



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

## Programa de Ingeniería Geotécnica

Informe: LM-IG-05-21

### Revisión de aspectos geotécnicos del Informe Final: Diseño estructural sobre el Rio Torres en la ruta N°39 de Circunvalación

INFORME FINAL

Preparado por:  
Ing. Gustavo A. Badilla Vargas, D.Sc.  
Programa de Ingeniería Geotécnica



San José, Costa Rica  
Febrero, 2021





## CONTENIDO

I.	Introducción .....	4
II.	Revisión de la sección 4 “Alcances y limitaciones” .....	4
III.	Revisión de la sección 5 “Descripción de la estructura diseñada” .....	4
IV.	Revisión de la sección 11 “Resultados del diseño estructural de los pilotes” .....	5
V.	Revisión de la sección 19 “Anexo 7: Memoria de cálculo de diseño de los pilotes” .....	6
V.1	4. Capacidad geotécnica de pilotes .....	6
V.2	5. Demanda en pilotes .....	8
VI.	Verificación de cálculos de la capacidad geotécnica de los pilotes en los márgenes del puente sobre el Rio Torres .....	10
VII.	Comentarios finales .....	12
VIII.	Referencias .....	13



## REVISIÓN DE ASPECTOS GEOTÉCNICOS DEL INFORME FINAL: DISEÑO ESTRUCTURAL SOBRE EL RÍO TORRES EN LA RUTA N°39 DE CIRCUNVALACIÓN

### I. Introducción

Por solicitud de la Unidad de Auditoría Técnica, el presente informe muestra el resultado de la revisión de aspectos geotécnicos del Informe Final: Diseño estructural sobre el Río Torres en la ruta N°39 de Circunvalación elaborado por los ingenieros Julián Trejos Villalobos (M. Sc. y M. Eng.) y Fabricio Chavarría Salas (M. Eng.).

En la sección 11 se presentan los resultados del diseño estructural de los pilotes, en la cual se sugiere la construcción de pilotes de 20 m de longitud, de los cuales 13,5 m de la longitud total de los pilotes estarán apoyados en la capa de material identificado como UG-6. En esta misma sección se encuentra la revisión estructural de los pilotes. La memoria de cálculo de la capacidad geotécnica de los pilotes para ambos márgenes del Río Torres se encuentran en el Anexo 7: “Memorias de cálculo de diseño de pilotes” donde se emplea el modelo geológico – geotécnico del sitio, resultante de los estudios de suelos realizados por la empresa Castro y de la Torre.

### II. Revisión de la sección 4 “Alcances y limitaciones”

En este apartado, Trejos y Chavarría (2020) establecen que, entre los alcances del informe se encuentra el diseño estructural de los elementos con conforma la estructura del puente propuesto sobre el Río Torres, incluyendo los pilotes que forman parte de la subestructura del puente.

Aunque en las limitaciones se comenta que no se realiza una revisión de la estabilidad de taludes aledaños a la estructura del puente, ni tampoco se realiza una revisión de la protección a la socavación del perfil del terreno frente a las pantallas de pilotes, ni obras de protección del cauce, se considera altamente recomendable que este tipo de elementos sea revisado, verificado y diseñados por la empresa encargada del diseño final, dado que estos elementos también constituyen parte integral del diseño del soporte geotécnico de la superestructura del puente y que debido a su localización, constituye una de las principales arterias de flujo de tránsito en el corto, mediano y largo plazo, por lo que es necesario garantizar el cumplimiento del desempeño esperado de la obra.

### III. Revisión de la sección 5 “Descripción de la estructura diseñada”

En este apartado, Trejos y Chavarría (2020) presentan una descripción general de la nueva estructura propuesta del puente sobre el Río Torres, en la cual se indica que la subestructura estaría compuesta por una viga cabezal y pilotes de concreto de 80 cm de diámetro, con separación en la dirección transversal de 1,3 m centro a centro de cada pilote. Entre dichos pilotes se considera la construcción de pilotes de mortero secantes, con el fin de proteger el terreno trasdós de los pilotes, en caso de que la protección al cauce falle y el talud del terreno frente a los pilotes sea socavado.

