

Estudio de las deformaciones horizontales de los suelos compresibles de la bahía de Asunción mediante métodos analíticos y numéricos

Juan Nicolás Zabrodiec

Profesor Asistente, Universidad Católica de Asunción, Asunción, Paraguay, nicozabro@gmail.com

Ruben Alejandro Quiñonez

Investigador, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay, rquiñonez@ing.una.py

Fulgencio Antonio Aquino

Profesor Titular, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay, aaquino@ing.una.py

Rubén Alcides López

Profesor Titular, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay, rlopez@ing.una.py

Miguel Stanichevsky

Profesor Titular, Universidad Católica de Asunción, Asunción, Paraguay, geostan@pla.net.py

RESUMEN: La zona donde se ubica la Avda. Costanera en la Bahía de la ciudad de Asunción se caracteriza desde un punto de vista geotécnico por la presencia de depósitos heterogéneos de suelos susceptibles a grandes deformaciones y de muy baja capacidad resistente. La instrumentación instalada en obra ha ayudado a desarrollar satisfactoriamente la obra y ha permitido conocer el comportamiento de los suelos en detalle. Este trabajo contempla el estudio de los datos de instrumentación adquiridos durante un periodo de más de dos años en el que se ejecutó el tramo de la Costanera Norte de la ciudad de Asunción. La investigación se enfoca en el estudio de las deformaciones horizontales, incluyendo comparativas entre estimaciones obtenidas utilizando teorías empíricas como las de Ladd (1991) y Xu & Chai (2014). Todos los resultados obtenidos por métodos empírico-analíticos fueron comparados con los registros de instrumentación de obra y también con los modelos logrados mediante la simulación numérica realizada.

PALABRAS CHAVE: Consolidación, Deformaciones Verticales, Deformaciones Horizontales, Métodos Numéricos.

ABSTRACT: The Costanera Avenue, located in the Bay of the city of Asunción, is known from a geotechnical point of view because of the presence of heterogeneous soil deposits subject to large deformations and very low bearing capacity. The field instrumentation installed during the construction stage helped to finish the project successfully and gave detailed information about the behavior of the soils of the area. This research includes the study of field instrumentation data from a period of over two years during the construction of the Costanera Norte Avenue of Asunción. The work is focused on the study of horizontal deformations, including estimations obtained using empirical theories such as Ladd (1991) and Xu & Chai (2014). All the results calculated by empirical-analytical methods were compared with the instrumentation data and also with the output of numerical simulation models performed.

KEYWORDS: Consolidation, Vertical Deformation, Horizontal Deformation, Numerical Methods.

1 Introdução

El proyecto de la Costanera de la ciudad de Asunción ha sido objeto de estudio por varias décadas, y sin lugar a dudas ha representado un desafío para la ingeniería paraguaya desde muchos puntos de vista. Desde un punto de vista geotécnico, la Costanera se ubica en una zona caracterizada por depósitos heterogéneos de suelos susceptibles a grandes deformaciones y de muy baja capacidad resistente. Esta condición ha obligado a desplegar instrumentación en la zona de obra a fin de realizar un seguimiento del comportamiento de los suelos durante y después de la construcción.

La cantidad de información que ha proporcionado la instrumentación ha ayudado a desarrollar satisfactoriamente la obra y ha permitido a los ingenieros e investigadores locales tener un mejor conocimiento del comportamiento de este tipo de suelos. Sin embargo, todavía quedan muchos aspectos por estudiar en detalle. Entre estos aspectos se encuentra el estudio de las relaciones entre las deformaciones verticales y horizontales de los suelos compresibles que subyacen a los terraplenes ejecutados.

Este trabajo contempla el estudio del caso de la Avda. Costanera de la ciudad de Asunción, donde se analizaron datos de instrumentación adquiridos durante un periodo de más de dos años en el que se ejecutó el primer tramo de la obra. El trabajo también incluye una comparativa entre las predicciones alcanzadas utilizando teorías analíticas, resultados obtenidos mediante la utilización de herramientas numéricas y las lecturas observadas en las mediciones de instrumentación de obra.

