



Vigilada Mineducación

ANÁLISIS COMPARATIVO DE ASENTAMIENTOS MEDIANTE TEORÍAS
SIMPLIFICADAS Y MÉTODOS NUMÉRICOS, CALIBRADOS CON LECTURAS
DE CAMPO, PARA UNA EDIFICACIÓN DE 24 PISOS EN LA CIUDAD DE
MONTERÍA - CÓRDOBA

DAVID JESÚS GONZÁLEZ ARTEAGA

Trabajo de grado

Asesor

Jorge Alonso Prieto Salazar, PhD.

UNIVERSIDAD EAFIT
ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN INGENIERÍA
MEDELLÍN

2023

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme la fuerza y sabiduría para culminar este proyecto.

Agradezco a mi familia, por su amor y cariño, y ser mi apoyo constante. Sin ellos no hubiera posible la realización de este proyecto. Muchas gracias por guiarme y enseñarme a avanzar siempre.

A Estefanía, por darme luz en los momentos de oscuridad. Y su ayuda invaluable en el procesamiento de la información.

A la universidad Eafit, por cambiarme la vida.

Al profesor Jorge Alonso Prieto Salazar, PhD. por sus enseñanzas y correcciones. Su ejemplo es fuente de inspiración para muchos. Me deja lecciones que me acompañarán por siempre y la tarea de superarme cada día.

Al ingeniero y amigo Pablo Eugenio Castilla Negrete, por el aporte de la información base para este proyecto y compartir su experiencia conmigo.

A Rodrigo Hernández Carrillo, PhD. y al ingeniero Sergio Elías Flórez Causil, muchas gracias mis amigos por sus ideas y charlas que tanto me guiaron en este camino.

A todos ustedes, mis sinceros agradecimientos.

David Jesús González Arteaga

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
JUSTIFICACIÓN.....	13
OBJETIVOS.....	14
GENERAL	14
ESPECÍFICOS	14
MARCO TEÓRICO	15
GRUPO DE PILOTES	16
Capacidad del sistema trabajando como pilotes individuales.....	16
Capacidad del sistema trabajando en bloque	17
MÉTODO SIMPLIFICADO: TAMEZ-GONZÁLEZ (2001)	20
MÉTODO SIMPLIFICADO: POULOS (2002)	27
MÉTODOS NUMÉRICOS	33
DISEÑO METODOLÓGICO	35
DESARROLLO DEL TRABAJO.....	36
RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	36
Geometría.....	40
Propiedades de los suelos.....	40
Cargas esperadas	49
Asentamientos	55
CALIBRACIÓN DEL MODELO TRIDIMENSIONAL DEL CONJUNTO LOSA – SUELO – PILOTES.....	57
RESULTADOS.....	66

GRUPO DE PILOTES	66
MÉTODO SIMPLIFICADO: TAMEZ-GONZÁLEZ (2001)	73
MÉTODO SIMPLIFICADO: POULOS (2002)	75
MÉTODOS NUMÉRICOS	78
ANÁLISIS DE RESULTADOS	79
CONCLUSIONES	81
REFERENCIAS	83
ANEXO	87

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Perfil del suelo deducido.	43
Tabla 2. Parámetros geotécnicos deducidos.	43
Tabla 3. Parámetros obtenidos a partir del informe de refracción sísmica.	47
Tabla 4. Parámetros complementarios para el perfil deducido.	47
Tabla 5. Distribución de carga para cada dado de cimentación.	49
Tabla 6. Cotas en la columna central.	55
Tabla 7. Cotas en todas las columnas.	56
Tabla 8. Parámetros empleados en la calibración inicial.	57
Tabla 9. Correlaciones empleadas para calcular el índice de compresibilidad.	58
Tabla 10. Parámetros geotécnicos calibrados.	59
Tabla 11. Capacidad de carga última de los pilotes individuales.	67
Tabla 12. Capacidad de carga última del bloque de suelo.	68
Tabla 13. Asentamientos elásticos para pilotes individuales.	68
Tabla 14. Asentamientos elásticos del grupo de pilotes.	69
Tabla 15. Asentamientos calculados mediante Terzaghi y Peck (1968).	70
Tabla 16. Asentamientos calculados mediante Tomlinson (2001).	71
Tabla 17. Asentamientos totales para grupo de pilotes.	72
Tabla 18. Capacidad de carga última de la losa de cimentación.	73
Tabla 19. Distribución de carga y asentamientos por el método simplificado de Enrique Tamez Gonzalez.	73
Tabla 20. Resultados método simplificado Enrique Tamez usando diferentes teorías de disipación de esfuerzos.	74
Tabla 21. Cálculo de rigidez de la losa y del grupo de pilotes.	75
Tabla 22. Distribución de cargas y asentamiento método simplificado: Harry Poulos.	75
Tabla 23. Resumen distribución de cargas y asentamientos para los métodos simplificados.	77
Tabla 24. Resumen resultados.	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de esfuerzos bajo grupo de pilotes.	18
Figura 2. Distribución de esfuerzos bajo un grupo de pilotes.	19
Figura 3. Conjunto losa-suelo- pilotes y sus componentes básicos.	20
Figura 4. Modelo simplificado de distribución de esfuerzos para el grupo de pilotes	22
Figura 5. Comportamiento conjunto del sistema losa-suelo-pilotes.	26
Figura 6. Curva carga-asentamiento método de Poulos.	31
Figura 7. Localización de la ciudad de Montería dentro del departamento y del país.	37
Figura 8. Formación geológica en la ciudad de Montería.	38
Figura 9. Localización de la edificación dentro del municipio de Montería.	41
Figura 10. Localización de los sondeos 1 y 2 dentro del área de la torre.	42
Figura 11. Localización de las líneas sísmicas del proyecto.	44
Figura 12. Perfil de velocidades línea sísmica 1.	45
Figura 13. Perfil de velocidades línea sísmica 2.	46
Figura 14. Área en planta de la cimentación y distribución de los pilotes.	50
Figura 15. Distribución de los dados en la losa de cimentación.	51
Figura 16. Localización de dados, vigas y aligeramiento en la losa de cimentación..	52
Figura 17. Detalle dado de cimentación.....	53
Figura 18. Detalle perimetral losa de cimentación.	54
Figura 19. Modelo tridimensional en Gts Nx Midas.....	59
Figura 20. Vista superior losa generada en Gts Nx Midas.	60
Figura 21. Asentamientos modelados vs reales dado M1C.....	61
Figura 22. Asentamientos modelados vs reales dado M2A - 2B.....	61
Figura 23. Asentamientos modelados vs reales dado M3D.....	62
Figura 24. Asentamientos modelados vs reales dado M3'A'.....	62
Figura 25. Asentamientos modelados vs reales dado M4'A' - 4'B'.....	63
Figura 26. Asentamientos modelados vs reales dado M5'A'.....	63

Figura 27. Asentamientos modelados vs reales dado M7D.....64

Figura 28. Asentamientos modelados vs reales dado M8C' - 9.....64

Figura 29. Curva carga-asentamiento. 76

Figura 30. Asentamientos haciendo uso de elementos finitos.78

RESUMEN

Los sistemas losa – pilotes representan un reto a nivel geotécnico, debido a la complejidad que, en ocasiones, puede suponer su análisis. Sobre todo, cuando existen condiciones geométricas irregulares. Tal es el caso de una edificación de 24 pisos construida en la ciudad de Montería, para la cual se analizaron los asentamientos obtenidos mediante técnicas simplificadas de interacción losa – pilotes. Por otro lado, se emplearon métodos numéricos (elementos finitos), calibrados a partir de los datos de campo, la secuencia constructiva y los asentamientos medidos durante la construcción de la edificación. Finalmente, se compararon las estimaciones de las técnicas simplificadas con las proyectadas según elementos finitos. Como resultado del presente trabajo, se determinó la metodología simplificada que mejor se ajusta al comportamiento esperado de los asentamientos en la edificación.

Palabras clave: losa – pilotes, asentamientos.

ABSTRACT

Piled-raft systems represent a challenge at geotechnics level due to the complexity that, in occasions, its analysis can assume. Above all when there are geometrical complexity conditions. That is the case of a 24-story building built in Montería city, for this there were analyzed the settlements got by simplified procedure of piled – raft interaction. After that, it was used numerical methods (finite elements), calibrated from known data field, the constructive sequence and the settlements measured during the execution of the project. Finally, was compared the estimations of the simplified techniques with the projected according with finite elements. As a result of the present project was determined the simplified methodology that defines better the behavior of the settlements of the edification.

Keywords: piled – raft, settlements.

INTRODUCCIÓN

Al momento de diseñar una edificación surge la necesidad de realizar un trabajo interdisciplinario que permita garantizar su estabilidad durante, por lo menos, la vida útil proyectada. Establecida de acuerdo con la normativa particular del sitio que se haya elegido.

Para el caso de la geotecnia, el problema inicia con la estimación de las cargas de servicio que soportará la edificación durante su vida útil, con el fin de determinar la profundidad de exploración, necesaria para conocer las propiedades físicas y mecánicas del suelo. De esta manera es posible diseñar el sistema de transmisión de cargas adecuado al terreno, que garantice la estabilidad de la obra, teniendo en cuenta los esfuerzos y deformaciones admisibles.

Dentro de los mecanismos de transmisión de cargas existen, a grandes rasgos, las cimentaciones superficiales y las profundas. Sin embargo, debido a la magnitud de las cargas de muchas edificaciones, y las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, en ocasiones, es necesario considerar el trabajo conjunto entre cimentaciones profundas y superficiales, es decir, cimentaciones mixtas.

Las cimentaciones mixtas permiten transmitir las cargas al terreno empleando elementos superficiales como las losas de cimentación y a su vez de tipo profundo como las pilas o pilotes, es decir, sistemas losa – pilotes o placa – pilotes. Estos se emplean con el fin de generar un incremento en la eficiencia del desempeño de este conjunto.

Los sistemas placa – pilotes se encuentran ampliamente difundidos en el mundo, por tanto, su comportamiento ha sido estudiado y analizado por diferentes autores, dando así origen a diversas teorías que permiten estimar la interacción entre sus componentes Poulos et al. (1997) Katzenbach et al. (1998) Cunha et al. (2001) Prakoso y Kulhawy (2001) Randolph y Reul (2019). Dentro de los mecanismos de solución del problema, los pilotes se han tratado como elementos individuales, unidos mediante un dado o cabezal que permite distribuir las cargas entre ellos. También se han analizado como un gran bloque de suelo reforzado que permite transmitir todas las cargas al terreno de cimentación a través de su área perimetral. Otras teorías resuelven el problema como un aporte conjunto entre losa y pilotes mediante técnicas simplificadas. Por otra parte, también es posible recurrir al uso de métodos numéricos, por ejemplo, elementos finitos para su análisis.

Mediante este trabajo se analizó el sistema losa – pilotes de una edificación construida en la ciudad de Montería, departamento de Córdoba. Se tomaron datos de campo como las propiedades de los suelos y asentamientos durante la construcción, para establecer el mecanismo de solución del problema losa – pilotes que mejor representa el comportamiento del conjunto.

Se espera que las conclusiones generadas a partir de este proyecto sean de utilidad para próximos en la ciudad. También se busca que el presente documento sirva como elemento de aporte en la discusión que gira en torno a los sistemas losa – pilotes.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos 20 años la ciudad de Montería ha experimentado un crecimiento del sector de la construcción, lo que se ha evidenciado en la urbanización de nuevas áreas y con ello la creación de barrios y comunas. Este auge permitió que se diera paso a edificaciones que sobrepasaron los 20 niveles en altura, lo que trajo como consecuencia la necesidad de transmitir grandes cargas al terreno y de enfrentar los desafíos impuestos por las deformaciones obtenidas.

Dentro de las soluciones planteadas para resolver el problema de las cargas y los asentamientos en los depósitos presentes en la ciudad de Montería, muchas edificaciones optaron por implementar el sistema placa – pilotes. Este puede resultar útil, teniendo en cuenta el origen aluvial de los suelos y la predominancia de arcillas normalmente consolidadas en los estratos superiores, las cuales se encuentran intercaladas con depósitos arenosos.

El problema placa – pilotes puede abarcarse desde diferentes perspectivas, como se mencionó en la introducción. Sin embargo, para la ciudad no existe un estudio que establezca cuáles de ellas son las más apropiadas. Si bien es cierto, el uso de métodos numéricos permite obtener la mejor solución, aproximada, al problema de fronteras; es importante mencionar que en muchas ocasiones su uso se ve limitado, debido a la cantidad y calidad de información requerida para su adecuada operación. Por otra parte, las soluciones numéricas requieren recursos para la adquisición de las licencias comerciales, los cuales no tienen muchas empresas de consultoría en el medio. Por tanto, surge la necesidad de evaluar el comportamiento real de los asentamientos de la cimentación de edificaciones, comparándolos con los estimados mediante modelación numérica. También se deben contrastar los obtenidos con técnicas simplificadas para establecer aquellas que representan la realidad.