En este sentido, la sugerencia de la construcción de pilotes de mortero secantes entre los pilotes, se puede considerar como la construcción de un muro de pantalla de pilotes. Sin embargo, cabe señalar que el informe analizado, solamente realiza cálculos de la capacidad de los pilotes, siendo estos utilizados como cimentación, y no presenta un diseño de la pantalla de pilotes, como una estructura de retención. De esta forma, se recomienda necesario evaluar si la información disponible de los estudios realizados y presentados por Castro y de la Torre son suficientes o si será necesaria la inclusión de otros datos, informaciones y mayores análisis de la propuesta de la pantalla de pilotes como obra de retención.



En el caso de la pantalla de pilotes, se debe tener en consideración el comportamiento de los materiales presentes en el sitio, que de acuerdo al modelo geológico-geotécnico que se discutirá más adelante, puede ser necesario establecer recomendaciones de metodologías de perforación apropiados para los diferentes tipos de perfiles de suelos, por parte de un ingeniero geotecnista. Adicionalmente, al tratarse de un cauce de un río, es necesario tomar las previsiones correspondientes para realizar la evacuación de las aguas subterráneas producto de la presencia de niveles freáticos o incluso producto de las precipitaciones, que pueden generar presiones laterales elevadas que pueden ser transmitidas a la subestructura del puente.

#### IV. Revisión de la sección 11 “Resultados del diseño estructural de los pilotes”

En este apartado, Trejos y Chavarría (2020) presentan el modelo geológico-geotécnico a lo largo de la ruta de circunvalación, desde la Universidad de Costa Rica hasta la intersección de Guadalupe. Según los autores, este modelo corresponde a la combinación de los modelos geológicos-geotécnico obtenidos en los informes “Estudio Geotécnico para el diseño del paso a desnivel en la intersección de la Bandera UCR” INF #15-0017 y el Informe para la intersección de Guadalupe, ambos informes elaborados por Castro y de la Torre.

Como se indica en este mismo apartado, la perforación LB-15 se realizó en la margen derecha del cauce del Río Torres, por lo que la información de esta perforación fue utilizada para el diseño de la subestructura del puente.

En este punto, cabe mencionar que los resultados y modelos utilizados para realizar el diseño estructural de los pilotes, ya fueron discutidos anteriormente en el 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”. Como se mencionó en este informe, las propiedades asignadas son acordes con los materiales encontrados y cuyos valores son conservadores con respecto a los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio.

La Figura 1 muestra el modelo geológico-geotécnico utilizado; por su parte las Tablas 1 y 2 presentan la estratigrafía y las propiedades de los materiales, respectivamente, de los materiales encontrados in situ.

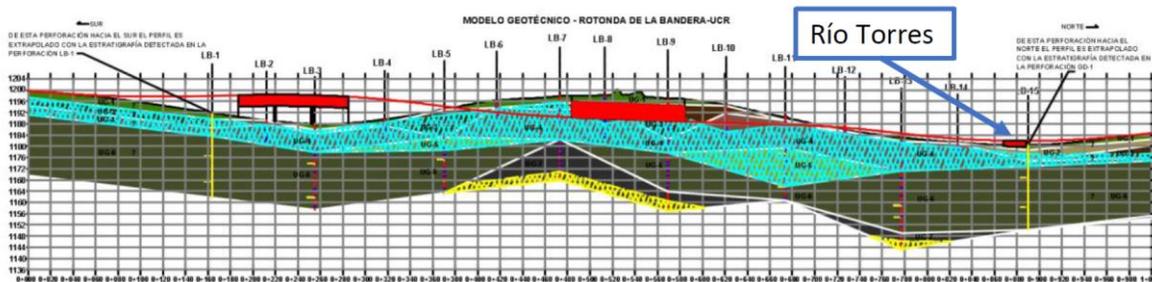


Figura 1. Modelo geotécnico de la ruta N°39 de Circunvalación desde la Universidad de Costa Rica hasta la intersección de Guadalupe. (Fuente: Trejos y Chavarría, 2020)



