



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: LM-IG-06-19

Revisión de los estudios de suelo del proyecto de la Rotonda de la Bandera y de la intersección de Guadalupe – Ruta Nacional N° 39

INFORME FINAL

Preparado por:
Ing. Ana Lorena Monge S, M.Sc.
Coordinadora
Programa de Ingeniería Geotécnica



San José, Costa Rica
Mayo, 2019



CONTENIDO

I.	Introducción	4
II.	Revisión de la sección 2.2.2 “Geología y geotecnia” de “Memorias”	4
III.	Revisión del Anexo 2 “Estudio de geología y geotecnia”	9
III.1	Estudio de suelos para el sitio de la Rotonda de la Bandera	10
III.1.1	Modelo geológico – geotécnico del sitio y parámetros de los materiales	10
III.1.2	Niveles freáticos	10
III.1.3	Evaluación del potencial de licuación de suelos por sismo	11
III.1.4	Geotecnia de las obras de tierra	13
III.1.5	Geotecnia de las estructuras.....	14
III.2	Estudio de suelos para el sitio de la intersección de Guadalupe.....	16
III.2.1	Modelo geológico – geotécnico del sitio y parámetros de los materiales	16
III.2.2	Niveles freáticos	16
III.2.3	Evaluación del potencial de licuación de suelos por sismo	17
III.2.4	Geotecnia de las obras de tierra	18
III.2.5	Geotecnia de las estructuras.....	19
IV.	Comentarios finales.....	20
V.	Referencias	21



REVISIÓN DE LOS ESTUDIOS DE SUELO DEL PROYECTO DE LA ROTONDA DE LA BANDERA Y DE LA INTERSECCIÓN DE GUADALUPE – RUTA NACIONAL N° 39

I. Introducción

Por solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica, el presente informe muestra el resultado de la revisión de la Memoria y Anexo 2 “Geología y Geotecnia” de los Proyectos de las intersecciones de la Rotonda de la Bandera y de Guadalupe – Ruta Nacional N° 39 elaborado por el Euroestudios.

En las “Memorias” se aterriza el modelo geológico – geotécnico del sitio, resultante de los estudios de suelos realizados por la empresa Castro y de la Torre. El anexo 2 muestra el resumen elaborado por Euroestudios a partir de los informes entregados por Castro y de la Torre acerca del trabajo realizado para determinar la geología y la geotecnia para cada sitio. En este anexo también se muestran los informes entregados por Castro y de la Torre, los cuales también se someten a revisión.

II. Revisión de la sección 2.2.2 “Geología y geotecnia” de “Memorias”

En este apartado Euroestudios indica que los estudios de suelo para ambos sitios de las intersecciones, tanto de la Rotonda de la Bandera como de Guadalupe, así como las recomendaciones de algunos diseños los realizó la empresa Castro y de la Torre.

Euroestudios comenta que la campaña de estudio se realizó mediante la realización de ensayos de campo, en los cuales se tomaron muestras, para luego determinar las propiedades de los materiales con información adicional que arrojan los ensayos de laboratorio. Esta campaña consistió en:

- 26 perforaciones de SPT y rotación con extracción de muestras de manera intercalada. 16 de estas perforaciones se realizaron en la Rotonda de la Bandera y 10 en la intersección de Guadalupe
- 2 perfiles de refracción sísmica, uno en cada sección principal del Proyecto
- 23 trincheras de reconocimiento para la capa de pavimento. 13 en la Rotonda de la Bandera y 10 en la intersección de Guadalupe.

Con los resultados obtenidos de estos ensayos y con información adicional obtenida de ensayos de laboratorio de las muestras recolectadas, se obtiene la estratigrafía mostrada en la Tabla 1, para la Rotonda de la Bandera y la Tabla 2 para la intersección de Guadalupe, las cuales son una compilación de la descripción dada por Castro y de la Torre en sus informes.

Cabe destacar que después de observar los resultados de los informes de Castro y de la Torre y del resumen presentado por Euroestudios, este último identifican como iguales a los materiales de las unidades UG-1 a la UG-6 de ambos sitios, diferenciando únicamente los materiales de la unidad UG-7 de cada sitio, los cuales son considerados como el basamento para la pantalla de pilotes que se está planteando realizar.



Tabla 1. Estratigrafía del sitio de la intersección en la Rotonda de la Bandera

Material	Unidad	Descripción
Rellenos antrópicos	UG-1	Limos plásticos con alto contenido de arena y suelos arenoso. Color café oscuro. Consistencia moderadamente firme. Con espesores entre 0 a 4.9 m, siendo el promedio entre 1.5 a 2.0 m.
Formación Lavina ultrafina 1	UG-2	Limos plásticos arenoso. Color gris y café. Consistencia moderadamente firme. Relación matriz-bloques entre 93%-7% y 99%-1%. $N_{spt}= 4 - 5$. Con espesores entre 2.5 a 4 m.
Formación Lavina ultrafina 2	UG-3	Limos plásticos con arena. Color café. Consistencia firme. Relación matriz-bloques entre 80%-20% y 98%-2%. $N_{spt}= 11 - 14$. Con espesores entre 2 a 4 m.
Formación Lavina ultrafina – fina	UG-4	Limo plástico. Color café oscuro. Consistencia firme. Relación matriz-bloques entre 56%-44% y 99%-1%. $N_{spt}= 21$. Con espesores entre 5 a 7 m.
Formación Lavina fina	UG-5	Limos plásticos arenoso. Color café. Consistencia dura. Relación matriz-bloques entre 64%-36% y 85%-15%. $N_{spt}> 30$. Con espesores entre 4 a 6 m.
Formación Lavina cementada	UG-6	Bajo UG-4 o UG-5. Consistencia dura. Rebote de SPT. Con espesores entre 16 a 20 m.
Formación Lavina gruesa	UG-7	Bloques rodeados de poca arena o arcilla. Se encuentra a una profundidad aproximada de 30 m.

