	18520	0.30		37
13	16	14.72	0.0	65.40	5650	0.35		38
14	1	14.71	27.0	0.00	7000	0.35		38

Tablas RVO 8. Tramo km 8+000 a 8+300

2.4.2.1.3. Análisis y diseño geotécnico.

• **Diagnóstico preliminar**

Con base en el modelo estratigráfico del proyecto y la caracterización geotécnica del subsuelo, en términos de sus parámetros de compresibilidad, se realizaron análisis de consolidación y estabilidad global de taludes de los terraplenes en la zona que comprende los km 8+000 a 8+300, considerando diferentes alturas, para un ancho de corona de 23 m y taludes 1.5:1 (H:V).

Adicionalmente, en ausencia de registros de control de calidad de los terraplenes que permitan definir con exactitud el peso volumétrico del material, estos análisis se realizaron tomando en cuenta diferentes pesos volumétricos para varias alturas de terraplén.

▪ Evaluación de estabilidad global

La evaluación de la estabilidad global de los taludes de los terraplenes se analizó mediante análisis bajo condiciones estáticas y pseudo-estáticas, utilizando para ello el método de las dovelas, bajo el enfoque de Fellenius (Juárez y Rico, 2000).

En este método todas las fuerzas entre dovelas se ignoran. El peso de la dovela se descompone en fuerzas paralelas y perpendiculares a la base de la dovela. La fuerza perpendicular a la base de la dovela es la fuerza normal, usada para determinar la fuerza

cortante. La componente del peso de la dovela paralela a la base es la fuerza gravitacional actuante. La suma de momentos con respecto a un punto fijado aleatoriamente para la superficie de falla es empleada para obtener el factor de seguridad. El factor de seguridad es la resistencia total disponible a lo largo de la superficie de falla, dividida entre la sumatoria de la fuerza gravitacional actuante.

$$FS = \frac{\Sigma[c\beta + N \tan \phi]}{\Sigma W \sin \alpha} = \frac{\Sigma S_{resistente}}{\Sigma S_{movilizado}}$$

Ec. 4

Donde:

c	cohesión
ϕ	ángulo de fricción
β	longitud de la base de la dovela
N	fuerza normal en la base de la dovela ($W \cos \alpha$)
W	peso de la dovela
α	inclinación de la base de la dovela.

Para los análisis pseudoestáticos de estabilidad de taludes se utilizó un coeficiente de aceleración del terreno de $a_0=0.10g$, por las condiciones de ubicación del sitio de estudio en la regionalización sísmica de la república mexicana y el tipo de terreno del perfil del suelo. Las propiedades de los materiales utilizados en los análisis de estabilidad estáticos y pseudoestáticos se muestran en la Tabla 7 en Anexo RVO.

De acuerdo con las recomendaciones de CFE (1983), para condiciones estáticas el factor de seguridad para garantizar la estabilidad de los terraplenes debe ser mayor a 1.5, y para condiciones pseudoestáticas se recomienda un factor entre 1.0 y 1.15 (Duncan and Wrigth, 2005).

En el Anexo 3 RVO y Cia, se presentan los resultados de los análisis de estabilidad. Adicionalmente, en las Tablas 8 y 9 y Figura 13 Anexo 3 RVO y Cia, se presentan los resultados del cálculo de los factores de seguridad al deslizamiento para terraplenes entre 2 y 7 m de altura, con pesos volumétricos entre 0.5 ton/m^3 y 1.99 ton/m^3 , tanto para condiciones estáticas como pseudoestáticas.

De los resultados anteriores se observa que, bajo consideraciones estáticas, se obtienen condiciones seguras de estabilidad para alturas de terraplén de 2.0 m, independiente del peso volumétrico del mismo, así como para alturas de terraplén de 3.0 m, pero con pesos volumétricos inferiores a 1.2 ton/m². Para alturas mayores a 3.0 m los terraplenes presentan condiciones de inestabilidad estática (F.S. <1.5).

Para condiciones pseudo-estáticas la estabilidad de los terraplenes se obtiene para alturas máximas de 2.0 m, con pesos volumétricos inferiores a 1.5 ton/m².

En cada uno de los análisis de estabilidad estática y pseudoestática efectuados se observó que la condición más desfavorable corresponde a una falla circular que compromete el suelo de cimentación.

- Análisis de asentamientos por consolidación

Para el cálculo de asentamientos por consolidación del suelo sobre el cual se construirán los terraplenes, se consideró el peso de la estructura del pavimento y la carga debida al paso de camiones. Los análisis se efectuaron para cuatro sitios ubicados en los km 8 + 120, 8 + 160, 8 + 180 y 8 + 290.