De acuerdo con lo expuesto, surge la siguiente pregunta: ¿Qué modelo de comportamiento del conjunto losa – pilotes predice de mejor manera los asentamientos obtenidos para los depósitos arcillosos de la ciudad de Montería?

JUSTIFICACIÓN

La interacción losa – pilotes se ha tratado de explicar a través de diferentes técnicas, con grados o niveles de complejidad variables y diversos resultados para cada uno de los métodos de análisis. Aquellos más robustos, y que generan una mejor aproximación a la realidad, por lo general, requieren de información detallada, que en muchas ocasiones no se tiene, al igual que de software especializados que permitan resolver los sistemas. Estos programas no siempre se encuentran a la mano de las personas o empresas encargadas de elaborar los diseños. Surge entonces la necesidad de evaluar para una edificación en la ciudad de Montería su comportamiento real y compararlo con el obtenido mediante metodologías de cálculo que requieren información geotécnica básica. Esto se realiza con el fin de establecer cuál de ellas representa de mejor manera los asentamientos en la edificación, y así generar un punto de referencia que pueda ser de utilidad para los diseñadores. Con lo anterior se busca evitar poner en riesgo la seguridad de las edificaciones a causa del componente geotécnico en los depósitos arcillosos de la ciudad de Montería.

OBJETIVOS

GENERAL

Comparar los asentamientos registrados durante la construcción de la obra con los estimados de una modelación numérica, haciendo uso del software GTS NX Midas, y aquellos obtenidos por métodos simplificados, para el sistema losa – pilotes de una edificación de 24 niveles, construida en la ciudad de Montería, para determinar cual representa de mejor manera el comportamiento real de la edificación.

ESPECÍFICOS

Recopilar la información disponible de la edificación para definir las condiciones de carga, terreno, geometría y asentamientos medidos en campo.

Calibrar las propiedades geotécnicas que controlan el diseño, haciendo uso del software Gts Nx Midas, para establecer los parámetros de comportamiento del suelo a ser empleados en los métodos simplificados de cálculo.

Aplicar las metodologías simplificadas de diseño de los sistemas losa – pilotes, empleando hojas de cálculo, para estimar los asentamientos esperados de la edificación para cada una de ellas.

Comparar los asentamientos obtenidos mediante análisis numérico con aquellos de cálculo simplificado para establecer aquella que representa mejor el comportamiento real previsto para la edificación.

MARCO TEÓRICO

Al momento de realizar la planeación de una edificación es indispensable plantearse el mecanismo de transmisión de las cargas de la superestructura al terreno. Para esto, se han ideado diferentes alternativas: cimentaciones superficiales y profundas. Sin embargo, en algunos casos, debido a la naturaleza del suelo y a las cargas transmitidas, es necesario buscar sistemas combinados que integren o consideren el aporte de los elementos de la cimentación superficial con los de la cimentación profunda. Para así generar un desempeño apropiado del conjunto.

Cuando se diseñan cimentaciones profundas con pilas o pilotes, usualmente el apoyo de la estructura se realiza sobre 3 o más unidades con el fin de tener en cuentas los problemas de alineamiento o las excentricidades que pudieran aparecer (Murthy, 2007). De acuerdo con lo anterior, es necesario construir un elemento de amarre, como losas o dados, el cual al estar en contacto con el terreno transmitirá parte de la carga al mismo (Budhu, 2010). Por lo tanto, en dichos casos es necesario establecer la proporción de la carga que es transmitida por la losa o por los cabezotes y aquella que es transmitida por los pilotes. Lo anterior define la interacción losa – suelo – pilotes.

La interacción losa - suelo - pilotes se puede resolver por diferentes métodos. Muchos sistemas losa – pilotes se diseñan asumiendo que toda la carga es transmitida por los pilotes, despreciando el aporte de la losa, con lo cual se tiene una condición conservadora (Horikoshi & Randolph, 1998).

Para Poulos (2001), en la práctica, la primera aproximación al diseño de la cimentación se realiza mediante el planteamiento de cimientos superficiales, como una losa, por ejemplo, y si esta no resulta apropiada se reemplaza por una losa piloteada. En esta las cargas se distribuyen conjuntamente, entre ambos elementos, con una proporción que debe calcularse. También se considera el aporte de los pilotes como mecanismo para el control de asentamientos.

A continuación, se mencionan los métodos de cálculo para la capacidad de los pilotes. Esta puede ser individual o en bloque.

GRUPO DE PILOTES

El análisis del grupo de pilotes tiene su sustento en lo descrito por Terzaghi y Peck (1967), donde la capacidad de carga total puede ser calculada como la suma de la capacidad individual de los pilotes, eso es N veces la capacidad individual del pilote. Por otra parte, se puede estimar como la capacidad de carga del bloque conformado por el conjunto de pilotes. La que resulte menor de las 2 condiciones.

Capacidad del sistema trabajando como pilotes individuales

Para Terzaghi y Peck (1967) eso se expresa como:

$$Q_{ugi} = \sum N \cdot Q_u \quad (1)$$

Donde:

Q_{ugi} : capacidad de carga total del grupo de pilotes como elementos individuales, en KN.

N: el número de pilotes que soportarán la estructura.

Q_u : capacidad de carga individual del pilote, en KN.

Capacidad del sistema trabajando en bloque

Puede estimarse como:

$$Q_{ugb} = q_d \cdot B_g \cdot L_g + D_f \cdot (2 \cdot B_g + 2 \cdot L_g) \cdot S \quad (2)$$

Donde:

Q_{ugb} : capacidad de carga total del grupo de pilotes como bloque, en KN.

q_d : capacidad de carga unitaria en la base, en KN/m².

B_g : base del grupo de pilotes, en metros.

L_g : longitud del grupo de pilotes, en metros.

D_f : profundidad de desplante del grupo de pilotes, en metros.

S : resistencia al corte promedio entre la superficie y la profundidad de desplante de los pilotes, en KN/m².

Con relación a los asentamientos del grupo de pilotes, para suelos finos, Terzaghi y Peck (1967) mencionan que el contenido de agua por encima del tercio inferior de los pilotes permanece invariable, mientras que por debajo de ese nivel se desarrolla el proceso de consolidación. Como si la edificación se encontrara soportada en una losa flexible a esa profundidad.

Para la losa flexible, de acuerdo con Terzaghi y Peck (1967), puede asumirse que la carga total se distribuye como una pirámide truncada, con pendiente de 60° con relación a la horizontal, a partir de los bordes del elemento. La figura 1 permite explicar esta consideración.

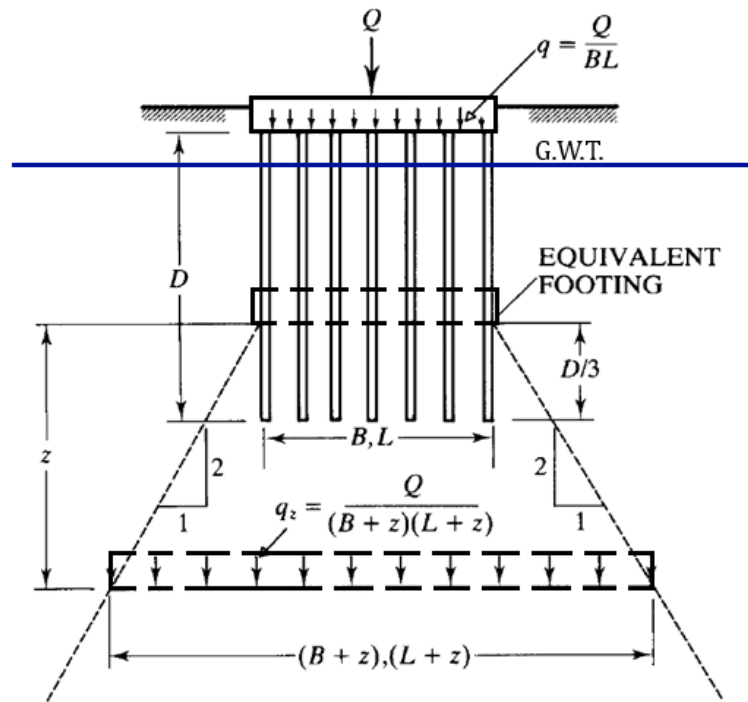


Figura 1. Distribución de esfuerzos bajo grupo de pilotes. Adaptada de Fellenius (1991).

Otros autores también han teorizado sobre la distribución de esfuerzos bajo el grupo de pilotes. Por ejemplo, Tomlinson (2001) asume, para materiales finos, que la losa equivalente se posiciona a dos tercios de la longitud del grupo de pilotes, y que las dimensiones de esta aumentan con una proporción 1:4 desde la superficie. La disipación de esfuerzos inicia a partir de la ubicación de la losa equivalente. En la figura 2 se puede apreciar este planteamiento.

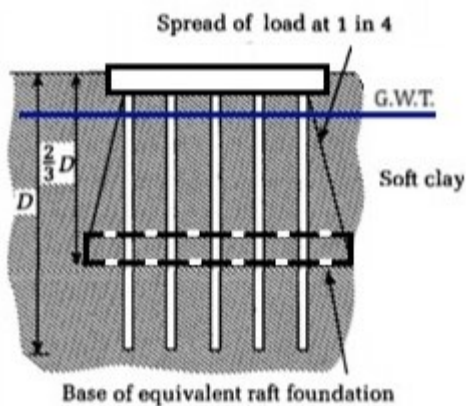


Figura 2. Distribución de esfuerzos bajo un grupo de pilotes. Adaptada de Tomlinson (2001).

Las teorías de distribución de esfuerzos presentadas son utilizadas con frecuencia para el cálculo de asentamientos de grupos de pilotes. Para el caso de la propuesta de Terzaghi y Peck (1967) , los asentamientos serán mayores que aquellos obtenidos según la teoría de Tomlinson (2001). Por lo tanto, se debe validar, con la experiencia local, cuál de ellas representa mejor el comportamiento en una región particular.

Para la capacidad de carga, se ha mencionado el trabajo de los pilotes como grupo, sin considerar la contribución de la losa. Sin embargo, existen teorías que intentan explicar la interacción losa - pilotes, con el fin de evaluar el aporte de cada elemento al sistema. A continuación, se detallarán algunas teorías simplificadas.

MÉTODO SIMPLIFICADO: TAMEZ-GONZÁLEZ (2001)

Esta teoría simplificada, estima de forma sencilla la proporción de distribución de la carga, entre la losa de cimentación y el grupo de pilotes. Este modelo de interacción también permite calcular los asentamientos del sistema. Bajo esta teoría, el conjunto se descompone en losa y grupo de pilotes. Posteriormente, se analiza la superposición de los efectos y se determina el comportamiento del sistema. Lo anterior se puede evidenciar en la figura 3.

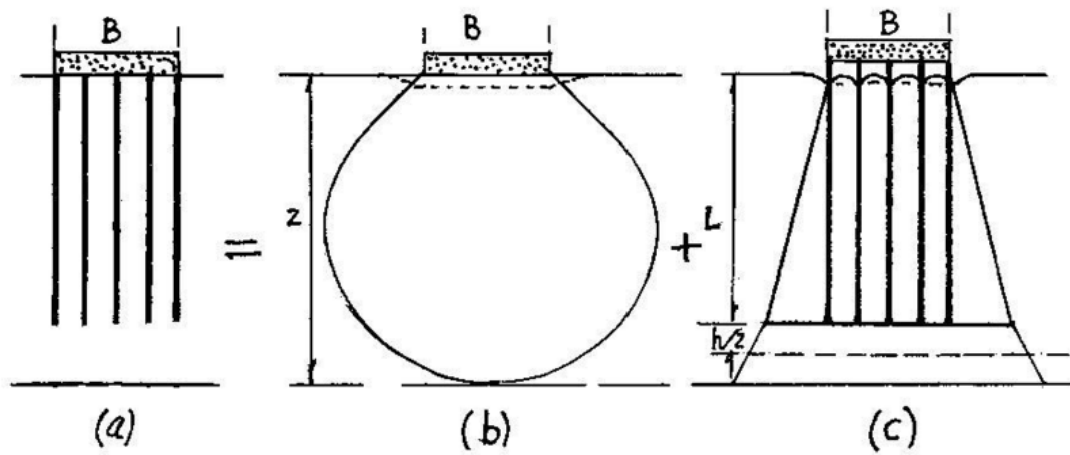


Figura 3. Conjunto losa-suelo- pilotes y sus componentes básicos. (a) Sistema losa-suelo-pilotes. (b) Subsistema básico losa. (c) Subsistema básico grupo de pilotes. Nótese que $h/2$ es la mitad del espesor del estrato compresible bajo la punta de los pilotes. Tomada de Tamez González (2001).