Tabla 2. Estratigrafía del sitio de la intersección en Guadalupe

Material	Unidad	Descripción
Rellenos antrópicos	UG-1	Limos plásticos con alto contenido de arena y suelos arenoso. Color café oscuro. Consistencia moderadamente firme. Con espesores entre 0 a 4.9 m, siendo el promedio entre 1.5 a 2.0 m.
Formación Lavina ultrafina 1	UG-2	Limos plásticos arenoso. Color gris y café. Consistencia moderadamente firme. Relación matriz-bloques entre 93%-7% y 99%-1%. $N_{spt}= 4 - 5$. Con espesores entre 2.5 a 4 m.
Formación Lavina ultrafina 2	UG-3	Limos plásticos con arena. Color café. Consistencia firme. Relación matriz-bloques entre 80%-20% y 98%-2%. $N_{spt}= 11 - 14$. Con espesores entre 2 a 4 m.
Formación Lavina ultrafina – fina	UG-4	Limo plástico. Color café oscuro. Consistencia firme. Relación matriz-bloques entre 56%-44% y 99%-1%. $N_{spt}= 21$. Con espesores entre 5 a 7 m.
Formación Lavina fina	UG-5	Limos plásticos arenoso. Color café. Consistencia dura. Relación matriz-bloques entre 64%-36% y 85%-15%. $N_{spt}> 30$. Con espesores entre 4 a 6 m.
Formación Lavina cementada	UG-6	Bajo UG-4 o UG-5. Consistencia dura. Rebote de SPT. Con espesores entre 16 a 20 m.
Formación Tiribí	UG-7	Toba lítica. Color gris. Se encuentra a una profundidad aproximada de 30 m.

A pesar de que Euroestudios correlaciona los materiales de ambos sitios, es claro en mantener la diferenciación de las características geomecánicas de estos, ya que en los estudios de suelos presentados por Castro y de la Torre, si existen diferencias en algunas de ellas.

Las propiedades de los materiales para el sitio de la Rotonda de la Bandera se observan en la Tabla 3 y las de los materiales encontrados en la intersección de Guadalupe se resumen en la Tabla 4.



Tabla 3. Caracterización geomecánica de los materiales encontrados en el sitio de la intersección de la Rotonda de la Bandera

Propiedades									
Unidad	SUCS	Densidad (kg/m ³)	Humedad (%)	Finos (%)	LL	IP	Cohesión (kPa)	φ (°)	Balastro (T/m ³)
UG-1	MH-SM	1550	11-50 (37)	42-56 (49)	51-53 (52)	18	0.0	28.0	1600
UG-2	MH, MH-SM	1650	36-48 (42)	35-84 (55)	50-65 (57)	20-28 (22)	9.8	20.0	1500
UG-3	MH, MH-SM	1650	22-66 (48)	51-89 (76)	58-77 (65)	13-29 (22)	19.6	25.0	2400
UG-4	MH, MH-SM	1700	31-69 (51)	46-94 (71)	50-70 (63)	14-23 (20)	24.5	25.0	4800
UG-5	MH, MH-SM	1750	31-52 (43)	46-94 (71)	53-56 (54)	17-19 (18)	29.4	27.0	8000
UG-6	MH, MH-SM	1800	10-62 (44)	31-94 (57)	51-56 (53)	3-20 (12)	49.0	35.0	22500
UG-7	-	2000	34-38 (36)	< 25	-	-	9.8	38.0	10000 a 15000

Tabla 4. Caracterización geomecánica de los materiales encontrados en el sitio de la intersección Guadalupe

Propiedades									
Unidad	SUCS	Densidad (kg/m ³)	Humedad (%)	Finos (%)	LL	IP	Cohesión (kPa)	φ (°)	Balastro (T/m ³)
UG-1	CL-SM	1550	20-44 (35)	52-55 (54)	44-48 (46)	19-23 (21)	0.0	28.0	1600
UG-2	MH, MH-SM	1650	26-48 (39)	53-85 (70)	56-67 (60)	25-33 (30)	9.8	20.0	1500
UG-3	MH, MH-SM ML, ML-SM	1650	36-67 (46)	50-87 (76)	47-64 (56)	17-26 (21)	19.6	25.0	2400
UG-4	ML-SM, CL-SM, MH, MH-SM	1700	20-67 (42)	63-86 (74)	42-60 (50)	13-26 (19)	24.5	25.0	4800
UG-5	MH-SM	1750	34-72 (53)	71-79 (75)	53-61 (57)	20-30 (25)	29.4	27.0	8000
UG-6	MH, MH-SM	1800	14-54 (38)	75-82 (78)	51-59 (55)	16-20 (18)	49.0	35.0	22500
UG-7	-	2200	22-64 (49)	< 25	-	-	49.0	35.0	10000 a 15000

Euroestudios indica que después de realizar los análisis pertinentes de capacidad de soporte tomando en cuenta utilizar cimentaciones superficiales, se considera que a pesar de que el suelo es capaz de transmitir adecuadamente las cargas, se producen asentamientos mayores a los permitidos por el Código de Cimentaciones de Costa Rica, por lo que se decide proponer una pantalla de pilotes como solución a la retención de la masa de suelos.

Esta pantalla de pilotes se propone realizarla con diámetros de 0.6 m, 0.8 m y 1.0 m. Los pilotes se proponen empotrarlos 3 m en la capa que se considera más competente que es el Lahar cementado, en el Lahar en la fase gruesa (que aparece solo en la intersección de Guadalupe) o en la toba lítica.



La solución se considera adecuada, dadas las características del proyecto y a la experiencia con que se cuenta de los proyectos que anteriormente se han construido con dicha técnica (p.e. Rotonda de Guacamaya).

Adicionalmente, en las memorias generales de ambos proyectos, se indican las distintas obras a construir en ambas intersecciones, tratándolas como estructuras en serie desde la Rotonda de la Bandera hasta la intersección de Guadalupe. Se presume que esto es así porque al tener tan poca distancia entre los sitios de los Proyectos es preferible tratarlo prácticamente como uno solo. Las obras descritas, con su respectivo tipo de obra geotécnica, son las siguientes:

Tabla 5. Estructuras consideradas en las intersecciones de la Rotonda de la Bandera y Guadalupe

Estructura	Obra geotécnica
Viaducto UCR	Cimentación en pilotes de 0.8 m de diámetro
Puente quebrada Los Negritos	Losa de cimentación de 0.5 m de espesor
Puente río Torres	Losa de cimentación de 1.0 m de espesor
Rotonda de la Bandera	Cimentación en pantalla de pilotes de 0.8 m de diámetro. Separados 1.3 m de su eje. Empotramiento bajo la rasante de 10 m
Intersección de Guadalupe	Cimentación en pantalla de pilotes de 0.8 m de diámetro. Separados 1.3 m de su eje. Empotramiento bajo la rasante de 10 m
Puente peatonal	Cimentación superficial de concreto reforzado

Es importante destacar que no se cuenta con la revisión de la capacidad de las obras en el viaducto UCR, puente en quebrada Los Negritos y puente sobre el río Torres por parte de Euroestudios. Se presume consideran adecuadas las soluciones propuestas en los estudios de suelos de Castro y de la Torre, las cuales se comentarán en los apartados III.1.5 y III.2.5.