Los asentamientos por consolidación fueron calculados bajo el centro del terraplén de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\delta = \sum \frac{\Delta e}{1 + e_0} \Delta \sigma I_z h$$

Ec. 5

Donde:

e_0	Relación de vacíos inicial para cada estrato
$\Delta \sigma$	incremento de esfuerzo producido por el peso del terraplén (P_0)
Δe	incremento de la relación de vacíos producido por $\Delta \sigma$
I_z	Factor de influencia para carga trapezoidal (Budhu, 2001)
h	Espesor de cada estrato de suelo compresible, en m

En la Tabla 10 y Figura 14 del Anexo 3 RVO y Cia, se presenta una síntesis de estos resultados. Se puede apreciar que para pesos volumétricos menores a 1.5 ton/m^3 , los asentamientos por consolidación son moderadas, hasta una altura de terraplén de 2.5 m. Para las demás condiciones resultan asentamientos inadmisibles que afectarían la condición de servicio de la vía.

Los resultados de los análisis de estabilidad de taludes y asentamientos por consolidación presentados en las Tablas 6 a 7 del Anexo 3 RVO y Cia, sugieren que para garantizar un adecuado comportamiento de los terraplenes que conforman el tramo analizado, éstos deberán construirse con materiales cuyos pesos volumétricos sean menores a 1.5 ton/m^3 y con alturas máximas de 2.0 m.

Los resultados y conclusiones obtenidos en el diagnóstico preliminar de la zona que comprende los km 8+000 a 8+300, fueron considerados representativos para toda la longitud del trazo del proyecto (km 4+500 a 10+000) ya que se estimó que existía una gran similitud entre los parámetros de compresibilidad y resistencia de este tramo.

Para el diseño de la alternativa de solución a lo largo del tramo km 4+500 al km 10+000 se analizaron 20 sitios, de los cuales 5 corresponden a pasos superiores vehiculares (PSV), 2 a pasos inferiores vehiculares (PIV), 4 cajones de concreto, 3 puentes y 6 sitios intermedios entre los cadenamientos de las estructuras anteriores.

Con base en los resultados de las pruebas de consolidación, se estimaron para cada uno de los sitios analizados los tiempos en los que se presentarán diferentes porcentajes de los asentamientos totales.

De acuerdo con las condiciones estratigráficas, propiedades de compresibilidad y permeabilidad de cada uno de los sitios analizados se estimaron tiempos para el 100 % de consolidación que van de 1 hasta 84 años.

Es importante mencionar que los tiempos de consolidación calculados son muy sensibles a la variación del coeficiente de permeabilidad, el cual fue obtenido de forma indirecta de los resultados de las pruebas de compresibilidad. Para obtener una mayor aproximación en los tiempos de consolidación se recomienda llevar a cabo pruebas de permeabilidad en campo.

- Capacidad de carga

Para estimar la capacidad de carga q_{ult} (ton/m²) del sistema se adoptó la solución de Prandtl (1920) tal como se muestra a continuación:

$$q_{ult} = cN_c + \gamma D_f N_q + \gamma B_w N_\gamma \quad \text{Ec. 6}$$

Donde

C	Cohesión, para el caso de las arcillas $c=S_u$
N_c, N_q, N_γ	Factores de capacidad de carga de Terzaghi
γ	Peso volumétrico del suelo
B_w	Ancho de la base del terraplén
D_f	Profundidad de desplante

Para suelos compresibles $\phi \approx 0$, entonces $N_\gamma = 0$ y $N_q = 1$; por tanto, la ecuación 2 puede escribirse de la siguiente manera:

$$q_{ult} = cN_c + \gamma D_f \quad \text{Ec. 7}$$

Si el terraplén se construye al nivel de la cimentación:

$$q_{ult} = cN_c \quad \text{Ec. 8}$$

Tomando en cuenta que:

$$N_c = 5 \left(1 + 0.2 \frac{B_w}{L} \right) \left(1 + 0.2 \frac{D_f}{B_w} \right) D_f = 0; \frac{B_w}{L} \approx 0; N_c = 5 \quad \text{Ec. 9}$$

$$q_{ult} = 5S_u \quad \text{Ec. 10}$$

La capacidad de carga admisible: q_{adm} (ton/m²) se calcula de la siguiente manera:

$$q_{adm} = \frac{q_{ult}}{FS} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde:

q_{ult} Capacidad de carga última (t/m²).

FS Factor de Seguridad, igual a 3.

Se determinó el factor de seguridad (FS) por capacidad de carga del suelo en cada uno de los cadenamientos considerados y se obtuvieron factores de seguridad entre 3 y 8, suficientemente altos para garantizar la estabilidad por capacidad de carga.

- Estabilidad de taludes

En el Anexo RVO se presentan los parámetros mecánicos y espesores de materiales para la estratigrafía de cada uno de los sitios analizados.

Las estructuras que muestran factores de seguridad más bajos, pero todavía aceptables, son los construidos con suelo, en los cadenamientos 9+800 a 8+380. En este tramo los factores de seguridad estática están entre 1.56 y 2.023, mientras que para condiciones seudo dinámicas entre 1.111 y 2.014, en ambos casos dentro de lo que se recomienda para estas condiciones (CFE, 2008a).

Para las estructuras construidas con EPS y tezontle, los factores de seguridad están entre 1.773 y 3.571 y para la condición pseudo-dinámica entre 1.686 y 2.504, dependiendo de las condiciones de altura del terraplén y las características del suelo.