2 Teorías acerca de deformaciones horizontales

Los teorías de la mecánica de suelos clásica, consideran que los suelos se comprimen sólo en la dirección vertical, sin considerar las deformaciones laterales u horizontales. Si bien esta aproximación puede resultar válida para muchos casos prácticos, existen casos como por ejemplo en los bordes de un terraplén, donde no existen restricciones horizontales, y también es necesario cuantificar las deformaciones horizontales. Estas deformaciones horizontales, al ser de magnitud considerable, pueden tener efectos adversos en pilotes, cables, o ductos enterrados, los cuales muchas veces se construyen en la proximidad de terraplenes.

Un avance importante en lo que respecta a la predicción de deformaciones horizontales del suelo ha sido posible con la introducción de los modelos de elementos finitos. En los primeros años, aún con la aplicación de estos métodos, se encontraron numerosos fallos sistemáticos al predecir las deformaciones horizontales, entre los cuales Poulos (1972) resalta la dificultad de estimar el coeficiente de Poisson verdadero del suelo, la anisotropía y heterogeneidad del suelo, y el comportamiento no lineal del suelo.

En los años siguientes, teorías como las de Tavenas *et. al* (1979), Ladd (1991) y más recientemente Xu & Chai (2014) ayudaron a predecir las magnitudes de deformaciones horizontales mediante métodos analíticos basados en el monitoreo de la obra.

2.1 El método de Tavenas, Miussens & Bourges

En el año 1979, Tavenas, Mieussens y Bourges publicaron los resultados del análisis y seguimiento de 21 terraplenes construidos sobre suelos blandos. Las observaciones realizadas permitieron concluir que existen tres etapas marcadas en la interpretación de las deformaciones horizontales del terreno.

- En una primera fase, durante la fase inicial de carga, existe un comportamiento parcialmente drenado, en el que las deformaciones horizontales ocurren rápidamente y son mucho menores que las deformaciones verticales. En esta fase se tiene la siguiente relación (DR) entre las deformaciones horizontales y verticales:

$$DR = \frac{\Delta h_{max}}{\delta h_{max}} = 0,18 \quad (1)$$

• En una segunda fase, una gran parte del estrato arcilloso llega a un estado normalmente consolidado, con comportamiento no drenado, en las que los esfuerzos efectivos van creciendo con la carga, en la que las deformaciones horizontales tienen más o menos la misma magnitud que las deformaciones verticales. En esta fase se tiene la siguiente relación entre las deformaciones horizontales y verticales:

$$DR = \frac{\Delta h_{max}}{\delta h_{max}} = 0,90 \quad (2)$$

• Finalmente, en la fase de consolidación que sucede a la construcción del terraplén, las deformaciones horizontales continúan aumentando de manera lineal con las deformaciones verticales del terreno. La relación entre las deformaciones horizontales y verticales máximas a lo largo de la etapa de consolidación está dada por la siguiente expresión:

$$DR = \frac{\Delta h_{max}}{\delta h_{max}} = 0,16 \quad (3)$$

Otra conclusión interesante que fue demostrada por Tavenas *et al.* (1979) es que la distribución de deformaciones horizontales en profundidad mantiene siempre la misma tendencia para un terraplén a lo largo del tiempo.

2.2 Las observaciones de Ladd

A lo largo de su carrera, el Profesor Ladd inculcó la importancia del acompañamiento de la obra. En uno de sus tantos artículos, Ladd (1991) menciona que un buen parámetro acerca la estabilidad general de los suelos fundación en este tipo de proyectos puede ser logrado mediante un correcto seguimiento de las deformaciones horizontales. Analizando la teoría propuesta por Tavenas *et al.* (1979), Ladd incluye una observación importante a la misma, que es el hecho que la misma está prevista para casos en los que los terraplenes se construyen en una sola etapa, y sin la utilización de drenes verticales.