Tabla 1. Estratigrafía del sitio de la intersección en la Rotonda de la Bandera para las diferentes unidades litoestratigráficas, UG, definidas (Fuente: LM-PIG-06-19)

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. Caracterización geomecánica de los materiales encontrados en el sitio de la intersección de la Rotonda de la Bandera (Fuente: LM-PIG-06-19)

Unidad	SUCS	Propiedades							
		Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Humedad (%)	Finos (%)	LL	IP	Cohesión (kPa)	$\phi$ (°)	Balastro (T/m <sup>3</sup> )
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

## V. Revisión de la sección 19 “Anexo 7: Memoria de cálculo de diseño de los pilotes”.

### V.1 4. Capacidad geotécnica de pilotes.

En esta sección, Trejos y Chavarría (2020) presentan la memoria de cálculo para el cálculo de la capacidad geotécnica de pilotes para el apoyo de la superestructura. Los cálculos son realizados suponiendo la construcción de pilotes preexcavados de 80 cm de diámetro.

Para los cálculos correspondientes son empleados el modelo geotécnico mostrado en la Figura 1 y los parámetros mecánicos presentados en las Tablas 1 y 2 anteriores, informaciones que fueron obtenidas principalmente del informe Estudio Geotécnico para el diseño del paso a desnivel en la intersección de la Bandera UCR” INF #15-0017 elaborado por Castro y de la Torre.



A partir de estos parámetros Trejos y Chavarría, establecen el modelo geotécnico del puente sobre el Río Torres que se muestra en la Figura 2.

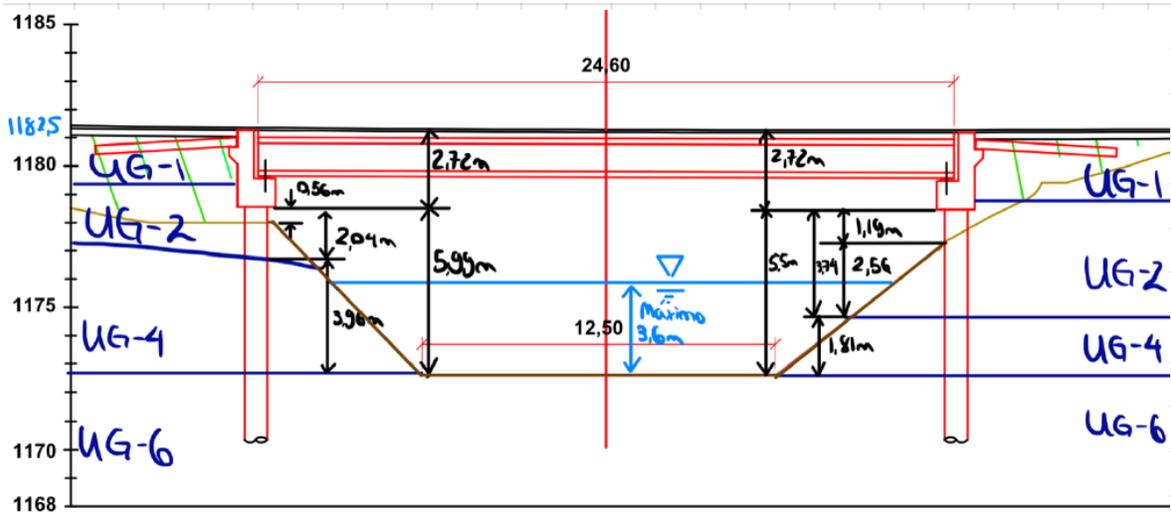


Figura 2. Modelo geotécnico del puente sobre el Río Torres en la ruta N° 39. (Fuente: Trejos y Chavarría, 2020)

Además de los parámetros mecánicos mostrados anteriormente en las Tablas 1 y 2, son utilizados los parámetros que se muestran en la Tabla 3 para las unidades litoestratigráficas, UG definidas.