2.4.2.1.4. Conclusiones

Conforme a lo descrito en el documento se definen las siguientes conclusiones:

Primera. De acuerdo con los resultados de campo y laboratorio se determinó que la estratigrafía en el tramo de estudio está conformada principalmente por arcillas y limos blandos de origen lacustre de alta compresibilidad.

Segunda. Para los diferentes estratos que conforman el sitio se determinaron velocidades de onda de compresión (V_p) entre 363 y 1589 m/s y velocidades de onda de cortante (V_s) entre 71 y 378 m/s. El intervalo de ésta última indica que se trata de materiales de baja rigidez, típicos de arcillas blandas.

Tercera. Los asentamientos a largo plazo generados por consolidación del suelo que se estimaron están entre 51 y 80 cm para el tramo donde se utilizará EPS tezontle como material de construcción y entre 78 y 130 para la zona ya construida con suelo compactado.

Cuarta. Respecto a la estabilidad del terraplén debido al cortante, las estructuras que muestran factores de seguridad más bajos, pero todavía aceptables, son los construidos con suelo, en los cadenamientos 9+800 a 8+380. En este tramo los factores de seguridad estática están entre 1.56 y 2.023, mientras que para condiciones pseudo-dinámicas entre 1.111 y 2.014, en ambos casos dentro de lo que se recomienda para estas condiciones. Mientras que para los tramos donde se utiliza EPS tezontle los factores de seguridad satisfacen de mejor manera el mínimo requerido.

Quinta. Para el análisis de flotación, traslación por presión hidrostática y traslación por viento, para todos los cadenamientos analizados los factores de seguridad son mayores al mínimo recomendado.

Sexta. Después de haber realizado todos los análisis que se describen en el documento, se puede ver que, como se esperaba, el fenómeno que más preocupa (aun utilizando EPS y tezontle) son los asentamientos a largo plazo, debidos a la consolidación. Por tal motivo se recomienda la instalación de instrumentos de medición de asentamientos a lo largo del trazo del proyecto. Lo anterior, para realizar un seguimiento al fenómeno de consolidación de los materiales compresibles y asentamientos diferenciales de los terraplenes; de tal forma que se pueda prever y mitigar sus efectos sobre la obra.

Nota: Los planos estratigráficos podrán ser consultados en el Anexo 3 RVO y Cia.

2.4.2.2. Informe MEXPRESA S.A de C.V.

Este se ejecutó en el año de 2014 en el tramo faltante del km 3+700 al km 4+900.

De igual manera la empresa Mexicana de Presfuerzo S.A de C.V (MEXPRESA) en el 2014 realizó un estudio geotécnico en el cual publicó en su informe lo siguiente:

- Resultados de los sondeos de penetración estándar y de los ensayos de laboratorio:

Las investigaciones sobre el trazo del viaducto son las siguientes:

Desde la superficie y hasta 16 m, se atravesaron las arcillas blandas de alta plasticidad café oscuro a negrozco que presentaron resistencias a la penetración dinámica muy bajas: $1 < N < 19$, con un promedio de $N = 8.7$ golpes de martinete, en los sondeos correspondientes al viaducto de acceso para el puente del entronque n° 1.

De 16 m hasta 32.0 m, las resistencias medidas con el método SPT son mayores a $N > 30$ y pueden superar $N > 100$ golpes para avanzar 30 cm en algunos casos donde se registró el rechazo del penetrometro ($N = 50$ y avance < 15 cm). Los valores de resistencias medidos no presentan correlaciones con las profundidades, por lo que se concluye que estas gravas empacadas en limo arenoso presentan la heterogeneidad típica de una formación aluvial.

- Orden de magnitud de las descargas sobre la cimentación:

Considerando la alta compresibilidad de las arcillas lacustres superficiales y las sollicitaciones sísmicas correspondientes a un suelo de tipo II, los apoyos serán cimentados sobre una hilera de 4 pilotes colados in situ dentro de perforaciones previas en diámetro $\Phi = 1.0$ m, respetando un entre eje mínimo de $3 \Phi = 3.6$ m entre pilotes. Los accesos al puente para el entronque n° 1 presentara claros de 12 m, con descargas verticales casi-permanentes factorizadas a la base de las columnas del orden de $Q = 250$ toneladas (pilote extremo) o $Q = 177$ ton (por cada pilote intermedio).

- Capacidad de carga para pilote diámetro 1.0 m, desplantado a 26m de profundidad (con 10m de empotramiento):

Para estimar la capacidad de carga admisible de los pilotes en concreto colados in situ dentro de perforaciones previas estabilizadas con lodo, siguiendo los lineamientos del reglamento FOND 85 emitido por el Laboratorio Central de Puentes y Caminos de Francia, se considera la correlación conservadora entre la resistencia a la penetración dinámica con el método SPT (número de golpes N para hincar los 30 cm centrales del tubo partido) y la presión límite (presiómetro del Profesor Ménard):

$$p_l - p_0 \text{ (en MPa)} = N / 15$$

De manera conservadora, se desprecia la fricción lateral en las arcillas lacustres hasta 16 m de profundidad.