En la práctica hoy en día, la construcción en una sola etapa muchas veces no es posible, ya que los tiempos de obra obligan a acelerar el proceso constructivo con la incorporación de drenes verticales. Teniendo esto en cuenta, Ladd, realizó un análisis de varios proyectos en los que se utilizaron drenes verticales, y propuso relaciones distintas entre las deformaciones horizontales y verticales. Estas relaciones pueden observarse en la Figura 1 que se presenta a continuación:

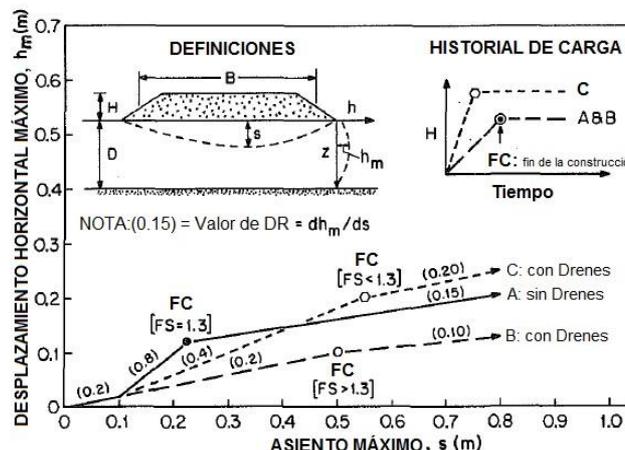


Figura 1. Relaciones propuestas por Ladd (1991).

2.3 La teoría de Xu & Chai

Una de las teorías más recientes para estimar deformaciones horizontales en casos en los que se utilizan drenes verticales es la formulada por Xu & Chai (2014). En la teoría de Xu & Chai, la relación entre desplazamientos horizontales y verticales se denomina *NLD* (desplazamientos laterales normalizados o *normalized lateral displacement*, en inglés), donde el $\Delta\delta_{max}$ corresponde a la deformación horizontal máxima medida en la línea del pie del terraplén y S_f es la deformación vertical final medida en el terreno natural en el eje del terraplén. En ambos casos, estos valores corresponden a los valores máximos medidos al final del proceso de consolidación primaria, sin considerar las deformaciones que se producen posteriormente por consolidación secundaria o *creep* (Xu & Chai, 2014).

$$NLD = \frac{\Delta\delta_{max}}{S_f} \quad (4)$$

Otro parámetro que es necesario determinar para utilizar de esta teoría de estimación de deformaciones horizontales es la relación adimensional *RLS*, la cual se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$RLS = \frac{p_n}{s_u} \quad (5)$$

Donde p_n , representa el valor de la presión índice y s_u corresponde al valor representativo de resistencia al corte no drenado para el estrato de suelos que fue afectado con drenes verticales, en ambos casos para el instante en que se produce el final de la carga del terraplén. El valor de presión índice puede ser calculado a su vez por la siguiente ecuación:

$$p_n = p_{emb} (1 - U) \quad (6)$$

Donde p_{emb} corresponde a la máxima presión de carga del terraplén y U es el grado de consolidación promedio del estrato de suelos afectado por los drenes verticales en el momento en que termina la aplicación de la carga. La razón para la cual se adopta valores de U y s_u correspondientes al instante en que se produce el final de la carga del terraplén es debido a que en ese momento generalmente el terreno se encuentra en un estado en el que se aplica mayor carga a menor valor de s_u (el cual todavía no ha aumentado) lo que se produce la situación en la se obtiene el menor el factor de seguridad.