Adicionalmente a las estructuras descritas, Euroestudios plantea la construcción de muros en distintas estaciones, indicando las obras geotécnicas correspondientes. Para ninguna de estas estructuras, se observa el diseño tanto por parte de Euroestudios como en los estudios de suelo de Castro y de la Torre. En la Tabla 6 se muestran los muros de tipo suelo reforzado, mientras que en la Tabla 7 y Tabla 8, se muestran los muros compuesto para el sitio de la Rotonda de la Bandera y la intersección de Guadalupe, respectivamente:

Tabla 6. Muros de suelo reforzado planteados para el Proyecto de las intersecciones de la Rotonda de la Bandera y la intersección de Guadalupe

Muro	Longitud (m)	Altura máxima (m)
MSR-EJE 1-0.07 I	102	6.41
MSR-EJE 1-0.07 D	117	7.81
MSR-EJE 1-0.28 I	82.5	8.88
MSR-EJE 1-0.28 D	91.5	10.31
MSR-EJE 6-0.11 D	54	13.5
MSR-EJE 8-0.05 d	31	2.0



Tabla 7. Muros compuestos planteados para el Proyecto de la intersección de la Rotonda de la Bandera

Muro	Estación	Tipo	Altura máxima (m)
MP-EJE 1-0.38 I	0+391.9 – 0+414.17	Muro en L, espesor 0.3 m, cimentación superficial de 0.4 m de espesor	4.0
	0+414.17 – 0+424	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 6 m	5.0
	0+424 – 0+481.49	Pantalla pilotes arriostrados de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 8 m	9.0
	0+585.41 – 0+637.50	Pantalla pilotes arriostrados de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 8 m	8.0
	0+637.50 – 0+657.41	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 10 m	6.8
	0+657.41 – 0+685.76	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 6 m	5.0
	0+685.76 – 0+718.13	Muro en L, espesor 0.3 m, cimentación superficial de 0.4 m de espesor	4.0
MP-EJE 1-0.37 D	0+383.22 – 0+404.92	Muro en L, espesor 0.3 m, cimentación superficial de 0.4 m de espesor	4.0
	0+404.92 – 0+414.92	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 6 m	5.0
	0+414.92 – 0+424.92	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 10 m	6.8
	0+424.92 – 0+481.56	Pantalla pilotes arriostrados de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 10 m	9.0
	0+585.41 – 0+637.41	Pantalla pilotes arriostrados de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 8 m	8.0
	0+637.41 – 0+650.41	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 10 m	6.8
	0+650.41 – 0+662.41	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 6 m	5.0
	0+662.41 – 0+704.3	Muro en L, espesor 0.3 m, cimentación superficial de 0.4 m de espesor	4.0



Tabla 8. Muros compuestos planteados para el Proyecto de la intersección de Guadalupe

Muro	Estación	Tipo	Altura máxima (m)
MP-EJE 1-1.10 I	1+123.63 – 1+172.73	Muro en L, espesor 0.3 m, cimentación superficial de 0.4 m de espesor	4.0
	1+172.73 – 1+190.78	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 6 m	5.0
	1+190.78 – 1+296.5	Pantalla pilotes arriostrados de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 8 m	9.0
	1+392.6 – 1+419.43	Pantalla pilotes arriostrados de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 8 m	8.0
	1+419.43 – 1+435.23	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 10 m	6.8
	1+435.23 – 1+452.23	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 6 m	5.0
	1+452.23 – 1+486.39	Muro en L, espesor 0.3 m, cimentación superficial de 0.4 m de espesor	4.0
MP-EJE 1-1.10 D	1+113.51 – 1+151.41	Muro en L, espesor 0.3 m, cimentación superficial de 0.4 m de espesor	4.0
	1+151.41 – 1+166.91	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 6 m	5.0
	1+166.91 – 1+187.66	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 10 m	6.8
	1+187.66 – 1+296.49	Pantalla pilotes arriostrados de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 8 m	9.0
	1+393.1 – 1+419.98	Pantalla pilotes arriostrados de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 8 m	8.0
	1+419.98 – 1+434.68	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 10 m	6.8
	1+434.68 – 1+449.08	Pantalla pilotes en voladizo de 0.8 m ϕ , separados 1.3 m. Empotramiento en calzada de 6 m	5.0
	1+449.08 – 1+481.38	Muro en L, espesor 0.3 m, cimentación superficial de 0.4 m de espesor	4.0

Se considera recomendable realizar una revisión a los diseños para las estructuras propuestas en el Proyecto, dada su magnitud.

III. Revisión del Anexo 2 “Estudio de geología y geotecnia”

En el informe del anexo 2 se encuentra el resumen elaborado por Euroestudios acerca de los resultados de los estudios de suelos realizados por la empresa Castro y de la Torre. También se cuenta con los informes de Castro de la Torre que son los documentos que se procede a revisar con



mayor profundidad, dado que el resumen presentado al inicio del Anexo 2 es prácticamente el mismo que Euroestudios presenta en el documento “Memorias”.

A continuación, se muestran los comentarios que se tienen acerca de los apartados revisados de los documentos de Castro y de la Torre.

III.1 Estudio de suelos para el sitio de la Rotonda de la Bandera

III.1.1 Modelo geológico – geotécnico del sitio y parámetros de los materiales

Castro y de la Torre comenta que el modelo geológico – geotécnico presentado en la Figura 1 se determinó utilizando la información de los distintos materiales encontrados en las perforaciones, correlacionándolos con el perfil establecido por el ensayo de refracción sísmica, y los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras obtenidas.

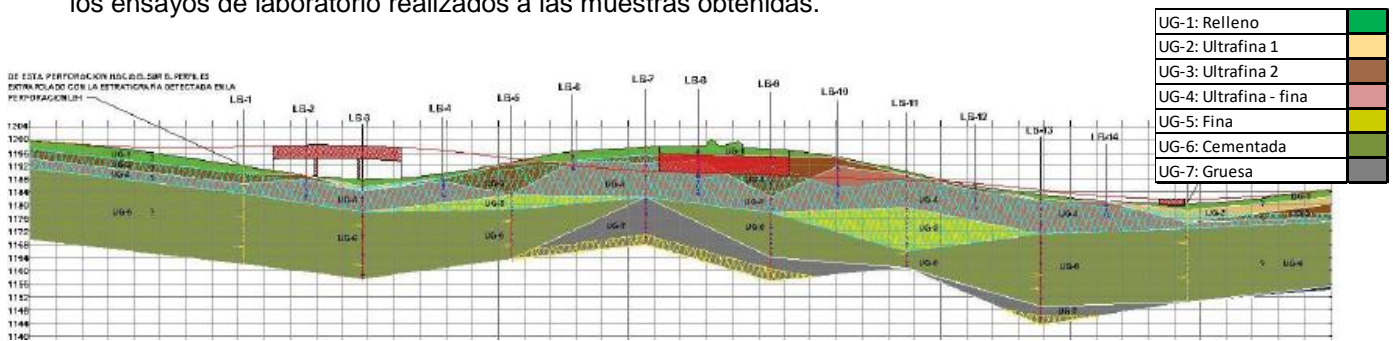


Figura 1. Modelo Geológico – Geotécnico del sitio de la intersección de la Rotonda de la Bandera

Las propiedades de estos materiales son las mostradas en la Tabla 3.