Para que la interacción losa - pilotes exista, los asentamientos de los sistemas independientes deben ser iguales. Para la losa se pueden expresar así:

$$\rho l = Cl \cdot Pl \quad (3)$$

Donde:

ρl : asentamiento de la losa, en metros.

Cl : coeficiente de asentamiento de la losa, en m/KN.

Pl : carga de la edificación tomada por la losa, en KN.

El coeficiente de asentamiento de la losa se define como:

$$Cl = \frac{mvl \cdot B \cdot Ff}{Al} \quad (4)$$

Donde:

mvl : es el módulo de compresibilidad volumétrica de los estratos bajo la losa. Se considera hasta la profundidad de influencia del bulbo, o el espesor de los estratos susceptibles de asentamiento, en m^2/KN .

B : base de la losa, en metros.

A : área de la losa, en m^2 .

F_f : factor de forma adimensional de Egorov.

Para el cálculo de asentamientos del grupo de pilotes, se toma como referencia el modelo simplificado de disipación de esfuerzos ilustrado en la figura 4.

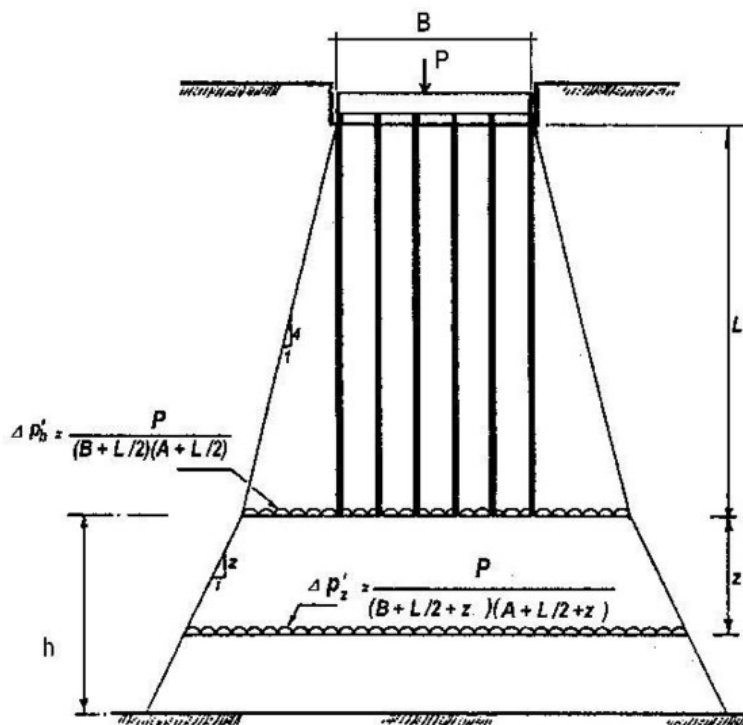


Figura 4. Modelo simplificado de distribución de esfuerzos para el grupo de pilotes. Las variables se detallan en el texto. Tomada de Tamez González (2001).

Los asentamientos del grupo de pilotes se pueden expresar así:

$$\rho_p = C_p \cdot P_p \quad (5)$$

Donde:

ρ_p : asentamiento del grupo de pilotes, en metros.

C_p : coeficiente de asentamiento del grupo de pilotes, en m/KN.

P_p : carga de la edificación que es tomada por el grupo de pilotes, en KN.

El coeficiente de asentamiento del grupo de pilotes se define como:

$$C_p = \frac{mvp \cdot h}{\left(B + \frac{L}{2} + Z\right)\left(A + \frac{L}{2} + Z\right)} \quad (6)$$

Donde:

mvp : es el módulo de compresibilidad volumétrica del suelo bajo la punta de los pilotes, en m^2/KN .

h : espesor del estrato compresible, en metros.

L : longitud de los pilotes, en metros.

A : longitud o largo de la losa de cimentación, en metros.

Teniendo en cuenta que la losa y los pilotes deben asentarse la misma magnitud, para que exista interacción losa - pilotes, se puede presentar la siguiente igualdad:

$$\rho_l \cdot Pl = \rho_p \cdot Pp \quad (7)$$

La carga total del sistema se puede expresar así:

$$Pt = Pl + Pp \quad (8)$$

Donde:

P_t : carga total de la edificación, en KN.

P_l : carga de la edificación tomada por la losa, en KN.

P_p : carga de la edificación que es tomada por el grupo de pilotes, en KN.

A partir de lo anterior, se puede calcular la proporción de distribución de la carga entre la losa y el grupo de pilotes, para lo cual es necesario reemplazar y despejar. Para lo cual se obtiene:

$$Cl \cdot (Pt - Pp) = Cp \cdot Pp \quad (9)$$

$$Pp = \frac{Cl}{(Cl + Cp)} \cdot Pt \quad (10)$$

$$Cl \cdot Pl = Cp \cdot (Pt - Pl) \quad (11)$$

$$Pl = \frac{Cp}{(Cp + Cl)} \cdot Pt \quad (12)$$

Este método sugiere la elaboración de la gráfica carga - deformación del sistema y de sus componentes. En la figura 5 se puede observar esta sugerencia.

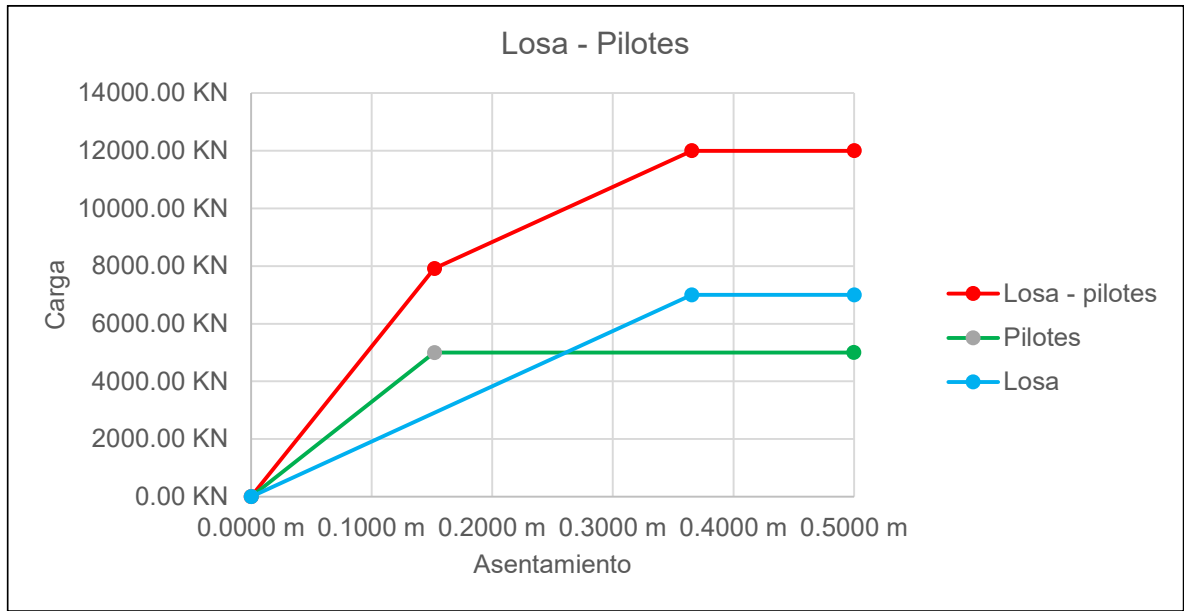


Figura 5. Comportamiento conjunto del sistema losa-suelo-pilotes. Elaboración propia a partir de Tamez González (2001).

MÉTODO SIMPLIFICADO: POULOS (2002)

Esta teoría simplificada, considera el desempeño general del sistema para capacidad de carga y asentamientos, los cuales pueden ser totales o diferenciales. También, incluye momentos y cortantes para el diseño estructural de la losa y de los pilotes.

El método asume la capacidad de carga última (P_u) como el menor de dos valores: la suma de la carga última de la losa y la carga última de los pilotes individuales; o la carga última del sistema considerado como bloque más la losa en voladizo. Para el cálculo de los asentamientos se determina la proporción de carga entre losa y pilotes. Para esto es necesario conocer la rigidez del sistema losa – suelo – pilotes, la cual se estima de acuerdo con la expresión propuesta por Randolph (1994):

$$K_{pr} = \frac{K_p + K_r(1 - 2\alpha_{cp})}{1 - \alpha_{cp}^2 \frac{K_r}{K_p}} \quad (13)$$

Donde:

K_{pr} : rigidez del sistema losa – suelos – pilotes, adimensional.

K_p : rigidez del grupo suelo – pilotes, adimensional.

K_r : rigidez losa - suelo, adimensional.

α_{cp} : factor de interacción losa – pilotes, adimensional.

Para calcular la rigidez losa – suelo, es posible emplear la formulación de Fraser y Wardle (1976):

$$K_r = \frac{4 E_r (1 - \nu_s^2) t^3}{3 E_s (1 - \nu_r^2) b^3} \quad (14)$$

Donde:

Er: módulo de elasticidad de la losa, en KN/m².

Es: módulo de elasticidad del suelo, en KN/m².

vr: relación de Poisson elástica de la losa, adimensional.

vs: relación de Poisson elástica del suelo bajo la losa, adimensional.

t: espesor de la losa de cimentación, en metros.

b: ancho de la losa de cimentación, en metros.

La rigidez del grupo suelo – pilotes se determina de acuerdo con la propuesta de Poulos y Davis (1980):

$$K_p = K_1 \cdot n^w \quad (15)$$

Donde:

K1: rigidez del conjunto suelo – pilote individual, adimensional.

n: número de pilotes.

w: exponente que varía entre 0.30 y 0.50.

$$K_1 = \frac{E_p \cdot R_A}{E_s} \quad (16)$$

Donde:

E_p : módulo de elasticidad de la pila o pilote, en KN/m².

E_s : módulo de elasticidad del suelo, en KN/m².

R_A : relación de área entre la de la sección del pilote (el cual puede ser hueco) y la de la circunferencia exterior del mismo. Para pilotes macizos es igual a 1.

Finalmente, la carga asumida por la losa (P_r) con relación a la total (P_t) se puede expresar como:

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{K_r(1 - \alpha_{cp})}{K_p + K_r(1 - 2\alpha_{cp})} = X \quad (17)$$

$$\alpha_{cp} = 1 - \frac{\ln\left(\frac{r_c}{r_0}\right)}{\zeta} \quad (18)$$

$$\zeta = \ln\left(\frac{r_m}{r_0}\right) \quad (19)$$

$$r_m = \{0.25 + \xi[2.5 \cdot \rho(1 - v_s) - 0.25]\} \cdot L \quad (20)$$

$$\xi = \frac{E_{sl}}{E_{sb}} \quad (21)$$

$$\rho = \frac{E_{sav}}{E_{sl}} \quad (22)$$

Donde:

X: Proporción de carga que asume la losa.

K_r: rigidez losa - suelo, adimensional.

K_p: rigidez del grupo suelo – pilotes, adimensional.

α_{cp}: factor de interacción losa – pilotes, adimensional.

r_c: radio promedio del cabezal. (área de la losa entre el número de pilotes), en metros.

r₀: radio de la pila o pilote, en metros.

v_s: relación de Poisson elástica del suelo bajo la losa, adimensional.

L: longitud de la pila o pilote, en metros.

E_{sl}: módulo de Young del suelo al nivel de la base de la pila o pilote, en KN/m².

E_{sb}: módulo de Young del estrato portante bajo la base de la pila o pilote, en KN/m².

E_{sav}: módulo de Young promedio del suelo a lo largo del fuste de la pila, en KN/m².

A partir de la proporción calculada se determina la carga que asume la losa. Por su parte, el grupo de pilotes recibe la diferencia entre la carga total y la tomada por la losa. Posteriormente, se estiman los asentamientos haciendo uso de las rigideces calculadas. Como resultado del método, es posible construir la gráfica de carga – asentamiento para el sistema losa – pilotes, como se ilustra en la figura.6.