Basados en los datos medidos, se realizó una curva de regresión la cual expresa una ecuación hallada de manera empírica que relaciona los parámetros *NLD* y *RLS*, y que permite estimar deformaciones horizontales. La relación entre los parámetros *NLD* y *RLS* se presenta de la siguiente manera:

$$NLD = 0,067 RLS + 0,11 \quad (7)$$

3 Estudio de las deformaciones en la Avenida Costanera Norte de Asunción

3.1 Descripción de la obra

Al inicio de la década de 1990, se empezaron a realizar estudios de factibilidad de ejecutar una obra en la Bahía de Asunción, la cual serviría no solamente para hermoear la zona y ganar terreno hacia la Bahía, sino que también como parte de un corredor vial para descongestionar el tráfico de acceso al microcentro de Asunción. Después de mucha investigación, numerosos proyectos y el paso de varios gobernantes, el inicio del primer tramo de la ansiada Avenida Costanera se dio en el año 2010. El tramo ejecutado, denominado "Costanera Norte", en su primera etapa comprendió el tramo entre la Avda. Colón, en el microcentro de Asunción, y la Avda. Gral. Santos, completando así aproximadamente 3.000 mts. La obra culminó en diciembre del año 2012, tras dos años y medio de trabajos.

El procedimiento constructivo utilizado para realizar la obra implicó el refulado de suelos arenosos del fondo de la Bahía de Asunción, para así realizar los terraplenes que sirven como sustento de la avenida que existe actualmente. La altura del terraplén cargado tiene un promedio de 9 m, con un ancho del coronamiento de 40 m. Los taludes laterales presentan pendientes de 1:4 y 1:8, dependiendo de las distintas secciones de la vía (ver Figura 2). El coronamiento del terraplén se encuentra por lo general en cota 64.15, previendo 1,15 m por encima del nivel máximo del Río Paraguay registrado que es 63.00.

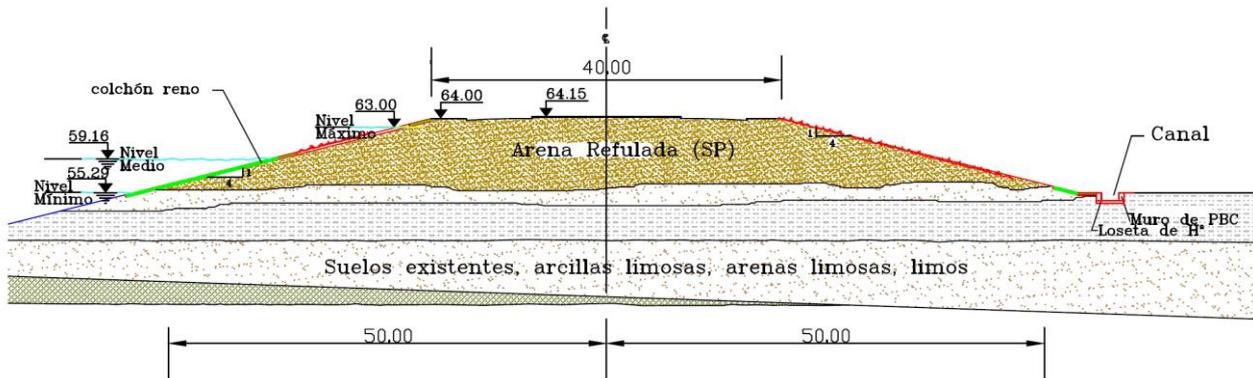


Figura 2. Sección típica de la obra

3.2 Estratigrafía y secciones de control

Se adoptaron veinte (20) secciones de control a lo largo de toda la obra, las cuales fueron denominadas TC1 a TC20. En estas secciones de control fueron instalados asentímetros o placas de asiento, inclinómetros y piezómetros que fueron utilizados durante la construcción de la obra para hacer un seguimiento del comportamiento de los suelos. En las Figura 3, se puede apreciar la ubicación de las secciones de control.

Para el desarrollo de este trabajo, fueron analizados los datos comprendidos entre las secciones de control TC6 a TC9, estudiando con profundidad las secciones de control TC6 (ubicada en la progresiva 0+620), TC8 (1+000) y TC9 (1+150).