Se verifican las propiedades con los resultados de los ensayos mostrados en el informe. Se observa que los rangos de los valores dados se obtienen utilizando en la mayor parte de los casos los valores máximos y mínimos reportados para cada ensayo, excepto para los valores de resistencia en general para todas las unidades, en mayor grado con el valor de cohesión donde los resultados obtenidos en los ensayos de cote directo y triaxial, no corresponden en ningún caso al reportado como valor final en el informe. Esto también sucede para algunos materiales con el ángulo de fricción.

Se presume que los valores de cohesión y en algunos casos del ángulo de fricción, fueron tomados de las correlaciones realizadas con el ensayo de SPT, posiblemente porque los resultados arrojaban datos más altos a los esperados por el comportamiento de los materiales in situ.

A pesar de lo anterior, se considera que las propiedades asignadas están acordes con los materiales encontrados y son conservadoras respecto a los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio, además de que se cuenta con suficiente información para analizar y correlacionar para determinar estos como los parámetros de resistencia del modelo geológico – geotécnico.

III.1.2 Niveles freáticos

Con respecto a los niveles freáticos, en su informe Castro y de la Torre indica que se encontraron dos niveles: un nivel colgado en las profundidades entre 2 a 13 m, siendo la profundidad típica de 9 m, y un nivel freático regional entre las profundidades de 25 a 35 m, siendo el valor promedio encontrado típicamente de 27 m.



Es importante hacer notar que Castro y de la Torre indica que es aconsejable tomar las previsiones para realizar la evacuación de las aguas producto de la existencia de estos niveles freáticos, al momento de realizar la perforación para evitar los caídos en las paredes.

Se debe tomar en cuenta que el agua del nivel freático “colgado” entre las capas del lahar ultrafino y fino, puede afectar al concreto colocado en las perforaciones ya que, si el agua aportada por este nivel freático no es desplazada completamente por la masa de concreto colocado, es posible que forme parte de la mezcla del concreto si es que éste se consolida. Esto puede dar como resultado un concreto con menor resistencia, por la presencia de un exceso de agua, mayor a la del diseño de mezcla.

III.1.3 Evaluación del potencial de licuación de suelos por sismo

En el apartado 5.2.10.1 del informe, Castro y de la Torre indica que para este tipo de suelo no existirá potencial de licuación porque el material encontrado no cumple con los siguientes 4 criterios:

- Arenas finas con granulometría específica (menos de un 20% de finos)
- Que las arenas estén sumergidas bajo el nivel freático
- Que el N_{spt} sea inferior a 25 golpes/pie (82 golpes/m)
- Que el espesor de la capa sea superior a 1,0 metro

Sin embargo, es conocido que materiales de grano fino, con ciertas características particulares puede presentar licuación. Entonces, para analizar si el estudio simplificado realizado por Castro y de la Torre es suficiente, es necesario verificar si los 4 criterios se cumplen.

En la Tabla 3, se puede verificar el porcentaje de finos para cada material, indistintamente si se clasifica o no como arena. Como se observa, todos los materiales presentan un porcentaje de finos mayor al 20%, por lo que no se cumple la primer premisa.

En el apartado III.1.2, se indicó que Castro y de la Torre, detectó dos niveles freáticos en el sitio del proyecto, uno entre los 2 a 13 metros y otro entre los 25 a 35 m. Revisando las profundidades a las que se encontraron los distintos materiales de cada capa, se observa de una u otra forma todos ellos se verían influenciados por el nivel freático, por tanto si se podrían encontrar bajo condiciones saturadas.

Para el análisis de las últimas dos premisas, se cuenta con la información de la Tabla 9, en la cual se observan el número de golpes y el espesor promedio de las distintas capas de los materiales que forman parte del modelo geológico – geotécnico.

Tabla 9. Estratigrafía del sitio de la intersección de las Garantías Sociales

Material	Número golpes N_{spt}	Espesor promedio (m)
UG-1	-	1.8
UG-2	4-5 (4)	3.2
UG-3	11-14 (12)	3
UG-4	21	6
UG-5	> 30	5
UG-6	Rebote	18
UG-7	Rebote	-



En todos los casos, las últimas dos premisas se cumplen. Esto no es indicado en el informe de Castro y de la Torre, porque como se mencionó anteriormente, se concentran en estos análisis para materiales tipo arena únicamente y no toman en cuenta los suelos de grano fino.

A continuación, se muestra el análisis adicional que se realiza para determinar si algún material presente en el sitio pueda ser susceptible a licuación, utilizando la metodología de la carta de plasticidad modificada por Idriss et al.

III.1.3.1 Análisis adicional de licuación en los suelos del Proyecto

La metodología que se utiliza para el análisis adicional es en primer lugar determinar el potencial de licuación de los materiales con plasticidad, colocándolos en la carta de plasticidad modificada por Idriss et al, presentada en el Seminario de la ASCE del 2003, la cual incluye una zonificación de suelos potencialmente licuables. Esta carta de plasticidad modificada es la que se muestra en la Figura 2.