Tabla 3. Otros parámetros utilizados para el cálculo de la capacidad geotécnica de los pilotes del puente sobre el Río Torres en la ruta N°39. (Fuente: Trejos y Chavarría, 2020)

Unidad	SUCS	Densidad seca (t/m <sup>3</sup> )	Su (kg/cm <sup>2</sup> )
UG-1	MH-SM	-	-
UG-2	MH, MH-SM	1,21	0,54
UG-3	MH, MH-SM	1,19	0,70
UG-4	MH, MH-SM	1,10	1,13
UG-5	MH, MH-SM	1,20	1,75
UG-6	MH, MH-SM	1,20	1,84
UG-7	-	1,39	0,99

Específicamente, para el cálculo de la capacidad geotécnica de los pilotes colados in situ, se emplea la metodología sugerida por el apartado 10.8.3.5.1b del manual de la AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2017 (AASHTO LRFD 2017), la cual utiliza el parámetro de resistencia al corte no drenado, Su (*undrained shear strength*) del suelo para estimar la capacidad de los pilotes.

Sin embargo, en la memoria de cálculo no está claro si los valores mostrados en la Tabla 3 para el parámetro Su, son valores obtenidos a partir de los resultados de ensayos de laboratorio presentados



en los informes “*Estudio Geotécnico para el diseño del paso a desnivel en la intersección de la Bandera UCR*” INF #15-0017 y el *Informe para la intersección de Guadalupe*, elaborados por Castro y de la Torre; o bien, si se tratan de valores estimados por los autores del “*Informe Final: Diseño estructural sobre el Rio Torres en la ruta N°39 de Circunvalación*”, a partir de alguna correlación con otros resultados.

Así pues, debido a la importancia que tiene este parámetro para los cálculos sucesivos presentados en la Memoria de Cálculo es necesario que sea aclarado el origen de los valores.

Conforme a la revisión realizada a la memoria de cálculo, el análisis se realiza tanto para la margen derecha como para margen izquierda del puente. En ambos casos se considera que la capacidad geotécnica del pilote corresponde a la sumatoria de la capacidad por fricción y la capacidad de punta del pilote. Dicho abordaje se considera adecuado y conforme con la metodología propuesta por el AASHTO LRFD 2017.

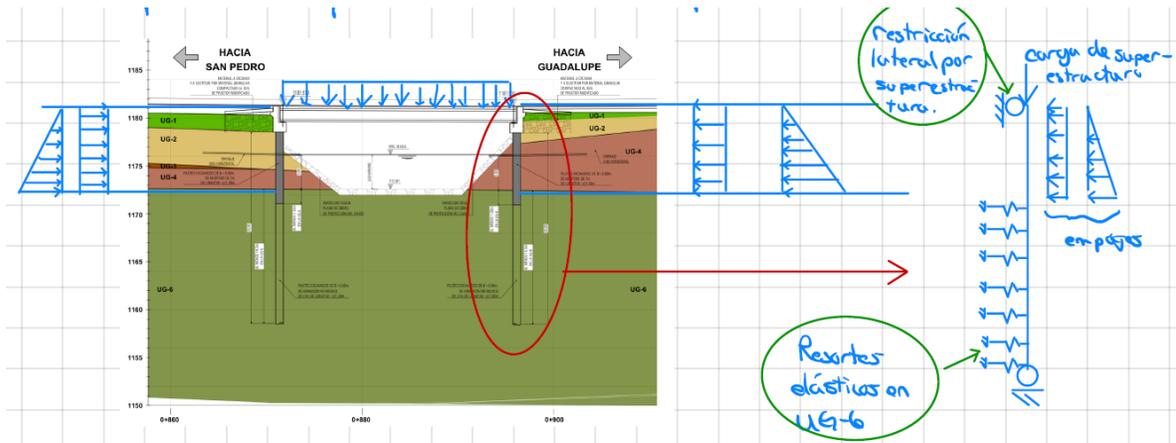
Por otro lado, según lo expresado en la sección 11 del informe, el cálculo de la capacidad geotécnica de ambas márgenes desprecia el aporte de la capacidad por fricción de los materiales que se encuentren por encima de la unidad UG-6 que se observa en la Figura 2, lo cual corresponde a la suposición de la posibilidad de que el talud frente a la pantalla de pilotes se lave debido a una falla en la obra de protección, lo cual pretende dar resultados que se encuentran del lado de la seguridad sobre la capacidad geotécnica de los pilotes propuestos. Estas suposiciones de los autores del informe se consideran suficientemente conservadoras y adecuadas para los análisis realizados.