- Conclusión:

La resistencia del suelo por debajo de la punta, estimada con los valores de resistencia mas desfavorables medidos dentro de la formación de grava empacada en limo arenoso con resistencia heterogéneas, contribuyen a solamente 24% de la carga admisible para un pilote de cimentación en diámetro 1.0 m, cuya punta se desplanta a 26 m de profundidad: $Q_{adm} = 247$ toneladas.

La fricción lateral límite $q_{sl} = 12.0$ ton/m² entre el fuste y los aluviones con grava, corresponde a pilotes inyectados con baja presión dentro de formaciones granulares, lo que requiere controlar la presión de colado del concreto dentro de las perforaciones previas para los pilotes de cimentación realizadas con barrena helicoidal continúa, reduciendo las alteraciones (descompresión) que puede sufrir la formación con gravas con los métodos tradicionales que requieren un lodo para estabilizar las paredes.

2.5 DIAGNÓSTICO

En los dos informes uno de mecánica de suelos y el otro geotécnico nos indican que el tipo de terreno donde se va a construir la autopista se tiene muy baja capacidad de carga para soportar terraplenes no mayores de 2.5 metros de altura, aun así se tienen hasta 80.0 cm de asentamiento de acuerdo a su peso específico por m^3 del material que se use para su formación por lo que se tiene que tener mucho cuidado en el tipo de material para su construcción.

Se debe tener mucho cuidado en el tipo de material sobre todo con un peso específico bajo que se utilice, para que no rebase la capacidad de carga que tiene el terreno entre los kilómetros a que se refiere en este trabajo.

De la misma manera, se debe tener cuidado con cambio de rasantes, para que no se tenga problema con la altura de los terraplenes.

Capítulo 3: Resultados

Estos resultados se comentan en los siguientes subcapítulos.

3.1 OBTENCIÓN DE RESULTADOS

Para el terraplén de 6.70 m de altura, en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad contra falla de talud de 1.21. En condiciones sísmicas el factor de seguridad es de 0.80. Ambos valores se consideran insuficientes para la estabilidad del talud a corto, mediano y largo plazo.

Para el terraplén de 3.50 m de altura máxima, en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad contra falla de talud de 1.75. En condiciones sísmicas el factor de seguridad es de 1.01. En condiciones estáticas el factor de seguridad se considera suficiente para la estabilidad del talud a corto, mediano y largo plazo. En condiciones sísmicas el factor de seguridad se considera insuficiente para la estabilidad del talud a corto plazo, pero podría ser adecuado a mediano y largo plazo, considerando que el estrato arcilloso blando se consolide por el peso del terraplén y mejore sus características mecánicas.

Para el terraplén de 2.50 m de altura, en condiciones estáticas se obtuvo un factor de seguridad contra falla de talud de 2.20. En condiciones sísmicas el factor de seguridad es de 1.09. Ambos valores se consideran suficientes para la estabilidad del talud a corto, mediano y largo plazo.

3.1.1.- Corrimiento lateral.

Los factores de seguridad contra corrimiento lateral del terraplén, con distintas alturas de terraplén, son los siguientes:

Para terraplén de 6.70 m de altura:

Para que terraplén deslice sobre del refuerzo, F.S. = 2.30.

Para que terraplén deslice sobre suelo de desplante, F.S. = 2.85.

Los factores de seguridad son adecuados, e indican que el terraplén no desliza.

Para terraplén de 3.50 m de altura:

Para que terraplén deslice sobre del refuerzo, F.S. = 1.81.

Para que terraplén deslice sobre suelo de desplante, F.S. = 5.66.

Los factores de seguridad son adecuados, e indican que el terraplén no desliza.

Para terraplén de 2.50 m de altura:

Para que terraplén deslice sobre del refuerzo, F.S. = 1.51.

Para que terraplén deslice sobre suelo de desplante, F.S. = 8.41.

Los factores de seguridad son adecuados, e indican que el terraplén no desliza.

3.1.2.- Asentamientos.

Para el terraplén de 2.50 m de altura promedio, los asentamientos en el eje del terraplén serán del orden de 64 cm, para una descarga (Carga muerta) al suelo de cimentación de 5.12 ton/m². Dado que este valor es de gran magnitud, resulta conveniente que el proceso constructivo contemple períodos prolongados (mínimo 6 meses) entre la construcción del terraplén y la sección estructural del pavimento, para que se lleve al cabo el proceso de consolidación y posteriormente efectuar renivelaciones.

Para terraplén de mayor altura, los asentamientos se consideran inadmisibles.

3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis de estos resultados va a dar propuestas que se tienen que revisar a fondo

3.3 EVALUACIONES

Se llevaron a cabo las siguientes evaluaciones:

Adicionalmente, en ausencia de registros de control de calidad de los terraplén que permitan definir con exactitud el peso volumétrico del material, estos análisis se realizaron tomando en cuenta diferentes pesos volumétricos para varias alturas de terraplén.