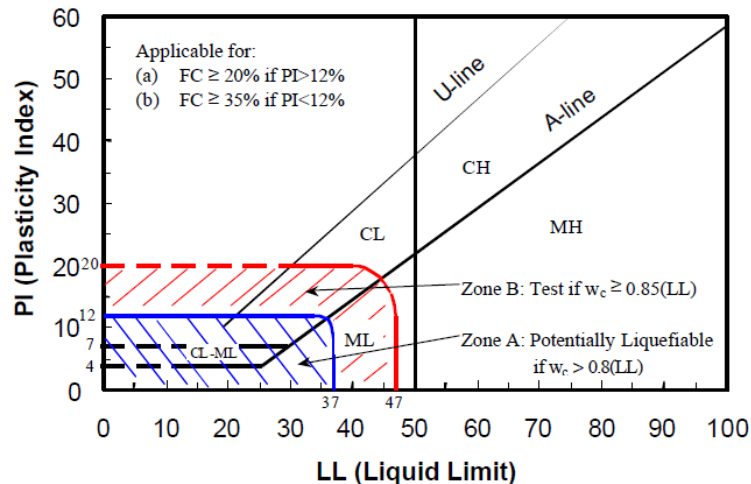


Figura 2. Carta de plasticidad modificada por Idriss et al (2003)

Cabe destacar que esta carta de plasticidad es aplicable para dos condiciones de suelos, a saber:

- Contenido de finos mayores que 20% si poseen un índice de plasticidad mayor que 12%
- Contenido de finos mayores que 35% si poseen un índice de plasticidad menor que 12%

Es importante hacer notar que, en esta carta de plasticidad modificada, la licuación se puede producir cuando al clasificar el suelo, este se encuentra en la zona A (zona azul) donde existe un potencial de licuación si el contenido de humedad natural del suelo es mayor al 80% del Límite Líquido ($w_c > 0.8LL$), o se encuentra en la zona B, donde la licuación podría presentarse si el suelo posee un contenido de humedad natural es mayor o igual al 85% del Límite Líquido ($w_c \geq 0.85LL$). La zona C es libre de licuación, al menos en su presentación clásica.

Analizando los valores de límite líquido e índice de plasticidad promedio, obtenidos por Castro y de la Torre a través de sus ensayos de laboratorio, en la carta de plasticidad modificada, se obtiene lo mostrado en la Figura 3.

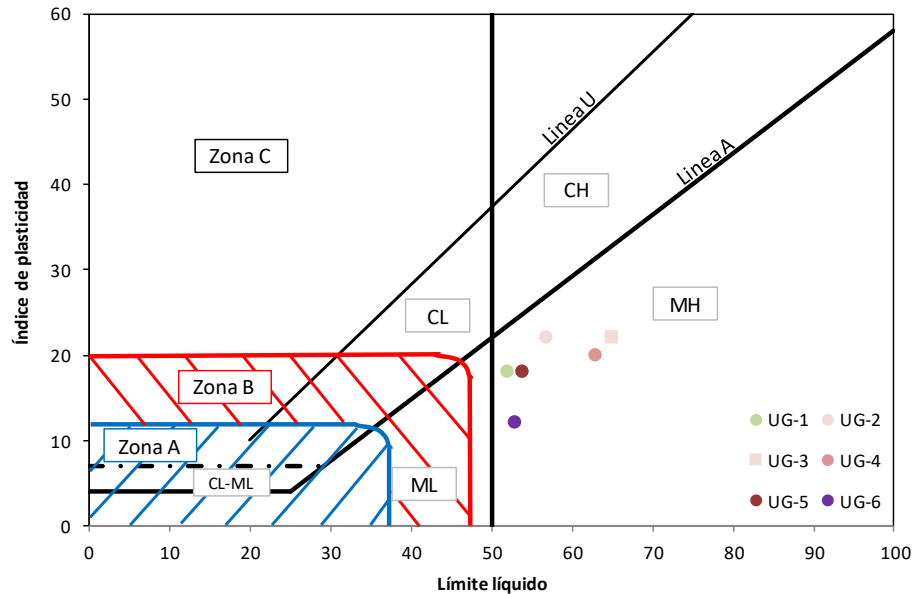


Figura 3. Carta de plasticidad modificada: sitio del proyecto de intersección de Garantías Sociales

Afortunadamente, ninguno de los materiales se encuentra en las zonas de potencialidad de licuación. Por lo tanto, no existe potencial de licuación de la capa de Rellenos antrópicos, y entonces es posible tomarla en cuenta para posibles cálculos de aporte de resistencia a la fricción de pilotes.

III.1.4 Geotecnia de las obras de tierra

La empresa Castro y de la Torre realiza una serie de recomendaciones al respecto de las excavaciones y de las cimentaciones de las obras. A continuación, se comenta al respecto. temporales.

III.1.4.1 Cortes

Las recomendaciones dadas para los cortes en los materiales que se deban realizar en el proyecto son las que se resumen en la Tabla 10.

Tabla 10. Recomendaciones dadas para los cortes del proyecto

Material	Pendiente del corte
UG-1	3H:1V
UG-2, UG-3	2H:1V
UG-4, UG-5, UG-6, UG-7	3H:2V

Castro y de la Torre es enfático en que se debe realizar el manejo de aguas apropiado para poder garantizar la estabilidad de estos materiales.

Estas recomendaciones no van acompañadas de análisis de estabilidad en el informe por lo que se consideran recomendaciones generales y conservador realizadas por Castro y de la Torre para contar con una premisa inicial. Sin embargo, esto no se considera problemático en vista que la contención de los suelos se realizará por medio de un muro de pantalla de pilotes.



III.1.4.2 Compactabilidad y uso en rellenos de los suelos detectados

Las recomendaciones dadas por Castro y de la Torre para realizar rellenos se consideran adecuadas.

III.1.5 Geotecnia de las estructuras

A continuación, se comenta acerca de la revisión de los resultados mostrados en el informe acerca de la capacidad de soporte del medio, así como los asentamientos asociados, acerca de los parámetros a utilizar para el diseño de muros de contención y del análisis realizado a los pavimentos existentes.

Cabe señalar que Castro y de la Torre, solamente realiza cálculos de la capacidad de los pilotes, siendo estos utilizados como cimentación, y no pareciera que realizara el diseño de la pantalla de pilotes, como una estructura de contención.

Este diseño se presume, lo realiza la empresa contratada para realizar la construcción de este, sin embargo, no se cuenta con esta información como para corroborar esta suposición.

III.1.5.1 Capacidad de soporte y asentamientos

Se observan los resultados de los análisis de capacidad de soporte y de asentamientos para diferentes anchos de placa, para cada unidad de material encontrado en el sitio. La capacidad de soporte es adecuada para cada opción y para los materiales, sin embargo, los asentamientos se convierten en inadmisibles cuando se trata de la opción de placa de 3 m, o bien para cualquier opción de cimentación superficial colocada en la unidad UG-6.

Por lo tanto, para cuando se realice el diseño final de la cimentación de las estructuras, es conveniente realizar un análisis más exhaustivo de asentamientos, para determinar la conveniencia de utilizar los tipos de cimentación que se propongan.