## V.2 5. Demanda en pilotes.

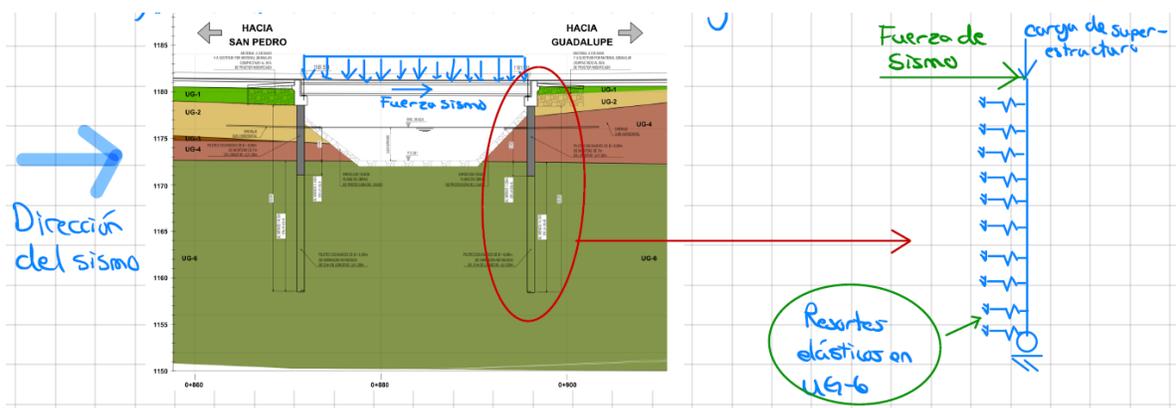
Conforme a la revisión realizada a la memoria de cálculo, la demanda de carga de los pilotes, considera únicamente el análisis de la margen izquierda del puente (ver Figura 2) considerando dos modelos de análisis: a) modelo utilizado para evaluar la condición estática (cargas sin sismo) y, b) modelo para evaluar la condición de sacudida sísmica. Ambos modelos se muestran en la Figura 3.

Como se indica en la memoria de cálculo, en el caso del Modelo 2, a causa de que la carga sísmica es transmitida a la pantalla de pilotes como una presión pasiva opuesta al sentido de procedencia del sismo, se considera la aplicación de resortes elásticos en toda la longitud del pilote.

De acuerdo a los análisis realizados, y partiendo de la suposición de que no exista el talud frente a la pantalla de pilotes, los autores proponen que la longitud total de los pilotes sea de 20 m, de forma tal que los pilotes tengan una excavación en la capa UG-6 de 13,5 m de profundidad con lo cual se obtiene una demanda axial de 169,9 ton, a cuyo valor se le aplica un factor de 1,05 para una condición de carga requerida de 177,5 ton.



a) Modelo 1, condición estática (cargas sin sismo)



b) Modelo 2, condición dinámica (sacudida sísmica)

Figura 3. Modelo de análisis de demanda en cargas en los pilotes del puente sobre el Rio Torres en la ruta N° 39. (Fuente: Trejos y Chavarría, 2020)

Estos análisis se consideran apropiados para determinar las demandas de carga de los pilotes para la subestructura del puente propuesto sobre el Rio Torres. Sin embargo, se sugiere ampliar o aclarar si sería conveniente, o no, desde el punto de vista geotécnico, realizar un análisis adicional sobre un eventual Modelo 3, en el cual se considere la condición dinámica (sacudida sísmica), únicamente como una presión pasiva en la pantalla de pilotes, aplicada únicamente como resortes elásticos en la profundidad de los 13,5 m en la capa UG-6 a fin de representar la respuesta y la demanda en los pilotes de la margen izquierda de la Figura 3b, lo cual podría considerarse una condición más crítica desde el punto de vista geotécnico, puesto que no existiría un apoyo en la parte superior de los pilotes.