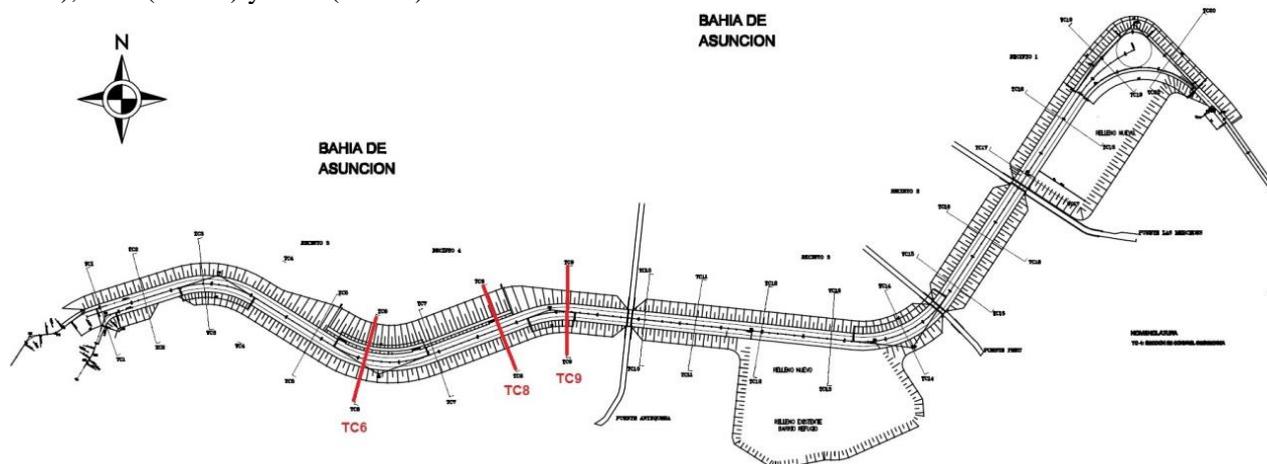


Figura 3. Ubicación de secciones de control

Tras el análisis de la documentación existente, se plantearon perfiles geotécnicos de las tres secciones de control, a fin de poder realizar los cálculos y modelos. En la Tabla 1 se puede observar los parámetros utilizados para el análisis de la sección TC6. Las secciones TC8 y TC9 tienen suelos con propiedades similares pero con espesores de capas distintos.

Tabla 1. Estratigrafía de la sección TC6

Estrato	Espesor (m)	OCR	C_c	e_o	γ (kN/m ²)	k (cm/s)	E (kN/m ²)	c_v (cm ² /s)
Arenas limo arcillosas (SM-SC)	3,00	1	0,25	0,81	18,5	5×10^{-5}	1500	5×10^{-3}
Limos arcillo arenosos (ML)	4,00	1	0,28	0,80	17,5	2×10^{-7}	1500	5×10^{-4}
Arenas arcillosas (CL)	8,00	1	0,31	0,86	18,0	2×10^{-7}	800	9×10^{-4}

3.3 Deformaciones horizontales calculadas mediante métodos analíticos

Las deformaciones horizontales máximas de las secciones de control analizadas fueron estimadas utilizando las teorías de Ladd (1991) y de Xu & Chai (2014). En la siguiente tabla se incluyen las deformaciones horizontales máximas calculadas por los dos métodos analíticos presentados:

Tabla 2 – Deformaciones horizontales máximas calculadas – Métodos analíticos

Sección de control	Deformación horizontal máxima (cm) - Ladd	Deformación horizontal máxima (cm) - Xu & Chai
TC6	44,3	26,6
TC8	33,4	21,5
TC9	23,7	13,7

3.4 Deformaciones horizontales calculadas mediante métodos numéricos

Las tres secciones de control de estudio fueron modeladas en el software *Plaxis*, recreando la geometría de la obra, las estratigrafías y las etapas de carga de la obra. Cabe destacar que si bien el diseño de algunos de los terraplenes no es simétrico, a modo de simplificar el análisis, en todos los casos se optó por modelar el lado interno del terraplén, debido a que los mismos poseen geometrías más sencillas y en todos los casos se utilizaron taludes uniformes 1:4.