Ante este comportamiento de los materiales en cuanto a los asentamientos, Castro y de la Torre propone tener presente la opción de cimentar con fundaciones superficiales con capacidades admisibles limitadas, lo cual puede ser contraproducente para algunas estructuras pues la carga que transmitirán podría ser mayor, o bien cimentar con pilotes. Por ello, Castro y de la Torre propone 3 opciones de tamaño: 0.6 m, 0.8 m y 1.0 m. Se recomienda que estos pilotes se empotren 3 m, 4 m o 5 m en las unidades firmes UG-6 y UG-7.

Para el cálculo de asentamientos en pilotes, Castro y de la Torre recomienda que se verifiquen en campo a través de la ejecución de pruebas de carga.

Existen unas recomendaciones específicas para algunas estructuras propuestas en lugares de la Quebrada Los Negritos y el río Torres. Para ellas, se está programando colocar una estructura tipo cajón. Es por lo que Castro y de la Torre presenta varias opciones de tipo de cimentación, cada una de ellas con varios tamaños, para que se pueda escoger la más apropiada. A continuación, se comenta acerca de cada opción.

- **Opción #1: cimentación con placa corrida.** Al igual que lo mostrado anteriormente, para poder optar por este tipo de cimentación, se debe tener claro que las capacidades admisibles se encuentran restringidas, dados los asentamientos que se podrían presentar por el tamaño



de la placa o bien la profundidad de cimentación. Esta podría ser una opción apropiada para obras que requieran transmitir cargas menores.

- *Opción #2: cimentación con placas aisladas cuadradas.* Esta opción podría eventualmente resultar más atractiva pues los asentamientos que se desarrollarían se observan menores que los de la opción #1. Sin embargo, si la estructura a colocar es tipo cajón, se considera más pertinente que la cimentación sea más bien de tipo placa corrida o inclusive una losa de cimentación.
- *Opción #3: cimentación con placas aisladas rectangulares.* Esta opción presenta resultados intermedios entre las dos opciones anteriores. Sin embargo, aun así, se considera que la cimentación sea más bien de tipo placa corrida o inclusive una losa de cimentación.
- *Opción #4: cimentación con pilotes.* Se muestra la misma opción de cimentación de 3 opciones de tamaño: 0.6 m, 0.8 m y 1.0 m, y empotrados 3 m, 4 m o 5 m en las unidades firmes UG-6 y UG-7.

Estas recomendaciones se consideran adecuadas. Sin embargo, para el diseño final se debe tomar en cuenta la opción que sea más conveniente, no solo por capacidades del medio, sino también tomando en cuenta el tipo de estructura que finalmente se elija.

III.1.5.2 Obras de retención

Los parámetros recomendados a utilizar por Castro y de la Torre parecen adecuados, sin embargo, dependiendo del diseño de la obra de retención a diseñar (pantalla de pilotes) puede ser que sean necesarios otros datos. La solicitud de información adicional, si es que se requiere, debe ser realizada por la empresa encargada del diseño final de la propuesta del muro de pantalla de pilotes como obra de retención.

Incluso se debe verificar si la información es suficiente para el diseño de los muros compuestos restantes recomendados en las distintas estaciones del proyecto.

III.1.5.3 Pavimentos existentes

En los resultados de los ensayos granulométricos presentados en el apartado 10.2.1, se observan que los materiales incumplen el porcentaje pasando de la especificación dada por el CR-2010 aunque sea uno de los tamices. No queda clara la recomendación que deba seguirse para corregirla, puesto que la conclusión de Castro y de la Torres es que como cumple con el CBR solicitado en el CR-2010, es suficiente criterio para utilizar estos materiales como base y sub-base.

A pesar de que se cumple con el requisito de capacidad, se considera importante que si algunos de estos materiales se vayan a utilizar como base y sub-base, se les realice algún tipo de corrección por granulometría para alcanzar el cumplimiento de las especificaciones del CR-2010.

III.2 Estudio de suelos para el sitio de la intersección de Guadalupe

III.2.1 Modelo geológico – geotécnico del sitio y parámetros de los materiales

Castro y de la Torre comenta que el modelo geológico – geotécnico presentado en la Figura 4 se determinó utilizando la información de los distintos materiales encontrados en las perforaciones, correlacionándolos con el perfil establecido por el ensayo de refracción sísmica, y los resultados de los ensayos de laboratorio realizados a las muestras obtenidas.

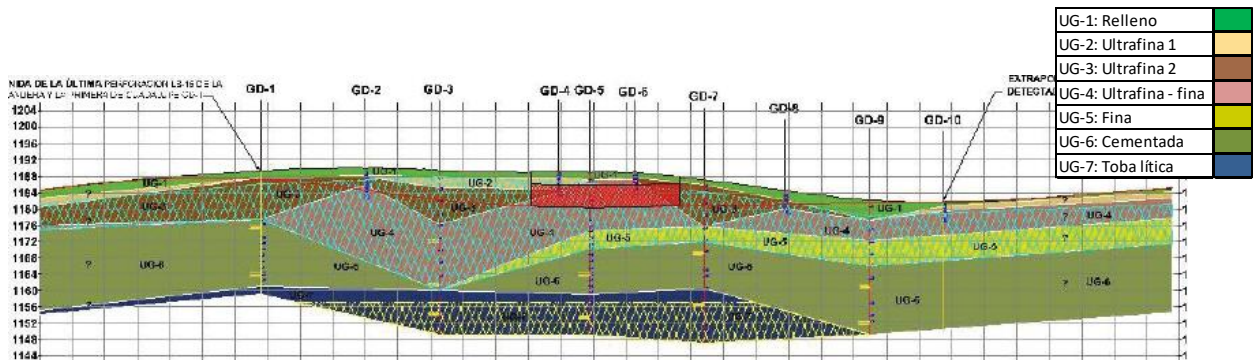


Figura 4. Modelo Geológico – Geotécnico del sitio de la intersección de Guadalupe

Las propiedades de estos materiales son las mostradas en la Tabla 4.

Se verifican las propiedades con los resultados de los ensayos mostrados en el informe. Se observa que los rangos de los valores dados se obtienen utilizando en la mayor parte de los casos los valores máximos y mínimos reportados para cada ensayo, excepto para los valores de resistencia en general para todas las unidades, en mayor grado con el valor de cohesión donde los resultados obtenidos en los ensayos de cote directo y triaxial, no corresponden en ningún caso al reportado como valor final en el informe. Esto también sucede para algunos materiales con el ángulo de fricción.

Se presume que los valores de cohesión y en algunos casos del ángulo de fricción, fueron tomados de las correlaciones realizadas con el ensayo de SPT, posiblemente porque los resultados arrojaban datos más altos a los esperados por el comportamiento de los materiales in situ. Además, posiblemente se correlacionaron con valores del estudio de suelos del sitio de la Rotonda de la Bandera, por ser zonas muy cercanas.