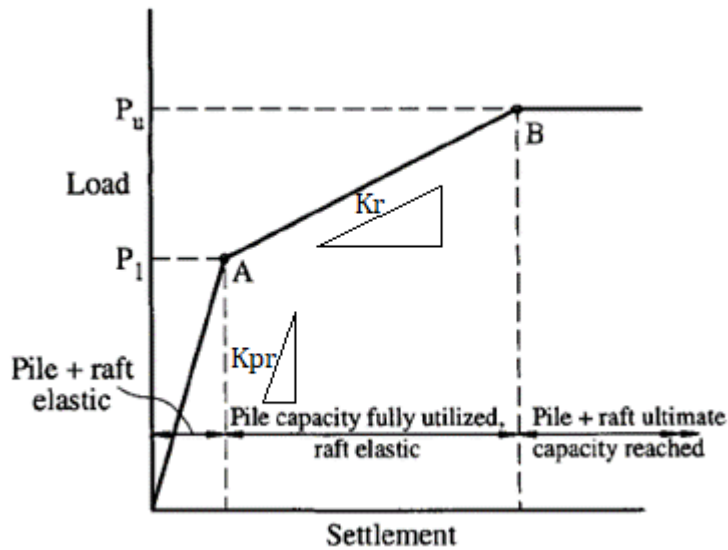


Figura 6. Curva carga-asentamiento método de Poulos. Adaptada de Poulos (2002).

La carga (P_1) a la que se alcanza la capacidad de carga última del grupo de pilotes se calcula así:

$$P_1 = \frac{P_{UP}}{(1 - X)} \quad (22)$$

Donde:

P_{up} : capacidad de carga última del grupo de pilotes, en KN/m². Se estima como el menor valor entre la suma de la capacidad individual de los pilotes, y la capacidad del bloque de pilotes.

Hasta el momento, se han detallado algunas teorías simplificadas que intentan dar respuesta al problema de los sistemas losa – pilotes. A continuación, se mencionarán los métodos numéricos, como alternativa para el análisis de la interacción.

MÉTODOS NUMÉRICOS

De acuerdo con Potts y Zdravkovic (1999), los métodos numéricos generan resultados más realistas que las simplificaciones analíticas. Para Wood (2004), los métodos numéricos son útiles en aquellos casos complejos que no pueden idealizarse mediante soluciones analíticas.

Los métodos numéricos, según Potts (2003), pueden simular el comportamiento real del suelo, dependiendo el modelo constitutivo que se emplee para el análisis, y las condiciones de fronteras que se definan. Tal vez, la ventaja principal de los métodos numéricos es la capacidad del modelo de predecir el mecanismo de falla del sistema.

Anandarajah (2010) define el modelo constitutivo como la forma de expresar, matemáticamente, el comportamiento del material idealizado. Estas idealizaciones pueden ser: lineales elásticas, no lineales elásticas, elasto-plásticas, entre otras. Adicionalmente, el modelo constitutivo incluye el criterio de falla del material, el cual puede ser: Von Mises, Tresca, Mohr – Coulomb, entre otros. El comportamiento real del material no encajará de manera perfecta con ningún modelo, por lo tanto, se debe elegir aquel que lo represente mejor.

Los modelos constitutivos son numerosos, por lo tanto, se deben analizar las ventajas y desventajas de cada uno de ellos. Para elegir el modelo constitutivo, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos: tipo de material, criterio de falla, parámetros requeridos, tipo de análisis (dinámico, estático, consolidación, flujo), entre otros.

Dentro de los modelos constitutivos se encuentra el Cam Clay modificado, el cual relaciona compresibilidad, esfuerzos, deformaciones volumétricas y por corte, y presiones de poros del material (Roscoe & Schofield, 1963). Este modelo emplea la superficie de fluencia modificada propuesta por Burland (1965), la cual estima mejor el comportamiento de las arcillas saturadas, en comparación con la superficie

original. Por otro lado, permite el análisis tridimensional, calcula la deformación y determina la falla usando el criterio de Mohr – Coulomb (Roscoe & Burland, 1968).

Aquellos modelos que predicen mejor el comportamiento generalmente son más robustos, y requieren un mayor número de parámetros de entrada. Por ejemplo, el propuesto por Yu (1998), el cual es una extensión del modelo Cam Clay, permite simular arenas y arcillas en condiciones drenadas y no drenadas. El uso de esta relación constitutiva requiere de dos parámetros de entrada adicionales. Por lo tanto, es necesario definir el nivel de detalle requerido en el análisis del proyecto, y buscar el equilibrio técnico-económico. Un mayor número de parámetros implica una exploración más costosa, la cual debe ser justificada.

De acuerdo con lo anterior, el modelo Cam Clay modificado puede estimar deformaciones, volumétricas y por corte, en depósitos arcillosos normalmente consolidados y ligeramente sobreconsolidados. Por lo tanto, es posible emplearlo para los suelos de la ciudad de Montería. Adicionalmente, el modelo cumple con lo requerido para este trabajo.

DISEÑO METODOLÓGICO

Para este proyecto se realizó el análisis a partir de la medición y comprobación de resultados numéricos, es decir, se llevó a cabo desde una perspectiva objetiva.

El objetivo general de este trabajo se alcanzó a través de cuatro objetivos específicos. El primero de ellos permitió conocer las cargas, propiedades de los suelos, geometría de la cimentación, y asentamientos medidos durante el proceso constructivo. Estos factores condicionan el comportamiento de la edificación. Esta información se obtuvo a partir de los informes de diseño de las diferentes disciplinas.

Para el segundo objetivo específico se empleó el software de modelación geotécnica Gts Nx Midas, licenciado para la universidad Eafit. Se utilizó con el fin de calibrar los parámetros geotécnicos, para esto se tuvo en cuenta la secuencia constructiva, las cargas, y los asentamientos medidos durante la construcción.

Posteriormente, se calcularon los asentamientos haciendo uso de las teorías simplificadas de Terzaghi y Peck (1967), Tamez González (2001) y Poulos (2002) Para esto se emplearon los parámetros geotécnicos calibrados obtenidos con Gts Nx Midas

Finalmente, con el modelo de elementos finitos, se estimaron los asentamientos a 20 años. Estos se compararon con los calculados mediante las técnicas simplificadas, para establecer la congruencia o discrepancia entre los resultados.

DESARROLLO DEL TRABAJO

RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

El proyecto en estudio consiste en una edificación de 24 niveles construida en la ciudad de Montería, capital del departamento de Córdoba en Colombia. Montería se encuentra localizada a 8°45'16" de latitud norte y 75°53'11" de longitud oeste, su altura es de 17 m sobre el nivel del mar, mayoritariamente es plana y la recorre el río Sinú. Su clima es cálido, con una humedad relativa y temperatura promedio de 82% y 27.5°C respectivamente, la precipitación media anual es de 1329 mm (Instituto geográfico Agustín Codazzi, s/f). En la figura 7 se puede visualizar la localización del municipio de Montería dentro del departamento y del país.



Figura 7. Localización de la ciudad de Montería dentro del departamento y del país. Tomado de Instituto geográfico Agustín Codazzi (2020).

También, es importante conocer la información geológica del municipio, la cual puede observarse en la figura 8.

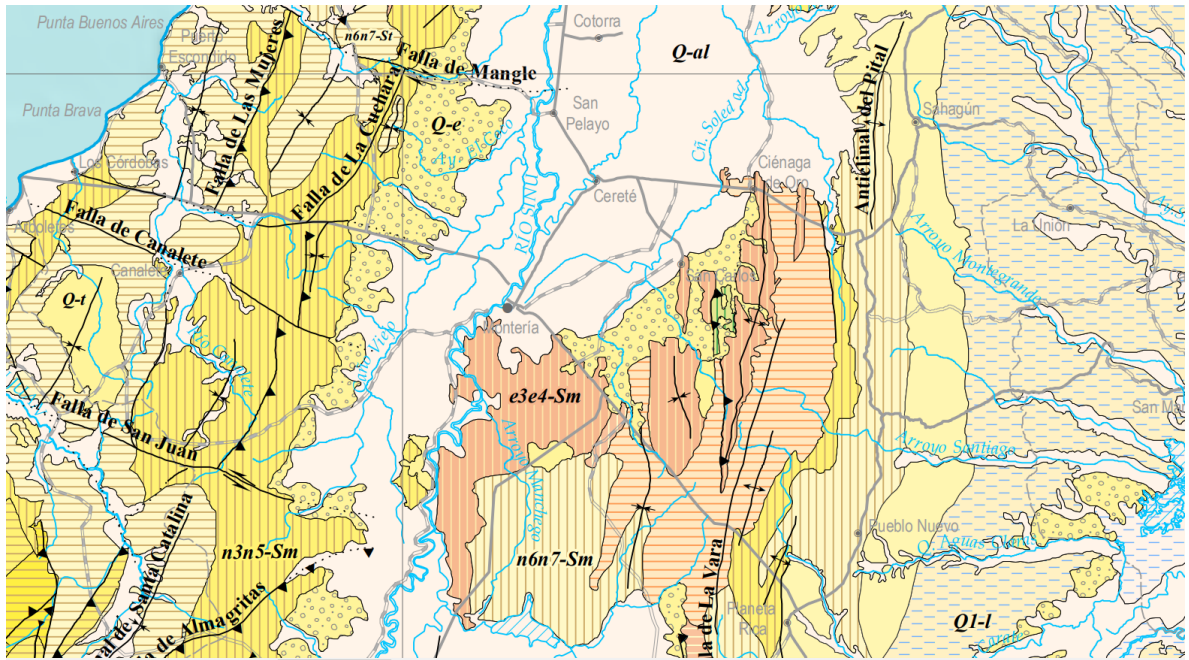


Figura 8. Formación geológica en la ciudad de Montería. Tomado de Servicio Geológico Colombiano (2020).
Nota: Depósitos Q-al en la ciudad de Montería.

Los depósitos Q-al se formaron durante el periodo cuaternario (Q), y su origen es aluvial (al). Para el caso de Córdoba, el Ministerio de minas y energía (2001), define los depósitos aluviales como "unidad constituida por los aluviones, llanuras de inundación y sedimentos de los ríos Sinú, San Jorge, Canalete y algunos de sus tributarios" (p. 87).

De acuerdo con Blyth y De Freitas (2006), los depósitos aluviales incluyen materiales finos como los limos y los lodos; y gruesos como las arenas y las gravas. La fuerza y velocidad de la corriente arrastran y depositan estos materiales. Los suelos de origen aluvial tienen una porosidad alta, esta genera arcillas muy compresibles, por otro lado, los limos, arenas y gravas serán de permeabilidad elevada. En estos depósitos el nivel piezométrico es alto, por lo tanto, se encontrará a poca profundidad desde la superficie. Generalmente, son capas de limos y arcillas, intercaladas con otros materiales. Su distribución cambia rápidamente a lo largo de la llanura del río, por lo que, estos depósitos pueden presentar anisotropía.

Es necesario conocer el origen de la formación, para determinar las técnicas de exploración y muestreo requeridas en un proyecto. Adicionalmente, para inferir los retos a nivel geotécnico que el depósito pueda presentar.

Para el proyecto se recopiló la siguiente información: geometría, propiedades de los suelos, cargas esperadas, asentamientos durante el proceso constructivo.

Geometría

La edificación cuenta con 24 niveles de entrepiso, sin sótanos. La altura entre ejes es de 3.20 metros, mientras que la altura libre es de 2.60 m. La cimentación tiene ancho y longitud variables, el ancho se encuentra comprendido entre 16.40 m y 18.42 m, mientras que la longitud está entre 56.81 m y 59.12 m. El área de la cimentación es de 1124.15 m².

Propiedades de los suelos

El proyecto se encuentra localizado en la ciudad de Montería, donde los depósitos son del tipo llanura aluvial del periodo cuaternario (Q-al). Por lo tanto, se pueden encontrar limos y arcillas, intercalados con arenas y gravas. En la figura 9 se puede observar la localización del proyecto en el municipio.



Figura 9. Localización de la edificación dentro del municipio de Montería. Elaboración propia haciendo uso de la herramienta informática Google Earth. Nota: El polígono en color verde representa la localización de la torre dentro del terreno. El polígono naranja corresponde al lote.

Para el proyecto, de acuerdo con la información contenida en el estudio de suelos, se realizaron 10 sondeos con una profundidad de 30 metros, y 2 sondeos que alcanzaron los 40 metros. Los de 30 metros se distribuyeron en el lote, mientras que los de 40 metros se realizaron en el área de construcción del edificio. Para las muestras se ejecutaron los siguientes ensayos: granulometría, límites de consistencia, contenido de humedad, peso unitario, compresión simple, corte directo y consolidación (Castilla-Negrete, 2015).

La información reportada en este trabajo corresponde a los sondeos realizados para la torre, es decir, aquellos que alcanzaron la profundidad de 40 metros. Estos se nombran sondeos 1 y 2. En la figura 10 se observa su localización.



Figura 10. Localización de los sondeos 1 y 2 dentro del área de la torre. Elaborado en Google Earth, a partir de Castilla-Negrete (2015).