Los datos de configuración iniciales de los modelos fueron similares en todos los casos, en los que se adoptaron modelos de deformación plana con elementos de 15 nodos. En todos los casos se optó por realizar un análisis utilizando el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb. En lo que respecta a las condiciones de contorno, se emplearon condiciones de contorno estándares que otorga el software, los cuales otorgan desplazamientos nulos ($u_x=u_y=0$) en la línea geométrica horizontal del fondo del modelo y desplazamientos nulos en la dirección horizontal ($u_x=0$) en las líneas geométricas verticales que limitan el modelo. Se introdujeron además elementos de drenes en los modelos, a fin de simular los drenes verticales que fueron instalados en obra. Por último, cabe destacar que en el límite izquierdo del modelo, coincidente con el eje de simetría, se establecieron condiciones de contorno cerradas para simular análisis de consolidación (*closed consolidation boundaries*, en el *Plaxis*) a fin de simular que no exista flujo de agua por ese borde (simulando simetría), en diferencia a las condiciones de contorno predeterminadas del *Plaxis* donde los bordes son abiertos, permitiendo flujo de agua dentro y fuera de los bordes.

Con relación a la simulación de las etapas de carga, en cada caso se simularon los tiempos y etapas de carga tal cual como se registraron en obra, según fue descrito por Quiñonez *et al.*, (2012). La etapa final de cálculo en cada caso es un análisis de consolidación hasta alcanzar la disipación total de presiones de poro (como valor final mínimo casi nulo de 1 kN/m²).

Los modelos fueron calibrados primeramente comparando las deformaciones verticales con los registros de las placas de asiento existentes en la obra, como puede observarse en la Figuras 4.

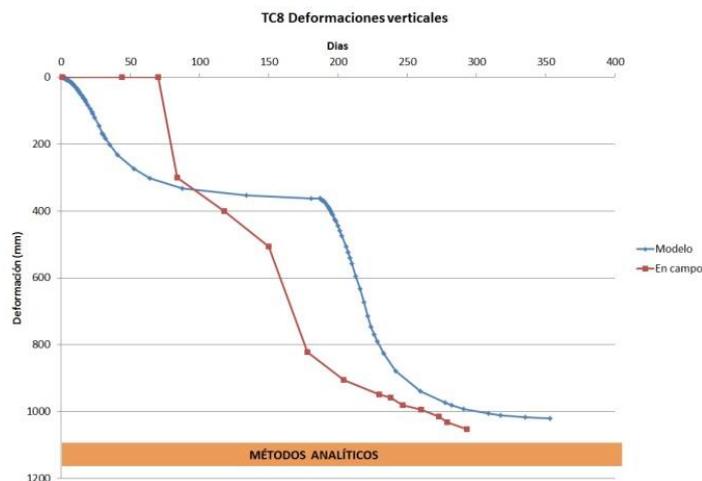


Figura 4. Lecturas campo vs. modelo – TC8

Seguidamente, se analizaron las deformaciones horizontales calculadas y se procedió a compararlas con las predicciones obtenidas mediante los métodos analíticos presentados anteriormente, así como con los registros de los inclinómetros instalados en las secciones de control, como se puede observar en la Figura 5. En la Tabla 3 se presenta la comparación de deformaciones horizontales obtenidas por los distintos métodos.

Tabla 3 – Comparación de deformaciones horizontales máximas

Sección de control	Deformación horizontal máxima (cm) - Ladd	Deformación horizontal máxima (cm) - Xu & Chai	Deformación horizontal máxima según <i>Plaxis</i> (cm)	Lectura máxima inclinómetro (cm)
TC6	44,3	26,6	35,7	19,0
TC8	33,4	21,5	28,9	21,0
TC9	23,7	13,7	22,5	17,0