Los resultados de los análisis de estabilidad de taludes y asentamientos por consolidación presentados en las Tablas 6 a 7 Anexo 3 RVO y Cia, sugieren que para garantizar un adecuado comportamiento de los terraplenes que conforman el tramo analizado, éstos deberán construirse con materiales cuyos pesos volumétricos sean menores a 1.5 ton/m^3 y con alturas máximas de 2.0 m.

La evaluación de la estabilidad global de los taludes de los terraplenes se analizó mediante análisis bajo condiciones estáticas y pseudo-estáticas, utilizando para ello el método de las dovelas, bajo el enfoque de Fellenius (Juárez y Rico, 2000).

3.4 ALTERNATIVAS

SERICAL propone:

- Se recomienda que el terraplén tenga una altura promedio de 2.50 m y de forma extraordinaria, se permitirá en tramos cortos, alturas hasta de 3.50 m.
- Se recomienda que durante la construcción de la autopista, se permita un intervalo de al menos 6 meses, entre la finalización del terraplén y la construcción de la sección estructural del pavimento, con la finalidad de propiciar la generación de los asentamientos pronosticados y posteriormente facilitar la renivelación de las terracerías.
- Se consideró una carga viva de 1.50 ton/m^2 , determinada a partir de la figura 5 “Modelo de cargas vivas vehiculares IMT 66.5, para el análisis transversal o tridimensional de puentes y estructuras similares”, contenida en la Norma SCT N-PRY-CAR-6-01-003/01.

▪ **Análisis y diseño de la alternativa de solución**

Debido a que el terreno sobre el cual se apoyarán los terraplenes es altamente compresible y posee propiedades de resistencia bajas; tomando en cuenta los resultados del inciso 3.1, se propone construir los terraplenes a lo largo del trazo del proyecto combinando materiales térreos ligeros como el tezontle y bloques de polietileno expandido (EPS), con el fin de garantizar que se satisfagan las condiciones de servicio requeridas para el proyecto. En la Figura 15 Anexo RVO se presenta un esquema general de la solución propuesta.

Para el diseño de la alternativa de solución a lo largo del tramo km 4+500 al km 10+000 se analizaron 20 sitios, de los cuales 5 corresponden a pasos superiores vehiculares (PSV), 2 a pasos inferiores vehiculares (PIV), 4 cajones de concreto, 3 puentes y 6 sitios intermedios entre los cadenamientos de las estructuras anteriores.

3.5 PROPUESTAS

A) Se propuso construir los terraplenes entre los km 303+720 al km 10+000, combinando tezontle y bloques de polietileno (EPS) por la falta de capacidad del terreno por donde fue trazada la autopista.

Así mismo que la altura donde se proyectaron puentes, PIV'S y PSV'S con una altura de 7.45 m a 11.00 m.

B) Construirlo con Tezontle únicamente la altura de todo el terraplén.

C) Recomendación de RVO y CIA

Primera. Realizar análisis de capacidad de carga, estabilidad de taludes y asentamientos a largo plazo, en el tramo comprendido del km 4+500 al km 6+300, en el que se considera sustituir los bloques de EPS por tezontle.

Segunda. Conformar el terraplén con tezontle como se indica en *Flores et al., 2011* en el tramo del km 4+500 al km 6+300 y dejarlo en estas condiciones de 1 a 1.5 años, buscando que se genere un proceso de consolidación por precarga antes de colocar el pavimento.

Tercera. Como es un hecho que el terraplén sufrirá asentamientos importantes, se debe prever un sobreecho desde la corona, que permita ajustar la rasante de proyecto.

Cuarta. Es estrictamente necesario colocar referencias superficiales al centro de la autopista (a cada 100 m) y monitorear quincenalmente cada punto, desde que se conforme el terraplén, se construya el pavimento y durante la operación de la obra.

Quinta. Las referencias superficiales estarán formadas por cubos de concreto sólido de 0.40 m embebido en el terraplén y del cual salga una varilla de $\frac{3}{4}$ " con cuerda en su

extremo (para añadir un tramo adicional, de ser necesario) y marcada en su centro con un punzón, para indicar el punto de medición.

Sexta. Los valores de asentamiento que se obtengan de las mediciones, para cada cadenamamiento, se deben graficar contra el logaritmo de tiempo (en días), los cuales deben analizarse anualmente por un especialista geotécnico, para definir el grado de consolidación de los estratos de suelo en el terreno natural.

Séptima. El pavimento estaría constituido por una carpeta asfáltica convencional (en caliente) de 10 cm de espesor, “manteada” previamente sobre una base de grava triturada sin finos, de 25 cm de espesor. La subbase conviene que sea ligera (tezontle), con tamaño máximo de 2” con renivelaciones del mismo material de 1.5” de tamaño máximo. Las capas inferiores (subyacente y subrasante) serían también de tezontle, similarmente a las que están en ejecución.

3.6 Soluciones.

La solución para construir terraplenes hasta una altura de 3.00 m en relación a la recomendación del punto C de las propuestas 3.5 entre los kilómetros 4+500 al 9+000.

Se proyectó un viaducto del km 104+530 al 104+900 con una altura de 2.45m a 11.00m. Así como otro viaducto del km 103+801.596 al km 104+420. Con una altura de 6.00 m. a 11.00 m (Anexo 4 Mexpresa).