A pesar de lo anterior, se considera que las propiedades asignadas están acordes con los materiales encontrados y son conservadoras respecto a los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio, además de que se cuenta con suficiente información para analizar y correlacionar para determinar estos como los parámetros de resistencia del modelo geológico – geotécnico.

III.2.2 Niveles freáticos

Con respecto a los niveles freáticos, en su informe Castro y de la Torre indica que se encontraron dos niveles: un nivel colgado en las profundidades entre 3 a 15 m, siendo la profundidad típica de 9 m, y un nivel freático regional entre las profundidades de 30 a 35 m, siendo el valor promedio encontrado típicamente de 32 m.



Es importante hacer notar que Castro y de la Torre indica que es aconsejable tomar las previsiones para realizar la evacuación de las aguas producto de la existencia de estos niveles freáticos, al momento de realizar la perforación para evitar los caídos en las paredes.

Se debe tomar en cuenta que el agua del nivel freático “colgado” entre las capas del lahar ultrafino y fino, puede afectar al concreto colocado en las perforaciones ya que, si el agua aportada por este nivel freático no es desplazada completamente por la masa de concreto colocado, es posible que forme parte de la mezcla del concreto si es que éste se consolida. Esto puede dar como resultado un concreto con menor resistencia, por la presencia de un exceso de agua, mayor a la del diseño de mezcla.

III.2.3 Evaluación del potencial de licuación de suelos por sismo

En el apartado 5.2.10.1 del informe, Castro y de la Torre indica que para este tipo de suelo no existirá potencial de licuación porque el material encontrado no cumple con los siguientes 4 criterios:

- Arenas finas con granulometría específica (menos de un 20% de finos)
- Que las arenas estén sumergidas bajo el nivel freático
- Que el N_{spt} sea inferior a 25 golpes/pie (82 golpes/m)
- Que el espesor de la capa sea superior a 1,0 metro

Sin embargo, es conocido que materiales de grano fino, con ciertas características particulares puede presentar licuación. Entonces, para analizar si el estudio simplificado realizado por Castro y de la Torre es suficiente, es necesario verificar si los 4 criterios se cumplen.

En la Tabla 3, se puede verificar el porcentaje de finos para cada material, indistintamente si se clasifica o no como arena. Como se observa, todos los materiales presentan un porcentaje de finos mayor al 20%, por lo que no se cumple la primer premisa.

En el apartado III.2.2, se indicó que Castro y de la Torre, detectó dos niveles freáticos en el sitio del proyecto, uno entre los 3 a 15 metros y otro entre los 30 a 35 m. Revisando las profundidades a las que se encontraron los distintos materiales de cada capa, se observa de una u otra forma todos ellos se verían influenciados por el nivel freático, por tanto si se podrían encontrar bajo condiciones saturadas.

Para el análisis de las últimas dos premisas, se cuenta con la información de la Tabla 9, en la cual se observan el número de golpes y el espesor promedio de las distintas capas de los materiales que forman parte del modelo geológico – geotécnico.

Tabla 11. Estratigrafía del sitio de la intersección de las Garantías Sociales

Material	Número golpes N_{spt}	Espesor promedio (m)
UG-1	-	1.8
UG-2	4-5 (4)	3.2
UG-3	11-14 (12)	3
UG-4	21	6
UG-5	> 30	5
UG-6	Rebote	18
UG-7	Rebote	-



En todos los casos, las últimas dos premisas se cumplen. Esto no es indicado en el informe de Castro y de la Torre, porque como se mencionó anteriormente, se concentran en estos análisis para materiales tipo arena únicamente y no toman en cuenta los suelos de grano fino.

A continuación, se muestra el análisis adicional que se realiza para determinar si algún material presente en el sitio pueda ser susceptible a licuación, utilizando la metodología de la carta de plasticidad modificada por Idriss et al.

III.2.3.1 Análisis adicional de licuación en los suelos del Proyecto

Se utilizará la misma metodología mencionada en el III.1.3.1. Analizando los valores de límite líquido e índice de plasticidad promedio, obtenidos por Castro y de la Torre a través de sus ensayos de laboratorio, en la carta de plasticidad modificada, se obtiene lo mostrado en la Figura 5.

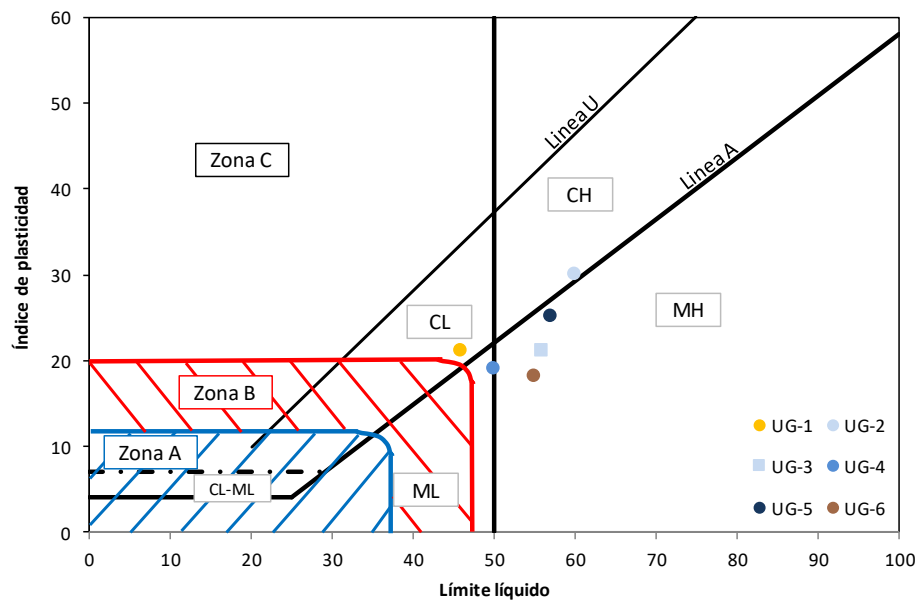


Figura 5. Carta de plasticidad modificada: sitio del proyecto de intersección de Garantías Sociales

Afortunadamente, ninguno de los materiales se encuentra en las zonas de potencialidad de licuación. Por lo tanto, no existe potencial de licuación de la capa de Rellenos antrópicos, y entonces es posible tomarla en cuenta para posibles cálculos de aporte de resistencia a la fricción de pilotes.

III.2.4 Geotecnia de las obras de tierra

La empresa Castro y de la Torre realiza una serie de recomendaciones al respecto de las excavaciones y de las cimentaciones de las obras. A continuación, se comenta al respecto. temporales.