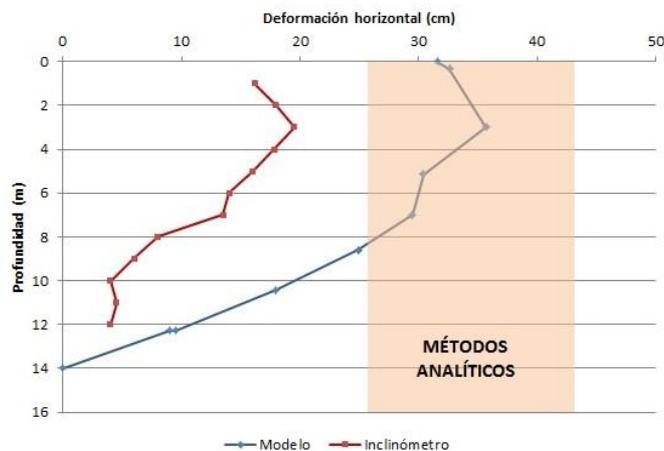


Figura 5. Comparación deformaciones horizontales TC6

4. Conclusiones

Los modelos y estimaciones de deformaciones horizontales presentados brindaron información muy importante que normalmente no se tiene en cuenta en proyectos de este tipo en nuestro país. Con esa información se pudo llegar a las siguientes conclusiones:

- Una estimación inicial que puede realizarse entre las relaciones de deformaciones máximas horizontales y verticales para suelos de la Bahía de Asunción podría estar entre 0,20 y 0,40 según las teorías empíricas estudiadas. Este orden de magnitud puede ser utilizado como marco de referencia para el seguimiento de deformaciones horizontales en obras de terraplenes construidos sobre suelos blandos de la Bahía de Asunción. Cabe destacar que estas relaciones empíricas estudiadas no contemplan la heterogeneidad en la estratigrafía del suelo.
- Los resultados obtenidos utilizando la teoría de Ladd, la cual es de muy sencilla aplicación, arrojan valores un poco mayores que las de Xu & Chai. Sin embargo, los valores obtenidos utilizando la teoría de Xu & Chai se acercaron más a las lecturas de los inclinómetros de obra.
- Los resultados del modelo computacional realizado demostraron también que la relación entre deformaciones horizontales y verticales se encuentra en el rango entre 0,20 y 0,40, alcanzando valores máximos de 0,44 para la peor situación de etapa de carga estudiado. No obstante, la simulación fue realizada utilizando el método constitutivo de Mohr-Coulomb, el cual puede tener limitaciones al simular deformaciones en estratos de suelos muy blandos.
- Si bien la simulación realizada permitió obtener resultados bastante próximos a lo medido en campo, la utilización de un modelo constitutivo más apropiado para evaluar estratos de suelos muy blandos, en los que se contemplen efectos de fluencia, como por ejemplo el Modelo SSC (Soft-Soil-Creep), podría brindar mejores resultados.
- Finalmente, mencionar que para un futuro trabajo, se puede introducir en el modelo una posible variación en la cota del agua del río y también el efecto de la sobrecarga adicional que se produce por la compensación de las deformaciones verticales que se producen.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, M.S.S. & Marques, M.E.S. (2013). Design and performance of embankments on very soft soils. London, UK: CRS Press, Taylor & Francis Group.
- GEO-STAN SRL (2010). Informe de Estudios Geotécnicos del Módulo Avda. Costanera Norte – Primera Etapa.
- Ladd, C.C. (1991). Stability evaluation during staged construction. *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 117(4), 537–615.
- Poulos, H. G. (1972). Difficulties in prediction of horizontal deformations of foundations. *ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(SM8), pp. 843-848.
- Quiñonez, R.A., Kanazawa, N., Lesme, J.G. (2012). *Estudio del Comportamiento de un Terrelleno Refulado sobre suelo Compresible*. Tesis de Grado en Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción.
- Tavenas, F., & Leroueil, S. (1980). The behaviour of embankments on clay foundations. *Canadian Geotech. J.*, 17(2), 236-260.
- Tavenas, F., Mieussens, C. & Bourges, F. (1979) Lateral displacements in clay foundations under embankments. *Canadian Geotechnical Journal*, 16 (3), 532–550.
- Xu, F. and Chai, J.-C. (2014). Lateral displacement of PVD-improved deposit under embankment loading. *Geosynthetic International*, 21, No. 5, 286–300.