Durante la exploración se registró el número de golpes, N , obtenido en el ensayo de penetración estándar. Para esto se dejó caer la pesa de 140 lb desde una altura de 30", se anotó el número de golpes requerido para hincar 18" el muestreador de cuchara partida en el suelo, en intervalos de 6".

En los sondeos mencionados se encontró que los materiales varían entre arcillas de baja, mediana y alta plasticidad. El nivel piezométrico presentó fluctuaciones entre 0.80 m y 1.50 m medidos desde la superficie.

También se tuvo acceso al informe de prospección sísmica, en él se detallan los resultados del ensayo dispersión de ondas superficiales MASW. Este permite conocer la velocidad de propagación de la onda en el terreno, las propiedades elásticas de los materiales y los espesores de los estratos (Velásquez-Álvarez, 2015).

A partir de la información en el estudio de suelos y del informe de prospección sísmica, se deduce el perfil del suelo en la tabla 1.

Tabla 1. Perfil del suelo deducido.

Profundidad	Clasificación
0.00 m - 4.00 m	CL
4.00 m - 9.00 m	CH1
9.00 m - 14.00 m	CL2
14.00 m - 20.00 m	CL3
20.00 m - 40.00 m	CH2

A partir de la información del estudio de suelos se obtuvo la tabla 2, en ella se detallan las propiedades, físicas y mecánicas, promedio de los estratos.

Tabla 2. Parámetros geotécnicos deducidos.

Profundidad	Clasificación	Peso Unitario (KN/m ³)	N	W	LL	LP	IP	Su (KN/m ²)	C (KN/m ²)	ϕ°	C' (KN/m ²)	ϕ'°	Cc	Cs
0.00 m - 4.00 m	CL	19.40	6.00	30.00	50.00	27.00	23.00	49.10			0.00	23.00	0.373	0.10
4.00 m - 9.00 m	CH1	18.50	19.00	27.00	54.00	27.00	27.00	101.28			0.00	23.00	0.373	0.10
9.00 m - 14.00 m	CL2	18.60	8.00	32.00	63.00	30.00	33.00	56.23			0.00	24.00	0.373	0.10
14.00 m - 20.00 m	CL3	18.30	11.00	31.00	48.00	28.00	20.00	45.09			0.00	24.00	0.373	0.10
20.00 m - 40.00 m	CH2	18.80	29.00	28.00	57.00	29.00	28.00	99.59	42.61	14.90	85.40	17.50	0.177	0.05

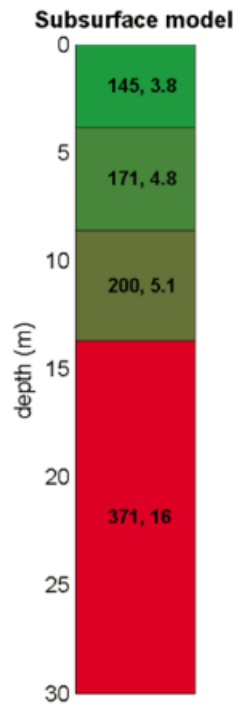
Nota: La resistencia al corte no drenada (Su) se obtuvo mediante el ensayo de compresión simple. Los valores de cohesión y ángulo de fricción interna de 0 a 20 metros se estimaron empleando la metodología de Gonzalez G. (1999). De 20 a 40 metros, C y ϕ a partir de corte directo no drenado, mientras que C' y ϕ' de corte directo drenado. Los parámetros Cc y Cs se tomaron de los ensayos realizados en el área del lote.

La información presentada se amplió con los resultados de la prospección sísmica. En la figura 11 se puede observar la localización de las dos líneas sísmicas realizadas y el área de construcción de la torre.



Figura 11. Localización de las líneas sísmicas del proyecto. Elaboración propia a partir de la información presentada por Velásquez-Álvarez (2015).
Nota: El segmento rojo corresponde a la línea sísmica 1. El segmento azul corresponde a la línea sísmica 2.

Los perfiles de velocidades encontrados, a partir de las líneas sísmicas 1 y 2, se pueden visualizar en las figuras 12 y 13.

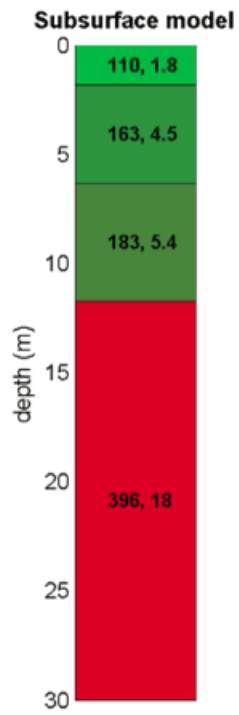


Cálculo del Vs 30

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$

Vs30 = 243 m/s

Figura 12. Perfil de velocidades línea sísmica 1. Tomado de Velásquez-Álvarez (2015).



Cálculo del Vs 30

$$\bar{v}_s = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_{si}}}$$

Vs30 = 250 m/s

Figura 13. Perfil de velocidades línea sísmica 2. Tomado de Velásquez-Álvarez (2015).

Con la prospección sísmica también se pudo obtener la información de la tabla 3. Esta amplía los parámetros conocidos del suelo.

Tabla 3. Parámetros obtenidos a partir del informe de refracción sísmica.

Línea	Espesor (m)	Profundidad (m)	Vs (m/s)	Relación de Poisson (μ)	ρ (g/cm ³)	Peso Unitario (KN/m ³)	G (MPa)	E (MPa)
1	3.80	3.80	145.00	0.40	1.80	17.70	37.85	105.97
	4.80	8.60	171.00	0.35	1.80	17.70	52.63	142.11
	5.10	13.70	200.00	0.35	1.84	18.10	73.60	198.72
	16.30	30.00	371.00	0.35	1.99	19.50	273.91	739.55
2	1.80	1.80	110.00	0.47	1.85	18.10	22.39	65.81
	4.50	6.30	163.00	0.41	1.84	18.10	48.89	137.86
	5.40	11.70	183.00	0.33	1.81	17.80	60.62	161.24
	18.30	30.00	396.00	0.46	2.15	21.10	337.15	984.49

Nota: Adaptado de Velásquez-Álvarez (2015).

En la tabla 4 se presentan los valores seleccionados para complementar la información del perfil deducido.

Tabla 4. Parámetros complementarios para el perfil deducido.

Profundidad	Clasificación	μ	G (MPa)	E (MPa)
0.00 m - 4.00 m	CL	0.40	37.85	105.98
4.00 m - 9.00 m	CH1	0.35	50.76	137.052
9.00 m - 14.00 m	CL2	0.35	60.62	163.674
14.00 m - 20.00 m	CL3	0.35	273.91	739.557
20.00 m - 40.00 m	CH2	0.35	273.91	739.557

Nota: Estos valores amplían la información de la tabla 2.

De acuerdo con las recomendaciones del estudio de suelos, las cargas se transmiten al terreno mediante un sistema losa – pilotes. Estos últimos son hincados y su sección es cuadrada con 0.40 m de lado. La longitud de los pilotes se definió

inicialmente en 14.00 m (Castilla-Negrete, 2014b), sin embargo, luego de cambios en las cargas, tuvo que modificarse a 28.00 m. La profundidad de desplante de la edificación es de 0.80 m con relación al nivel de superficie (Castilla-Negrete, 2015).

Cargas esperadas

Durante la etapa inicial del proceso de diseño se definió la carga total en 180000 KN. Sin embargo, luego de un nuevo análisis estructural, se estableció la magnitud real en 270000 KN. Esto obligó a recalcular los asentamientos esperados, encontrando que los pilotes de 14.00 metros no satisfacían la condición de servicio Castilla Negrete (2014a). Por lo tanto, fue necesario incrementar la longitud de los pilotes a 28.00 metros.

Como se mencionó, la carga de la edificación cambió durante su proceso de diseño. Sin embargo, se pudo conocer el porcentaje de carga para cada uno de los dados de cimentación (Carvajal-Monsalve & Farbiarz-Farbiarz, 2015b). En la tabla 5 se muestran estos valores.

Tabla 5. Distribución de carga para cada dado de cimentación.

<u>Elemento</u>	<u>Carga del total</u>
Dado 1	3.26%
Dado 2	3.82%
Dado 3	4.35%
Dado 4	7.39%
Dado 5	3.96%
Dado 6	6.13%
Dado 7	2.44%
Dado 8	4.18%
Dado 9	4.26%
Dado 10	3.05%
Dado 11	4.06%
Dado 12	8.82%
Dado 13	1.81%
Dado 14	3.69%
Dado 15	3.92%
Dado 16	4.89%
Dado 17	5.55%
Dado 18	5.73%
Dado 19	4.71%
Dado 20	5.77%
Dado 21	8.21%

Adicionalmente, se conoció la distribución de los pilotes en la losa, de acuerdo con los planos de cimentación. Se hincaron 455 pilotes, distribuidos así: 84 pilotes de 14.00 metros, y 371 con 28.00 metros de longitud. La diferencia de longitudes se debe a que la hinca de pilotes inició antes de detectar la magnitud real de la carga total. Por lo tanto, luego de la evaluación, los pilotes perimetrales permanecieron de 14.00 metros, mientras que hacia el centro de la cimentación se sobrehincaron para completar 28.00 metros. En la figura 14 se observa el área en planta de la torre y la distribución de los pilotes. Aquellos encerrados en la polilínea verde son los de 28.00 metros, los contenidos entre la polilínea azul y la verde son los de 14.00 metros.

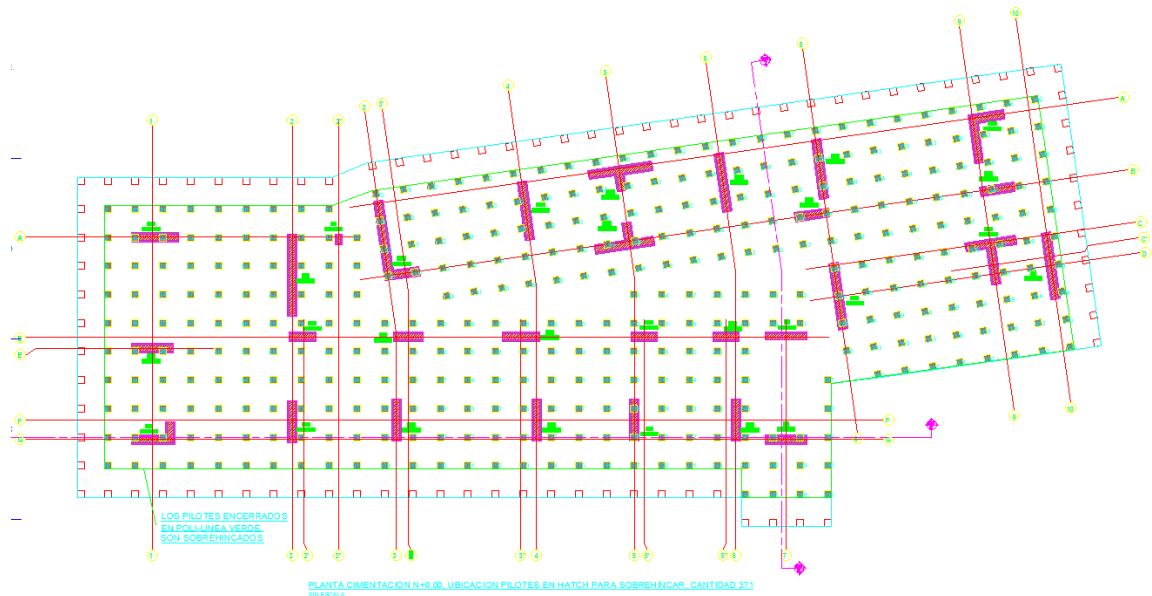


Figura 14. Área en planta de la cimentación y distribución de los pilotes. Tomado de Carvajal-Monsalve y Farbiarz-Farbiarz (2015a).

En los planos de cimentación también se evidenció la distribución de los dados, tal como se muestra en la figura 15.