También se proyectó un puente sobre el rio Lerma con una longitud de 118.00m. (Anexo 4 Mexpresa).

- Estructura de concreto reforzado. De $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$
- Ancho de 22.06 m
- Dos carriles de 10.50 m c/u
- Altura de 2.85m a 11.00 m
- Pendiente transversal del 2%
- Concreto hidráulico $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$, por unidad de obra terminada (inciso 026-h.10): en pilotes de cimentación "pilastrones"

Se consideró posible sustituir el volumen de EPS por tezontle, tomando en cuenta que el espesor de 1.7 m, inicialmente propuesto por RVO y Cía., se incrementará a 2 m (Aprox).

Comentarios.

El terraplén conformado con tezontle ya se tiene avanzado, del km 4+500 al km 5+500 con una altura aproximada que fluctúa entre 1.7 y 2 m. Este se dejó de construir hace aproximadamente un año y, por tanto, en todo este tiempo ha tenido la función de precargar el terreno natural. Del km 5+500 al km 6+300 se está terminando de conformar el terraplén en este momento y, de acuerdo con lo comentado durante la visita, se mantendrán los dos tramos de terraplén en estas condiciones durante 1.5 años, como mínimo.

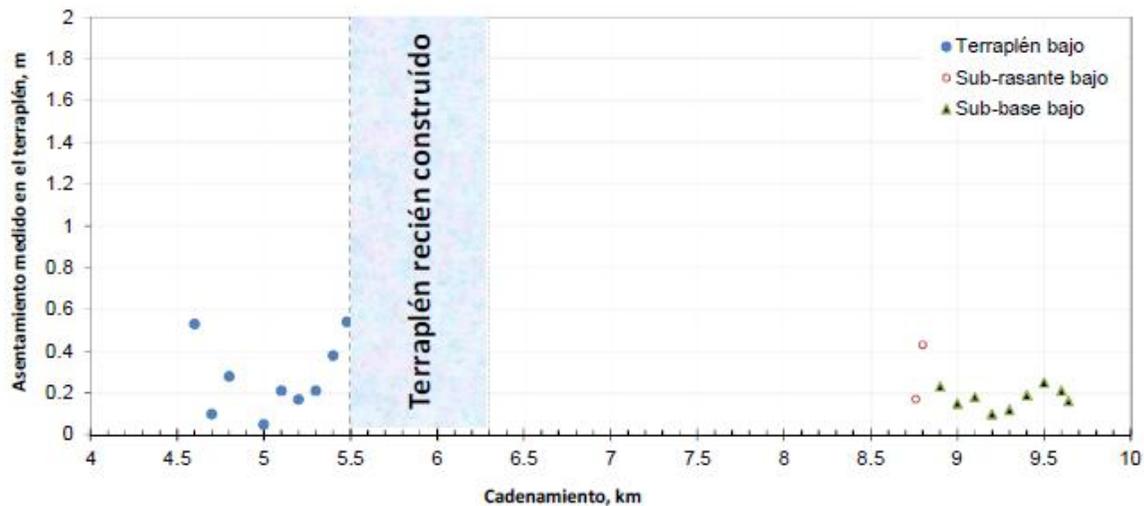


Figura Soluciones 1. Asentamientos por consolidación a lo largo del tramo analizado (Rodríguez, G., 2013)

4.1 CONCLUSIONES

Siempre que se inicie un proyecto se debe atender y cumplir la normativa de la S. C. T.

Tener un especialista en proyectos para cada concepto y poder cumplir con las metas fijadas para el proyecto.

Siempre tener en mente que se ejecuten los proyectos tanto económicamente como longitudes menores a las que se tienen en carreteras libres del tramo, en este caso entre Toluca-Naucalpan.

4.2 RECOMENDACIONES

Las obras concesionadas son las que deben tener más cuidado en la elaboración de proyectos por que se tiene que cuidar en las autopistas el costo de conservación menor y mayor sean mínimos para que cumpla con su proyección tanto en gastos como recuperación financiera.

Nunca se debe iniciar una obra hasta que queden bien cubiertos todos los aspectos geotécnicos del lugar por donde se va a trazar una carretera.

No escatimar en costos por proyecto porque de lo contrario se va a incrementar en los costos en un 400% a 500 %.

Referencias

Juárez, E. Y Rodríguez, R.” Mecánica de Suelos, Tomo II. Teoría y aplicaciones de la Mecánica de suelos”. Editorial Limusa S.A. de C. V., año 1973. Fue consultado con las fórmulas que se utilizaron para el cálculo de asentamientos y lo relacionado con los estudios que se llevaron a cabo en el tipo de suelo que se encontró en el subsuelo.

S.C.T. Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras, Dirección General de Servicios Técnicos, 2016. Para el cálculo del alineamiento horizontal, vertical con sus especificaciones para la elaboración del proyecto de la carretera.

Manual de Construcción Geotécnica Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A. C. México 2002.se utilizo en el estudio de mecánica de suelos en la falla.