III.2.4.1 Cortes

Las recomendaciones dadas para los cortes en los materiales que se deban realizar en el proyecto son las que se resumen en la Tabla 12.



Tabla 12. Recomendaciones dadas para los cortes del proyecto

Material	Pendiente del corte
UG-1	3H:1V
UG-2, UG-3	2H:1V
UG-4, UG-5, UG-6, UG-7	3H:2V

Castro y de la Torre es enfático en que se debe realizar el manejo de aguas apropiado para poder garantizar la estabilidad de estos materiales.

Estas recomendaciones no van acompañadas de análisis de estabilidad en el informe por lo que se consideran recomendaciones generales y conservador realizadas por Castro y de la Torre para contar con una premisa inicial. Sin embargo, esto no se considera problemático en vista que la contención de los suelos se realizará por medio de un muro de pantalla de pilotes.

III.2.4.2 Compactabilidad y uso en rellenos de los suelos detectados

Las recomendaciones dadas por Castro y de la Torre para realizar rellenos se consideran adecuadas.

III.2.5 Geotecnia de las estructuras

A continuación, se comenta acerca de la revisión de los resultados mostrados en el informe acerca de la capacidad de soporte del medio, así como los asentamientos asociados, acerca de los parámetros a utilizar para el diseño de muros de contención y del análisis realizado a los pavimentos existentes.

Cabe señalar que Castro y de la Torre, solamente realiza cálculos de la capacidad de los pilotes, siendo estos utilizados como cimentación, y no pareciera que realizara el diseño de la pantalla de pilotes, como una estructura de contención.

Este diseño se presume, lo realiza la empresa contratada para realizar la construcción de este, sin embargo, no se cuenta con esta información como para corroborar esta suposición.

III.2.5.1 Capacidad de soporte y asentamientos

Se observan los resultados de los análisis de capacidad de soporte y de asentamientos para diferentes anchos de placa, para cada unidad de material encontrado en el sitio. La capacidad de soporte es adecuada para cada opción y para los materiales, sin embargo, los asentamientos se convierten en inadmisibles cuando se trata de la opción de placa de 3 m solo para los materiales de las unidades UG-3 y UG-4.

Por lo tanto, para cuando se realice el diseño final de la cimentación de las estructuras, es conveniente realizar un análisis más exhaustivo de asentamientos, para determinar la conveniencia de utilizar los tipos de cimentación que se propongan.

Ante el comportamiento de estos materiales en cuanto a los asentamientos, Castro y de la Torre propone cimentar con pilotes brindando 3 opciones de tamaño: 0.6 m, 0.8 m y 1.0 m. La profundidad de empotramiento no está dada, sin embargo, Castro y de la Torre indica que debe realizarse a profundidades apropiadas para las unidades UG-3 a UG-6, o UG-7, según sea el caso del pilote y el



sitio donde se colocará. Si se optara por esta opción, se debe tener cuidado al momento de diseñar para determinar la profundidad de empotramiento adecuada.

Para el cálculo de asentamientos en pilotes, Castro y de la Torre recomienda que se verifiquen en campo a través de la ejecución de pruebas de carga.

Existen unas recomendaciones específicas para la estructura propuestas en la Quebrada Cangrejos. Estas son similares a las mostradas en el apartado III.1.5.1, por lo que se tienen los mismos comentarios dados en dicho apartado.

Cabe destacar, que al igual que para el sitio de la Rotonda de la Bandera, estas recomendaciones se consideran adecuadas. Sin embargo, para el diseño final se debe tomar en cuenta la opción que sea más conveniente, no solo por capacidades del medio, sino también tomando en cuenta el tipo de estructura que finalmente se elija.

III.2.5.2 Obras de retención

Los parámetros recomendados a utilizar por Castro y de la Torre parecen adecuados, sin embargo, dependiendo del diseño de la obra de retención a diseñar (pantalla de pilotes) puede ser que sean necesarios otros datos. La solicitud de información adicional, si es que se requiere, debe ser realizada por la empresa encargada del diseño final de la propuesta del muro de pantalla de pilotes como obra de retención.

Incluso se debe verificar si la información es suficiente para el diseño de los muros compuestos restantes recomendados en las distintas estaciones del proyecto.

III.2.5.3 Pavimentos existentes

En los resultados de los ensayos granulométricos presentados en el apartado 10.2.1, se observan que los materiales incumplen el porcentaje pasando de la especificación dada por el CR-2010 aunque sea uno de los tamices. No queda clara la recomendación que deba seguirse para corregirla, puesto que la conclusión de Castro y de la Torres es que como cumple con el CBR solicitado en el CR-2010, es suficiente criterio para utilizar estos materiales como base y sub-base.

A pesar de que se cumple con el requisito de capacidad, se considera importante que si algunos de estos materiales se vayan a utilizar como base y sub-base, se les realice algún tipo de corrección por granulometría para alcanzar el cumplimiento de las especificaciones del CR-2010.

IV. Comentarios finales

Se observa que el estudio de suelos fue adecuado y que cuenta con la información suficiente para establecer el modelo geológico – geotécnico. Los parámetros de resistencia de los materiales, a pesar de que no corresponden en su totalidad a los resultados de los ensayos realizados, se consideran adecuados dado que se encuentran del lado de la seguridad al ser elegidos conservadoramente. No obstante, como Castro y de la Torre no plantea el diseño de la pantalla de pilotes como muro de contención, se desconoce si el responsable de este diseño requerirá de algún parámetro adicional, por lo que la ampliación eventual de este estudio quedaría sujeta a estas necesidades.

Cuando se realice el diseño final de las obras que formarán parte de ambas intersecciones, es importante verificar nuevamente las capacidades de soporte del medio y sobre todo los



asentamientos, pues para algunos resultados mostrados por Castro y de la Torre, estos se convertían en inadmisibles respecto a lo recomendado por el Código de Cimentaciones de Costa Rica. Es por ello, que se considera una práctica sana calcular los asentamientos con las cargas que transmitirán las estructuras que finalmente se coloquen en los sitios.

Por último, es recomendable que cuando se vaya a realizar el diseño de la base y sub-base del proyecto, se verifiquen nuevamente las propiedades de los materiales para determinar si es posible llegar al adecuado cumplimiento de las granulometrías solicitadas por el CR-2010.

V. Referencias

- Euroestudios. (2015). *Proyecto de las intersecciones de la Bandera y Guadalupe. San José (Costa Rica). Proyecto de diseño de detalle: Memoria y Anexo 2 Geología y Geotecnia.* San José.