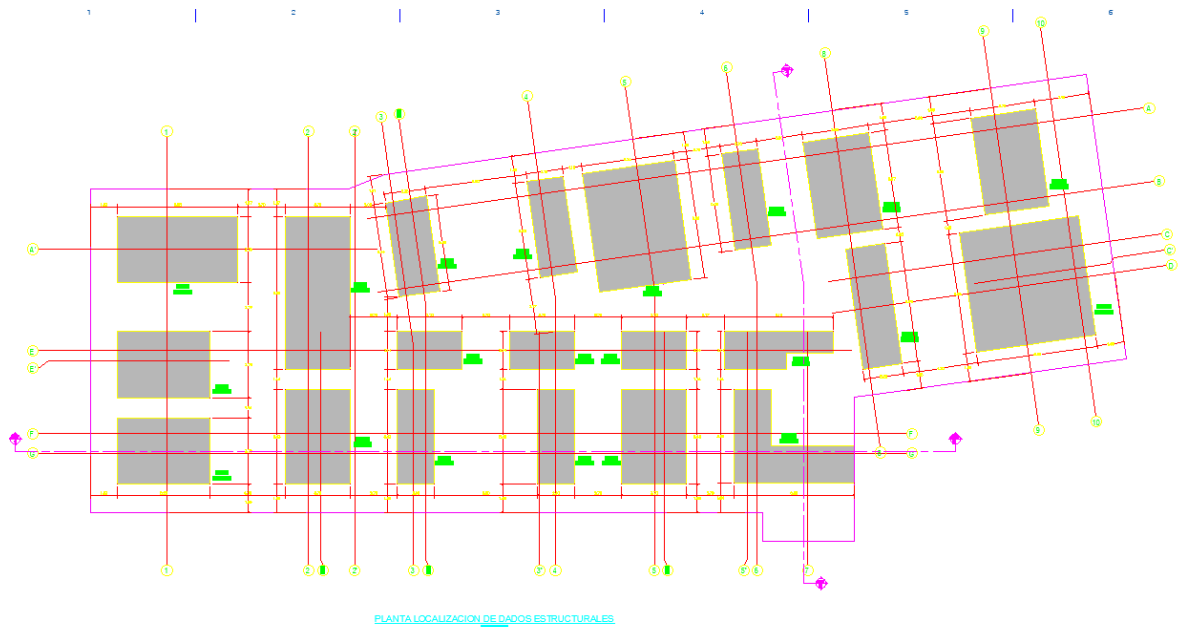


Figura 15. Distribución de los dados en la losa de cimentación. Tomado de Carvajal-Monsalve y Farbiarz-Farbiarz (2015a).

Nota: El color magenta representa el perímetro de la losa. El color amarillo representa el perímetro de los dados.

De acuerdo con los planos de cimentación, el sistema consiste en una losa aligerada. Cuenta con vigas y dados, unidos a una losa maciza de fondo. En la figura 16 se observan las vigas de cimentación, los dados y los espacios correspondientes al aligeramiento.

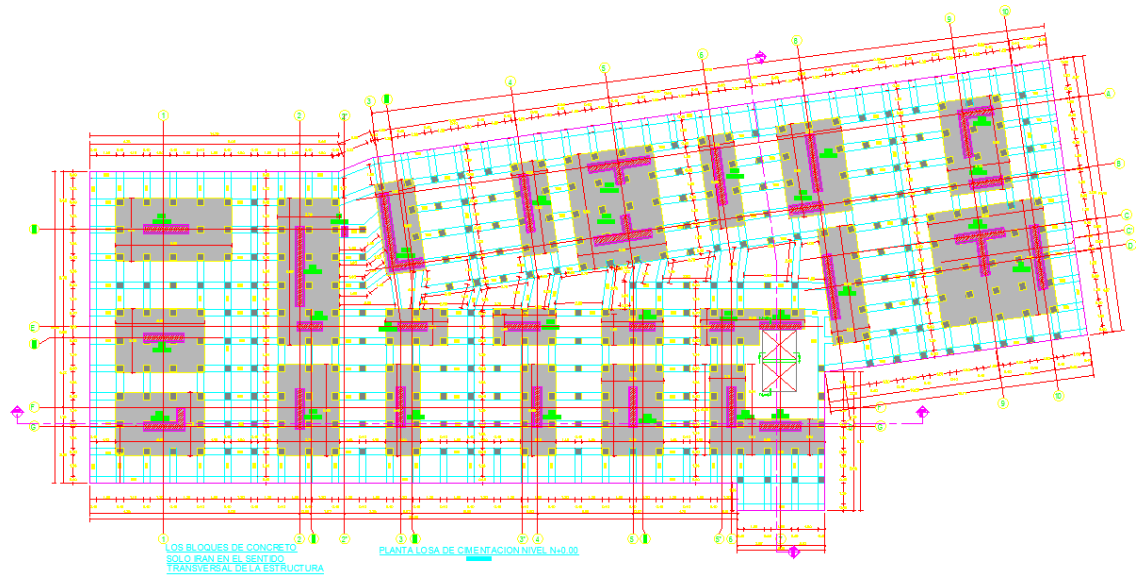


Figura 16. Localización de dados, vigas y aligeramiento en la losa de cimentación. Tomado de Carvajal-Monsalve y Farbiarz-Farbiarz (2015a).

Nota: El color cian representa la distribución de las vigas de cimentación.

Como se mencionó antes, la losa es aligerada e incluye una loseta de fondo con espesor de 0.30 m. La altura de los dados y vigas es de 1.20 m, a partir del nivel superior de la loseta. En las figuras 17 y 18 se puede observar el detalle de la cimentación.

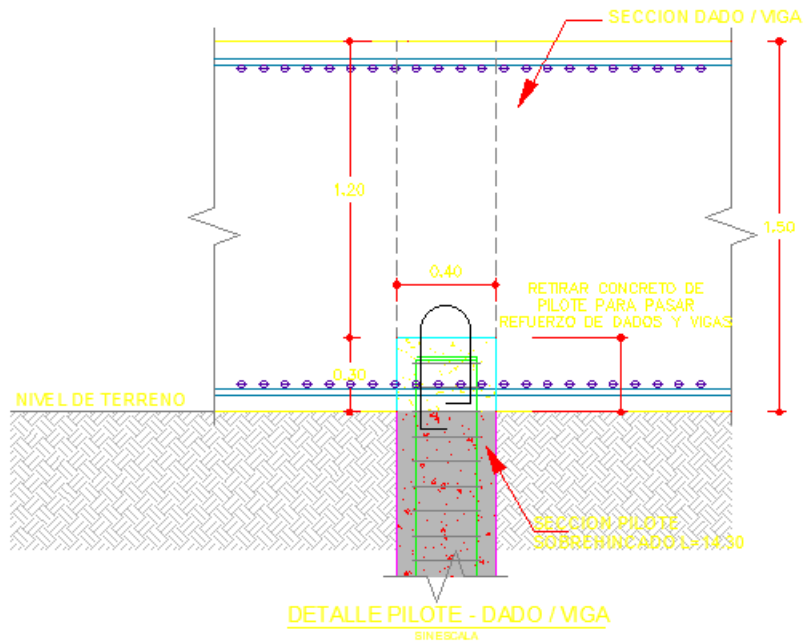


Figura 17. Detalle dado de cimentación. Tomado de Carvajal-Monsalve y Farbiarz-Farbiarz (2015a).

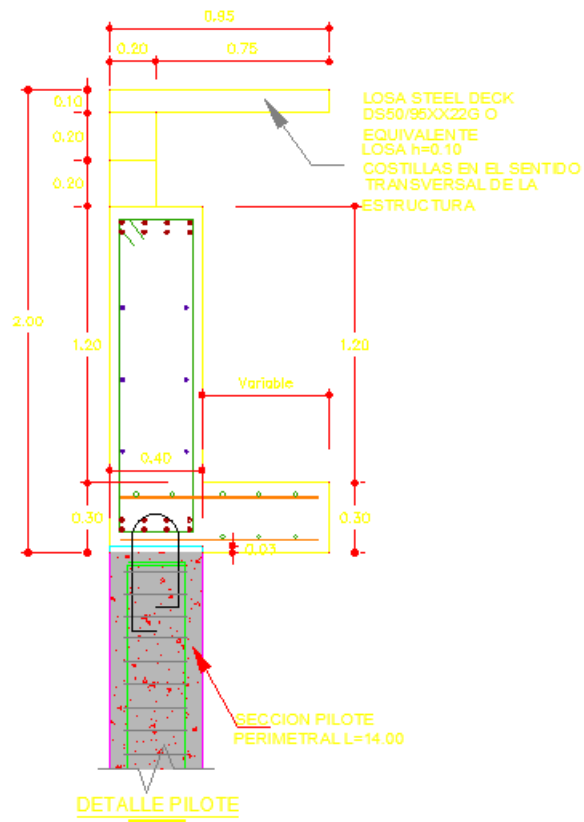


Figura 18. Detalle perimetral losa de cimentación. Tomado de Carvajal-Monsalve y Farbiarz-Farbiarz (2015a).

Asentamientos

Durante el proceso constructivo de la edificación se realizó la lectura de los asentamientos, haciendo uso de equipos como el nivel topográfico. Para el registro de estos datos se estableció el nivel de referencia para el proyecto, este se marcó en una de las columnas de la edificación. Posteriormente, durante el avance del proceso constructivo, se medía la variación del nivel en la columna con relación a la lectura base.

El proceso constructivo de la edificación inició en el año 2014 con la hincada de pilotes de 14.00 metros. Posteriormente, se realiza la sobrehincada para alcanzar 28.00 metros de longitud en aquellos elementos que lo requerían. La construcción de la losa de cimentación comienza en septiembre del año 2015 y se extiende durante poco más de un mes. La lectura base o lectura 1, para el control de asentamientos, se tomó al finalizar la construcción de las columnas del nivel 1.

En la tabla 6 se presentan las lecturas realizadas para el control de asentamientos.

Tabla 6. Cotas en la columna central.

Lectura de cotas	Fecha	Cotas
1	14/11/2015	16.709
2	28/11/2015	16.703
3	12/12/2015	16.697
4	28/12/2015	16.695
5	16/01/2016	16.694

Nota: Las lecturas corresponden a la columna central de la edificación. Los asentamientos son el resultado de la diferencia entre las lecturas y la lectura 1.

Como se mencionó anteriormente, el control de asentamientos se realizaba sobre una sola columna de la edificación. Sin embargo, luego de la lectura 5, se tomó un nuevo nivel de referencia, con el fin de incluir todas las columnas de la edificación en el control de asentamientos. En la tabla 7 se puede observar la nueva cota de referencia, 16.324 metros en la lectura 6, y los registros posteriores.

Tabla 7. Cotas en todas las columnas.

Lectura	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Columna/Fecha	1/02/2016	31/03/2016	11/04/2016	2/05/2016	16/05/2016	26/05/2016	8/06/2016	4/06/2016	14/07/2016	27/07/2016	6/08/2016	26/08/2016	10/09/2016	24/09/2016
M1C	16.324	16.322	16.319	16.315	16.311	16.306	16.304	16.304	16.303	16.303	16.300	16.299	16.298	16.298
M1D	16.324	16.322	16.319	16.314	16.308	16.305	16.304	16.304	16.304	16.304	16.301	16.299	16.298	16.298
M2D	16.324	16.322	16.319	16.311	16.306	16.303	16.301	16.301	16.300	16.300	16.296	16.295	16.294	16.294
M2B	16.324	16.322	16.319	16.311	16.304	16.302	16.300	16.300	16.297	16.297	16.295	16.293	16.291	16.291
M3B	16.324	16.322	16.318	16.310	16.305	16.301	16.298	16.296	16.295	16.295	16.292	16.292	16.290	16.290
M3D	16.324	16.322	16.319	16.312	16.306	16.303	16.302	16.300	16.300	16.298	16.294	16.293	16.292	16.292
M4D	16.324	16.322	16.319	16.312	16.304	16.299	16.299	16.299	16.298	16.295	16.295	16.295	16.294	16.293
M4B	16.324	16.322	16.319	16.311	16.303	16.303	16.299	16.299	16.299	16.298	16.297	16.293	16.292	16.292
M5B	16.324	16.322	16.318	16.310	16.306	16.297	16.297	16.297	16.295	16.294	16.290	16.288	16.287	16.287
M5D	16.324	16.322	16.319	16.312	16.310	16.300	16.299	16.299	16.298	16.297	16.294	16.291	16.289	16.288
M6D	16.324	16.322	16.318	16.313	16.307	16.299	16.299	16.299	16.298	16.298	16.295	16.290	16.287	16.287
M6B	16.324	16.322	16.317	16.313	16.305	16.296	16.296	16.296	16.293	16.293	16.290	16.286	16.284	16.284
MB	16.324	16.321	16.317	16.309	16.303	16.295	16.295	16.295	16.293	16.293	16.290	16.287	16.286	16.286
M9	16.324	16.326	16.321	16.315	16.311	16.304	16.304	16.304	16.303	16.302	16.302	16.297	16.296	16.296
M8B'	16.324	16.326	16.321	16.315	16.312	16.303	16.303	16.303	16.302	16.301	16.298	16.298	16.297	16.297
M8A'	16.324	16.326	16.319	16.315	16.312	16.304	16.304	16.304	16.303	16.303	16.298	16.298	16.297	16.297
M7A'	16.324	16.322	16.317	16.313	16.308	16.310	16.305	16.302	16.299	16.299	16.295	16.292	16.290	16.289
M7B'	16.324	16.322	16.317	16.310	16.305	16.307	16.303	16.298	16.296	16.295	16.293	16.291	16.290	16.290
M5'A'	16.324	16.322	16.317	16.310	16.305	16.297	16.297	16.295	16.296	16.294	16.293	16.290	16.289	16.289
M4'B'	16.324	16.322	16.317	16.311	16.305	16.297	16.297	16.294	16.294	16.294	16.291	16.287	16.286	16.286
MD	16.324	16.322	16.317	16.313	16.306	16.299	16.299	16.298	16.298	16.297	16.295	16.293	16.292	16.292
M7D	16.324	16.322	16.317	16.311	16.306	16.298	16.298	16.298	16.296	16.295	16.293	16.291	16.291	16.291
M4'A'	16.324	16.322	16.315	16.308	16.304	16.297	16.297	16.295	16.293	16.292	16.288	16.286	16.285	16.285
M3'A'	16.324	16.322	16.318	16.312	16.305	16.297	16.297	16.295	16.294	16.294	16.294	16.290	16.290	16.290
M2'B'	16.324	16.322	16.317	16.310	16.304	16.296	16.296	16.296	16.295	16.295	16.294	16.290	16.290	16.290
CA	16.324	16.322	16.319	16.311	16.306	16.298	16.298	16.298	16.297	16.297	16.294	16.292	16.291	16.291
M2A	16.324	16.322	16.319	16.311	16.304	16.301	16.301	16.300	16.298	16.298	16.295	16.293	16.292	16.292
M1A	16.324	16.322	16.319	16.314	16.308	16.305	16.304	16.304	16.303	16.303	16.300	16.299	16.298	16.298
M8C'	16.324	16.322	16.319	16.313	16.310	16.302	16.301	16.301	16.299	16.299	16.295	16.295	16.294	16.294