Ingeniero Bulmaro Cabrera Ruiz. Laboró como Director Proyectos de Carreteras Federales, SCT, Proyecto fotogramétrico, Especialista en Vías Terrestres. Técnico que elaboro el proyecto Geométrico de la carretera, año 2008.

JESA, S.A. DE C. V. Proyectista en Puentes. Elaboro el proyecto de varios puentes en el tramo de este trabajo, año 2017.

MEXPRESA, S. A. C.V. Constructor de Puentes. Elaboro el el proyecto y su construcción del viaducto que se ubica del km 3+700 al km 4+900.

SERICAL, S. A. de C.V. Empresa que elabora estudios Mecánica de Suelos. En la falla ubicada en el km 8+300, año 2014.

Raúl Vicente Orozco, Cía. S. A. de C. V. Consultores, estudios pavimentos, Mecánica de suelos. Empresa que elaboró el Informe Geotécnico del km 4+500 al km 10+000.

Normas de Servicios Técnicos, Proyecto Geométrico 2.01.01 S. C. T. 1984.utilizado en la elaboración del proyecto Geométrico, año 2010.

Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras, Dirección General de Servicios Técnicos, 2000. S. C. T. utilizado en la elaboración del proyecto Geométrico.

NORMATIVA SCT 2010, las normas que se tienen que cumplir de acuerdo con la Secretaria de Comunicaciones y Transportes.



Glosario

<OPCIONAL: Si no se va a emplear un glosario, borrar toda la página, incluyendo la próxima transición de página>

Apéndice

<OPCIONAL: Si no se va a presentar un apéndice, borrar toda la página incluyendo la transición de página a continuación>

Curriculum Vitae

MARCO ANTONIO LEÓN NARES

Email: leonnares@gmail.com | Teléfono: +52-4434917092 / 5541335220
Paquihuata #315col. Félix Ireta Morelia, Michoacán, MX 58070

GERENTE | ESTUDIOS MAESTRIA EN VIAS TERRESTRES DISEÑO | SUPERVISIÓN DE CONSTRUCCIÓN

Con experiencia en proyectos de ingeniería principal y secundaria de carreteras, estoy bien versado para la planificación de proyectos, experiencia en mecánica de suelos, en pruebas de materiales de laboratorio, geotécnica, proyectos en túneles, puentes, diseño de carreteras tipo Autopistas A2 (corona 12.0 m, calzada de 7.0m), A4 (corona 22.0 m, mínimo 2x calzada de 7.0m, faja separadora de 1.0m), A4S (corona 2 x 11.0 m, 2x calzada de 7.0m, faja separadora 8.0 mínimo), con pavimentación de asfaltos y de hormigón, carreteras B (corona 9.0m, calzada de 7.0m), C (corona 7.0m, calzada de 6.0m), D (corona 6.0 m, calzada de 6.0m) y E (corona 4.0m, calzada de 4.0m).

Se tiene una amplia experiencia en proyecto, Supervisión y Construcción de Caminos, Autopistas Concesionadas y Autopistas contratadas por el gobierno así de pavimento Asfáltico como rígido, la rehabilitación de pavimento flexible y de pavimento rígido, mantenimiento rutinario, mantenimiento periódico.

EXPERIENCIA PROFESIONAL

INGENIERÍA, CONTROL Y ADMINISTRACIÓN, S.A. DE C.V. Morelia, Michoacán Gerente de Asistencia Técnica.	Octubre 2017 – Diciembre 2018
CONCRETOS Y OBRA CIVIL DEL PACIFICO, SA DE CV, Toluca, MEXICO Gerente de Proyectos	Febrero 2009 – Diciembre 2016
Mezcla Asfálticas De Alta Calidad, Toluca Estado de México, México <i>Superintendente General de Obra.</i> Contrato con el Gobierno Estatal.	Julio 2011 – Enero 2013
Pro Infra S. A. de C.V, Oztolapan Estado de México, MEXICO, <i>Superintendente General de Obra.</i> Contrato con el Gobierno Estatal.	Noviembre 2007 – Junio 2008
SCAVI, S. A. de C.V, Jilotepec Estado de México, MEXICO. <i>Superintendente de construcción.</i> Construcción de autopista A4, contrato Federal. SCT	Julio 2007 – Octubre 2007
G.C.P. S.A. de C.V., Tecamachalco, Estado de Puebla, MEXICO. <i>Superintendente control de trabajos y estimaciones.</i> Rehabilitación de autopista A4, contrato con CAPUFE.	Enero 2007 – Julio 2007
G.C.P. S.A. de C.V., Tecamachalco, Estado de Puebla, MEXICO. <i>Superintendente control de trabajos y estimaciones.</i> Rehabilitación de autopista A4, contrato con CAPUFE.	Enero 2007 – Julio 2007
C.M.C.O. S.A. de C.V., Jilotepec Estado de México, MEXICO. <i>Superintendente General de Construcción.</i> Construcción de autopista tipo A4 contrato con el Gobierno Federal. SCT	Enero 2006 – Diciembre 2006
CAMINOS Y PUENTES FEDERALES Y CONEXOS (CAPUFE), Cuernavaca Morelos, MEXICO <i>Sub Gerente de control de calidad de obras</i>	Julio 2001– Mayo 2005



CAMINOS Y PUENTES FEDERALES Y CONEXOS (CAPUFE), Guadalajara Jalisco, MEXICO Agosto 2000– Junio 2001
Sub Delegado Técnico, Delegación IX
Organismo público federal descentralizado denominado Caminos y Puentes Federales de ingresos y Servicios Conexos.