Finalmente, según los autores, la capacidad geotécnica obtenida para los pilotes preexcavados en la capa UG-6 de 13,5 m de profundidad, despreciando el aporte del esfuerzo efectivo de las capas superiores a la capa UG-6 fue establecida en 180 ton, valor superior a la condición de carga requerida de 177,5 ton.



## VI. Verificación de cálculos de la capacidad geotécnica de los pilotes en los márgenes del puente sobre el Río Torres.

Para fines del presente informe, inicialmente se realizó un análisis de la memoria de cálculo presentada por Trejos y Chavarría (2020). Inicialmente, fueron revisados los procedimientos y metodologías de cálculo de la capacidad geotécnica de los pilotes, como se discutió en el apartado V.1. A continuación, en el apartado V.2, se hizo una revisión de la memoria de cálculo para cálculo de la demanda de carga de los pilotes. Una vez revisados los procedimientos de cálculo utilizados para estimar la capacidad geotécnica y la demanda de carga de los pilotes, se procede, a continuación, presentar una verificación y cumplimiento de las premisas de diseño de los pilotes

Como se mencionó anteriormente, la memoria de cálculo contempló un análisis tanto para la margen derecha como para margen izquierda del puente. En ambos casos se utilizó la metodología propuesta por el AASHTO LRFD 2017, en la cual la capacidad geotécnica del pilote corresponde a la sumatoria de la capacidad por fricción y la capacidad de punta del pilote.

En este sentido, fueron revisados y comparados los resultados obtenidos tanto para la margen derecha como izquierda del puente. A partir de una revisión más detallada, se sugiere hacer una revisión cuidadosa de los resultados de la Hoja 2 de la tabla de **“Capacidad de fricción en UG-6 en la margen derecha”** y la Hoja 4 de la tabla de **“Capacidad de fricción en UG-6 en la margen izquierda”**. Específicamente, según las suposiciones de Trejos y Chavarría, el principal aporte de la capacidad por fricción de los pilotes se obtiene en la capa del material definido como UG-6, así pues, partiendo de esta premisa y de las características del modelo geotécnico adoptado para el diseño, la capacidad de carga de los pilotes, en ambas márgenes, básicamente depende únicamente de la respuesta de la capa de material UG-6 y por lo tanto sería de esperarse resultados muy similares.

Ahora bien, la Figura 4, muestra un extracto del cálculo realizado por los autores para la capacidad de carga para los micropilotes de la margen derecha, por su parte la Figura 5 muestra un extracto de los cálculos realizados de la capacidad de carga de la margen izquierda, en ambas figuras, las capacidades de carga corresponden a profundidades entre 10-18 m.

Contenido: Capacidad a fricción en UG-6 en la margen derecha										FECHA:	
										HOJA:	2
Considerando aporte superior					Despreciando aporte superior						
Superior		UG-6		UG-6		Superior		UG-6		UG-6	
$Z_{UG6}$ (ft)	$\phi_{qs}R_s$ (ton)	$\phi_{qs}R_s$ (ton)	$\phi_{qp}R_p$ (ton)	$\phi R_u$ (ton)	$\phi_{qs}R_s$ (ton)	$\phi_{qs}R_s$ (ton)	$\phi_{qp}R_p$ (ton)	$\phi R_u$ (ton)			
10	27.8	108.7	33.3	169.8	0.0	108.7	33.3	142.0			
11	27.8	114.1	33.3	175.2	0.0	114.1	33.3	147.4			
12	27.8	119.5	33.3	180.7	0.0	119.5	33.3	152.8	←		
13	27.8	125.0	33.3	186.1	0.0	125.0	33.3	158.3			
14	27.8	130.4	33.3	191.5	0.0	130.4	33.3	163.7			
15	27.8	135.8	33.3	197.0	0.0	135.8	33.3	169.1			
16	27.8	141.3	33.3	202.4	0.0	141.3	33.3	174.6			
17	27.8	146.7	33.3	207.8	0.0	146.7	33.3	180.0			
18	27.8	152.1	33.3	213.3	0.0	152.1	33.3	185.4			