A partir de la geometría de la losa, condiciones geotécnicas, cargas y asentamientos, es posible calibrar los parámetros geotécnicos. Para la calibración se empleó el software Gts Nx Midas.

CALIBRACIÓN DEL MODELO TRIDIMENSIONAL DEL CONJUNTO LOSA – SUELO – PILOTES

El modelo geotécnico se calibró tomando como base la información presentada. Para el proceso se empleó el software Gts Nx Midas, el cual, mediante modelaciones numéricas, predice el comportamiento del conjunto por etapas constructivas.

La geometría de la losa se definió a partir de la información en las figuras 15 a 18. La distribución y longitud de pilotes se tomó de acuerdo con la figura 14. La profundidad y espesor de los materiales se relacionó en la tabla 1. La definición de las propiedades de los materiales, antes de la calibración, se realizó de acuerdo con la tabla 8.

Tabla 8. Parámetros empleados en la calibración inicial.

Profundidad	Material	Clasificación	Peso Unitario (KN/m ³)	Relación de Poisson (μ)	M	e_o	λ	κ	Es (KPa)	G (KPa)	G/Su
Losa de cimentación	Elástico	Concreto	24.00	0.15	-	-	-	-	17800000	7739130.4	-
Pilotes	Elástico	Concreto	24.00	0.15	-	-	-	-	21000000	9130434.8	-
0.00 m - 4.00 m	Cam Clay Modificado	CL	19.40	0.40	0.6684	0.81	0.162	0.0434	21196	7570	154.18
4.00 m - 9.00 m	Cam Clay Modificado	CH1	18.50	0.35	0.6684	0.73	0.162	0.0434	27410	10152	100.24
9.00 m - 14.00 m	Cam Clay Modificado	CL2	18.60	0.35	0.6684	0.86	0.162	0.0434	32735	12124	215.61
14.00 m - 20.00 m	Cam Clay Modificado	CL3	18.30	0.35	0.6684	0.84	0.162	0.0434	147911	54782	1214.95
20.00 m - 40.00 m	Cam Clay Modificado	CH2	18.80	0.35	0.6684	0.76	0.0769	0.0217	147911	54782	550.08

Nota: $M = 6\sin(\varphi')/(3-\sin(\varphi'))$; φ' : ángulo de fricción interna efectivo. $e_o = WG_s$; W: humedad del material; G_s : gravedad específica de los sólidos. La relación de Poisson del concreto se tomó de la literatura.

Para los materiales bajo la edificación no se ejecutaron pruebas de consolidación, por lo tanto, se emplearon los parámetros de deformación de muestras extraídas en el área del lote. Sin embargo, debido a la diferencia entre los materiales, estos valores no representan el comportamiento del suelo bajo la edificación. Teniendo en cuenta lo anterior, se utilizan correlaciones para estimar el índice de compresibilidad (C_c). En la tabla 9 se presentan las formulaciones empleadas y los resultados.

Tabla 9. Correlaciones empleadas para calcular el índice de compresibilidad.

Fuente	Terzaghi y Peck (1967)	Skempton y Jones (1944)	Cozzolino (1961)	Koppula (1981)	Cozzolino (1961)	Helenelund (1953)
Profundidad/Correlación	0.009(LI-10)	0.007(LI-10)	$0.256+0.43(e_o-0.84)$	0.01W	0.0046(LI -9)	$0.85(W)^{3/2}$
0.00 m - 4.00 m	0.36000	0.28000	0.24310	0.30000	0.18860	0.13967
4.00 m - 9.00 m	0.39600	0.30800	0.20827	0.27000	0.20700	0.11925
9.00 m - 14.00 m	0.47700	0.37100	0.26632	0.32000	0.24840	0.15387
14.00 m - 20.00 m	0.34200	0.26600	0.25471	0.31000	0.17940	0.14671
20.00 m - 40.00 m	0.42300	0.32900	0.21988	0.28000	0.22080	0.12594

Nota: LL: límite líquido; e_o : relación de vacíos inicial. W: humedad del material.

A partir del índice de compresión (C_c) se calcula el índice de recompresión (C_s), posteriormente se obtienen lambda (λ) y kappa (κ). Estos son utilizados en el modelo Cam Clay modificado.

Como resultado de la calibración, se concluye que los índices calculados mediante la correlación de Heleneund, representan el comportamiento del sistema. Los índices, producto de la calibración, incluyen el efecto de compresión en el suelo a causa del alto número de pilotes y las cargas aplicadas hasta el momento. De acuerdo con lo anterior, el índice de compresión de laboratorio puede ser mayor al obtenido con la calibración. En la tabla 10 se presentan los parámetros geotécnicos calibrados.

Tabla 10. Parámetros geotécnicos calibrados.

Profundidad	Material	Clasificación	Peso Unitario (KN/m ³)	Relación de Poisson (μ)	M	e_o	λ	κ	Es (KPa)	G (KPa)	G/Su
Losa de cimentación	Elástico	Concreto	24.00	0.15	-	-	-	-	17800000	7739130.4	-
Pilotes	Elástico	Concreto	24.00	0.15	-	-	-	-	21000000	9130434.8	-
0.00 m - 4.00 m	Cam Clay Modificado	CL	19.40	0.40	0.6684	0.81	0.0606	0.0061	21196	7570	154.18
4.00 m - 9.00 m	Cam Clay Modificado	CH1	18.50	0.35	0.6684	0.73	0.0518	0.0052	27410	10152	100.24
9.00 m - 14.00 m	Cam Clay Modificado	CL2	18.60	0.35	0.6684	0.86	0.0668	0.0067	32735	12124	215.61
14.00 m - 20.00 m	Cam Clay Modificado	CL3	18.30	0.35	0.6684	0.84	0.0637	0.0064	147911	54782	1214.95
20.00 m - 40.00 m	Cam Clay Modificado	CH2	18.80	0.35	0.6684	0.76	0.0547	0.0055	147911	54782	550.08

Durante el proceso de calibración, se modificaron parámetros como la relación de Poisson, la pendiente de la línea de estado crítico (M), los módulos del material (E y G), y lambda y kappa. Sin embargo, se encontró que el modelo solamente era sensible a los cambios en lambda y kappa.

En las figuras 19 y 20 se ilustran el modelo tridimensional del sistema y la geometría de la losa, empleados para el análisis.

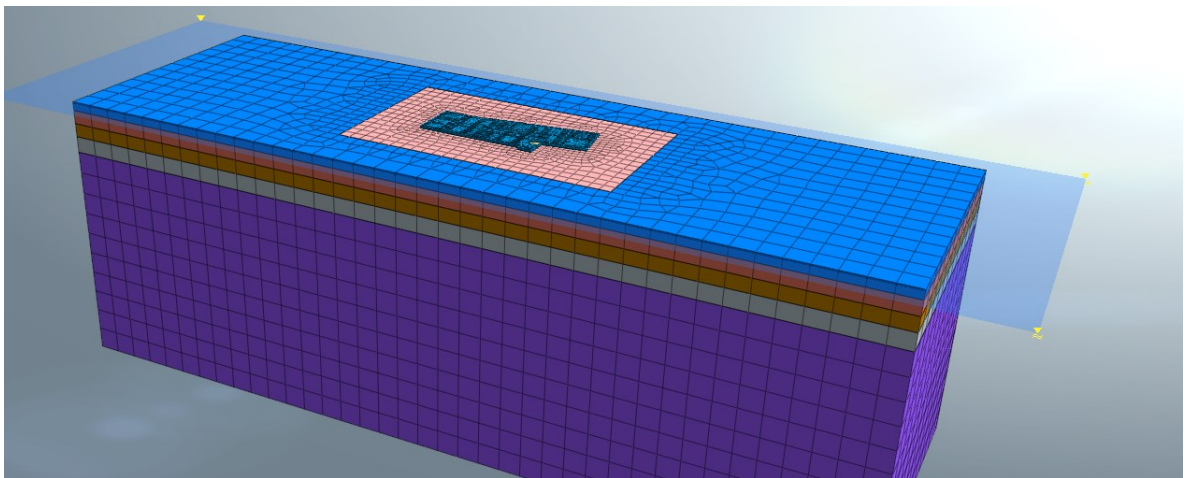


Figura 19. Modelo tridimensional en Gts Nx Midas. Elaboración propia haciendo uso del software Gts Nx Midas.

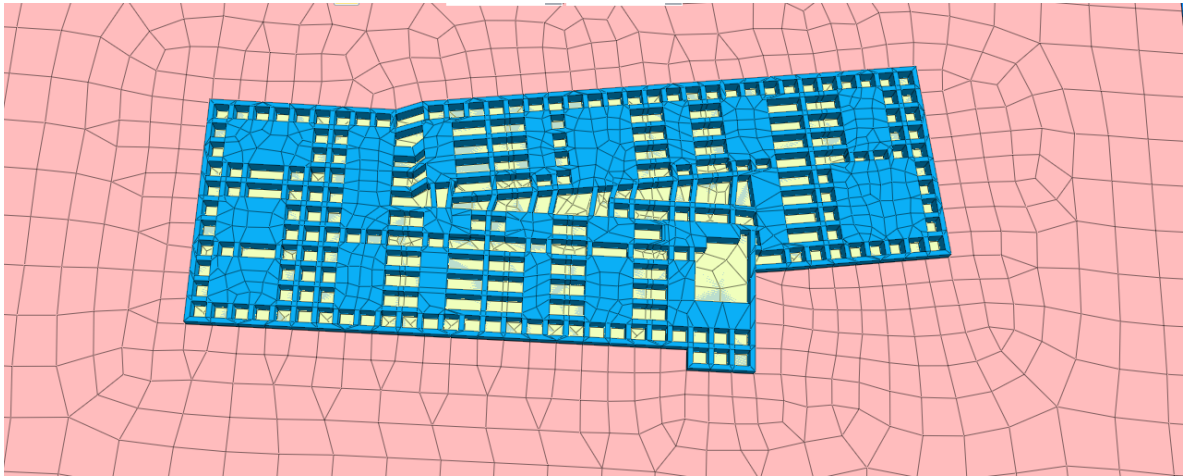


Figura 20. Vista superior losa generada en Gts Nx Midas. Elaboración propia haciendo uso del software Gts Nx Midas.

La calibración del modelo se evidencia en las gráficas de asentamientos, generadas para cada uno de los dados del sistema. A continuación, en las figuras 21 a 28 se ilustran los resultados de un dado por cada eje de la edificación. En las figuras se observa la deformación en el eje de las ordenadas y la lectura de topografía en el eje de las abscisas.