C.M.C.O. S.A. de C.V., Morelia Estado de Michoacán, MEXICO. Enero 1999 – Diciembre 1999.
Superintendente General de Construcción.
Contrato con Petróleos Mexicanos.

LABORATORIO DE MATERIALES COMSET, S.A. DE C. V., San Juan del Rio, Querétaro, México Enero 1997-Diciembre 1988
Residente General.
Re Construcción de autopista en tramos de tipo A4 y A4S, contrato Federal. SCT

DIPRO S. A. DE C.V., El Salvador, San Salvador, CENTRO AMERICA. Febrero 1996 – Diciembre 1996
Gerente General

DIPRO S. A. DE C.V., Huandacareo, Panindicuario, Zinapécuaro Michoacán, MEXICO Febrero 1991 – Diciembre 1995
Sub Coordinador, Coordinador y Gerente
Contrato con la Empresa autopistas de Occidente, ICA.

SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, Varios Estados, MEXICO Febrero 1997 – Junio 1990
Sub Residente, Residente, Jefe Oficina Técnica, Residente General
Carreteras B, C, D, E.

EDUCACIÓN

Maestría en Vías Terrestres, 1978 – 1979

Universidad Autónoma de Chihuahua, Chihuahua, México

Perito en Vías Terrestres (construcción), 2012

Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de México, Estado de México, MÉXICO

Ingeniero Civil Cédula Profesional # 267005

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO, Morelia, Michoacán, MÉXICO

CURSOS DE ACTUALIZACIÓN

2016	4to Simposio Internacional de Túneles y Lumbreras en Suelos y en rocas.
2016	Curso Taller: Flujo de Agua en Suelos y Estructuras Terreas
2016	Sistemas de contención en Excavaciones profundas Para Edificaciones.
2016	Diseño de pavimentos Rígidos y Flexibles.
2015	Geología aplicada a la Ingeniería Civil.
2014	Cuarto congreso Mexicano de Ingeniería de túneles y Obras subterráneas 2014.
2013	Mecánica de Rocas, Ingeniería de rocas y métodos Empíricos para proyectos hidroeléctricos y de transporte.
2013	Uso de clasificación geo mecánicas en obras civiles Subterráneas y en minería.
2013	3er Simposio Internacional de túneles y lumbreras en Suelos y rocas.
2012	Perito Profesional en Vías Terrestres. Colegio de Ingenieros Civiles del estado de México
2012	Seminario Internacional Innovaciones tecnológicas de las Mezclas asfálticas en América. AMAAC
2011:	Certificación de Analista de Precios Unitarios y



2010	Symposium, "Design, construction and supervision of road tunnels". México, D.F. August 5-7 2010
2010	XVIII Reunión Nacional de Ingeniería de vías terrestres, León, Gto. 14 al 16 de Julio del 2010
2010:	Curso sobre Instrumentación Geotécnica en obras Civiles. Sociedad Mexicana Ingeniería Geotécnica.
2010:	Congresista en la Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Sociedad Ingeniería Geotécnica
2008:	Curso de Precios Unitarios y control de obra
2008:	Curso de Gestión de Proyectos
2006:	Curso sobre precios unitarios y Ajustes de Escalatorías. Colegio de Ingenieros de Civiles, Estado de México
2000:	Polímeros de asfaltos modificados
2000:	Cursos de Microsoft Office (Word, Excel, Microsoft Project, Primavera, Autocad, Y Opus.
1990:	Gestión y Sistemas de Control Introducción general para la construcción y mantenimiento de obras Públicas (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Gobierno de México)
1990:	Cargas especiales en Puentes de Diseño Estructural
1986:	Introducción a la administración Pública de México
1984:	Supervisión y control de trabajos.
1982:	Rendimiento de los equipos de Servicio pesado
1981:	Estabilidad de Taludes en Caminos

SOCIO DE ORGANIZACIONES PROFESIONALES

ASOCIACIÓN MEXICANA DE VÍAS TERRESTRES A.C.,
COLEGIO DE INGENIEROS CIVILES MÉXICO.
SOCIEDAD MEXICANA DE INGENIERÍA GEOTÉCNICA,
ASOCIACIÓN MEXICANA DE INGENIERIA DE TUNELES Y OBRAS SUBTERRANEAS, A. C.
SOCIO DEL PIARC.
SOCIEDAD INTERNACIONAL DE MECÁNICA DE ROCAS (ISRM).



Domicilio Permanente: Paquihuata #315
Colonia Félix Ireta

Morelia, Michoacán.
CP. 58070

Esta tesis fue mecanografiada por el Ing. Mirsha Barbosa Vázquez.