Figura 4. Extracto de la tabla del cálculo de capacidad de carga de la margen derecha. (Fuente: Trejos y Chavarría, 2020)





Ahora bien, si se considera que existe algún tipo de omisión involuntaria o descuido en los cálculos mostrados en la Figura 5, a partir de la profundidad,  $z(m)$ , igual a 13 m. Es necesario revisar, las recomendaciones de los autores de los pilotes con una profundidad de 13,5 m en la capa de material UG-6, puesto que la capacidad geotécnica para los pilotes preexcavados solicitada de 177,5 ton solamente podría ser obtenida a profundidades mayores de las recomendaciones iniciales dadas por los autores.

Finalmente, sumado a estas inconsistencias, se sugiere también hacer una revisión de si la variación en la longitud de los pilotes podría modificar los modelos para determinar la demanda de los pilotes y revisar una vez más los cálculos de los refuerzos en los pilotes.

## VII. 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.

En el caso de que realmente se considere la sugerencia de la construcción de pilotes secantes (pantalla de pilotes), se considera que se debe evaluar la necesidad de realizar el diseño correspondiente con la asesoría correspondiente de un ingeniero geotecnista, con la finalidad de evaluar si se requiere de información geotécnica adicional para el diseño.

Se solicita a los autores de la memoria de cálculo aclarar cómo fueron determinados, estimados o calculados los valores del parámetro de resistencia al corte no drenado,  $S_u$ , (“*undrained shear strength*”) utilizados para el cálculo de la capacidad geotécnica de los pilotes.

Aunque se considera adecuado el uso de la metodología propuesta por la AASHTO LRFD 2017, para el cálculo de la capacidad geotécnica de los pilotes, así como también, la suposición de los autores de desprestigiar el aporte de la capacidad por fricción de los materiales que se encuentren por encima de la unidad UG-6, se solicita vehementemente realizar una revisión detallada de los cálculos presentados en la memoria de cálculo, relacionados con la capacidad de fricción en UG-6 para la margen derecha y la margen izquierda para establecer si existen inconsistencias en los resultados, tal y como se plantean en la sección VI del presente informe.

De existir inconsistencias, se sugiere hacer una revisión de la propuesta de los autores de construir pilotes preexcavados con una longitud total de los pilotes de 20 m (los cuales tendrán una excavación en la capa UG-6 de 13,5 m de profundidad) para determinar si podrían requerirse profundidades mayores para obtener una capacidad geotécnica de los pilotes acordes con la demanda de las cargas impuestas por la superestructura. Así como también, es necesario verificar los diseños estructurales de los refuerzos correspondientes para los pilotes.

En consideración al comportamiento de los materiales presentes en sitio que, de acuerdo al modelo geológico-geotécnico, puede ser necesario establecer recomendaciones de metodologías de perforación apropiados para los diferentes tipos de perfiles de suelos, por parte de un ingeniero geotecnista. Adicionalmente, al tratarse de un cauce de un río, es necesario tomar las previsiones correspondientes para realizar la evacuación de las aguas subterráneas producto de la presencia de niveles freáticos o incluso producto de las precipitaciones, que pueden generar presiones laterales elevadas que pueden ser transmitidas a la subestructura del puente.



No obstante, como Castro y de la Torre no plantea el diseño de la pantalla de pilotes como muro de retención, 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.

Finalmente, se considera una práctica sana calcular los asentamientos con las cargas que se transmitirán a los materiales de apoyo de la subestructura.

## VIII. Referencias

- Programa de Ingeniería Geotécnica – LanammeUCR. “LM-PIG-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*” San José, 2019.
- Trejos, J.; Chavarría, F. “*Informe Final: Diseño estructural sobre el Rio Torres en la ruta N°39 de Circunvalación*”. San José. Junio, 2020