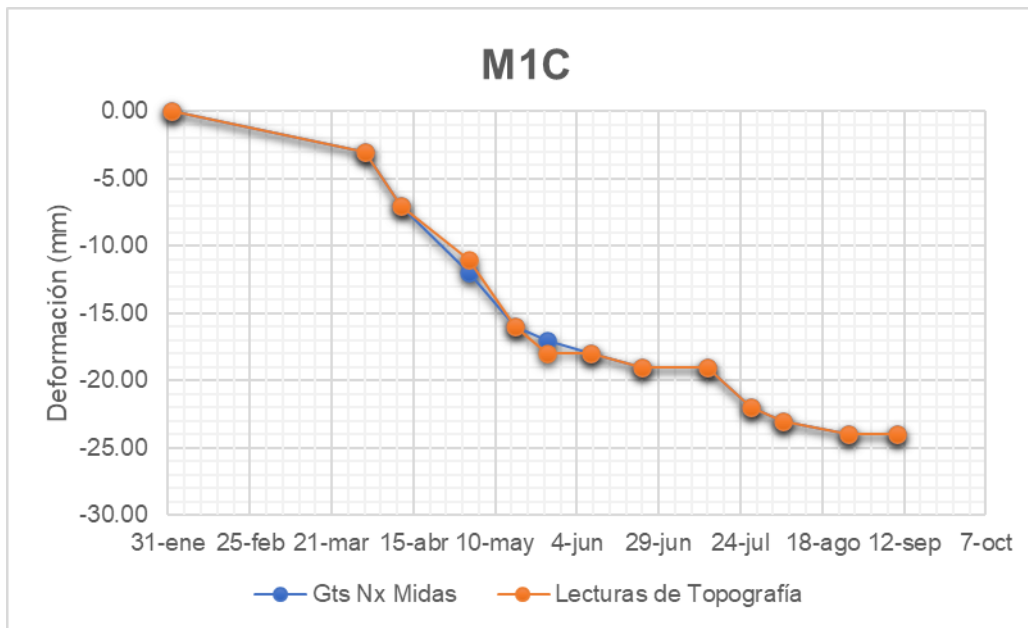


Figura 21. Asentamientos modelados vs reales dado M1C.

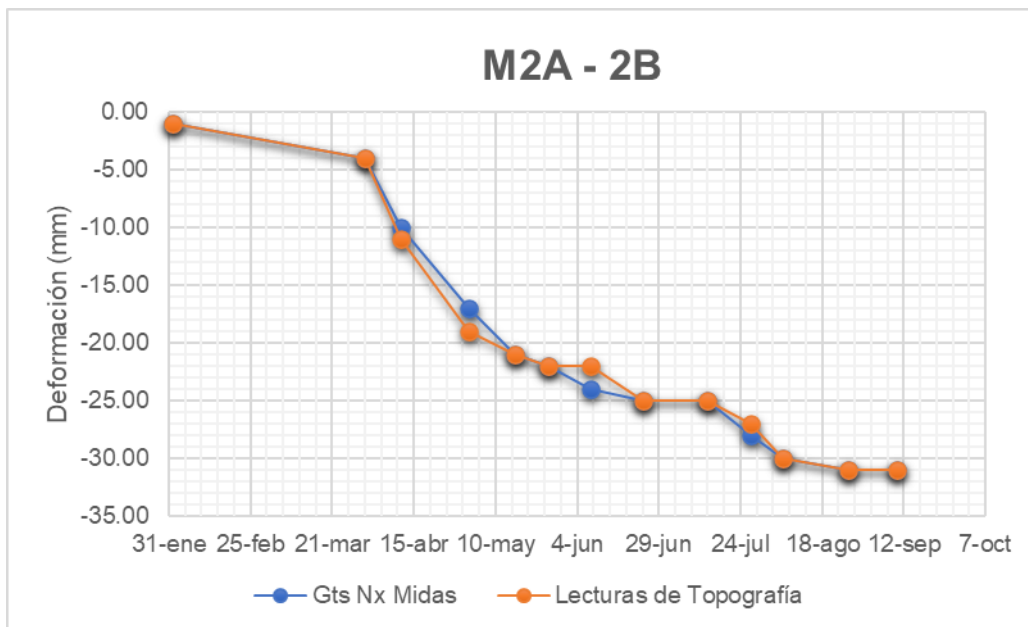


Figura 22. Asentamientos modelados vs reales dado M2A - 2B.

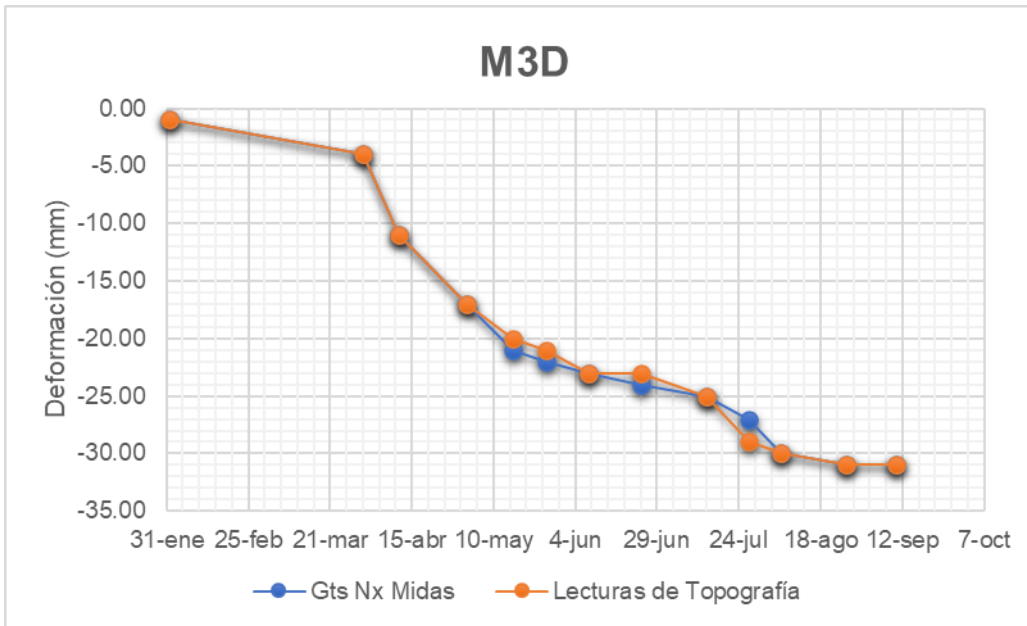


Figura 23. Asentamientos modelados vs reales dado M3D.

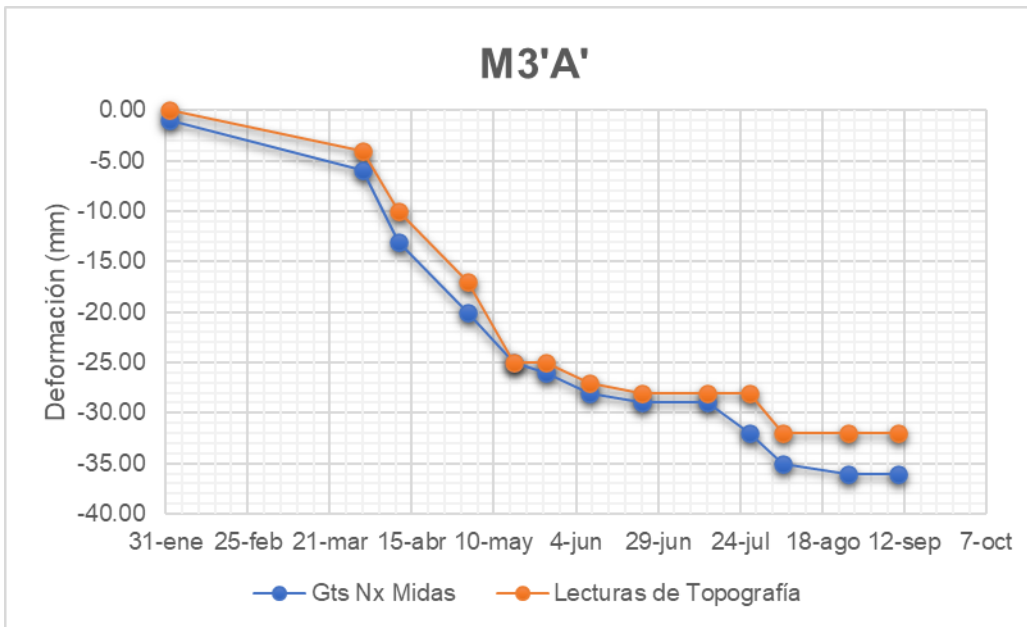


Figura 24. Asentamientos modelados vs reales dado M3'A'.

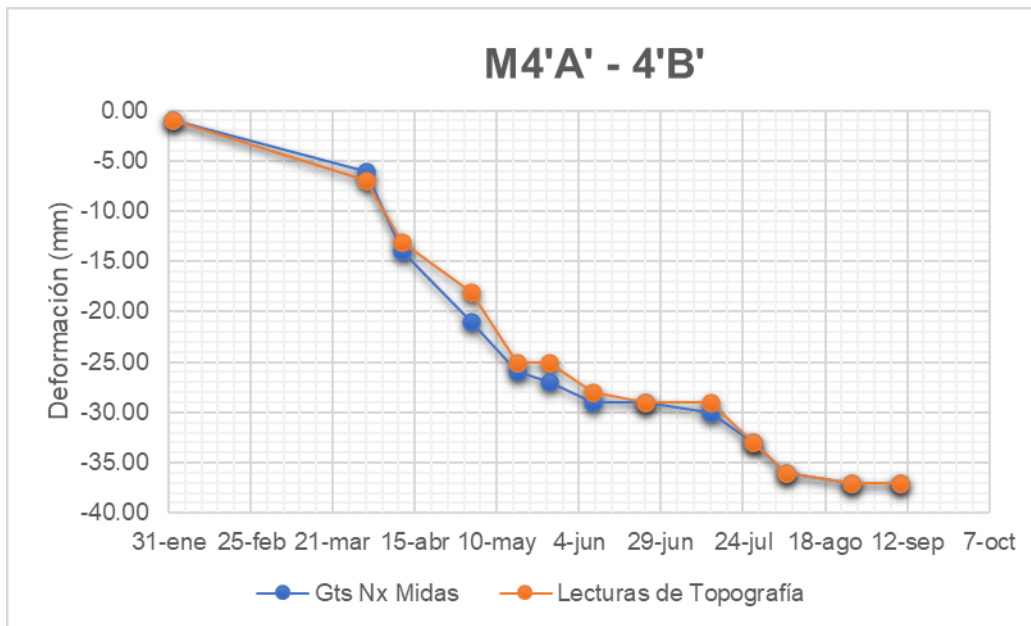


Figura 25. Asentamientos modelados vs reales dado M4'A' - 4'B'.

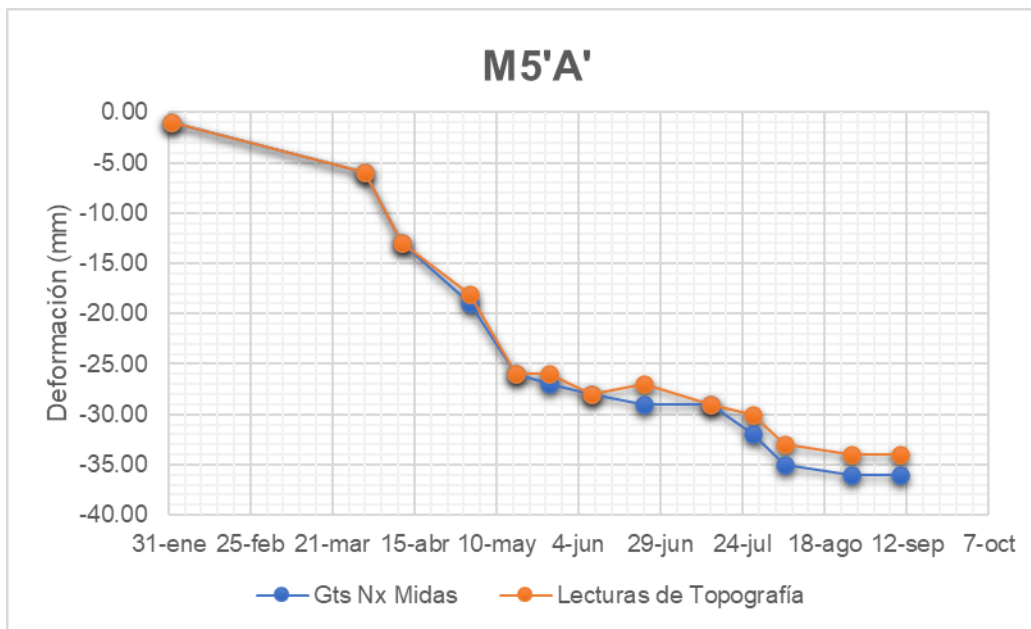


Figura 26. Asentamientos modelados vs reales dado M5'A'.

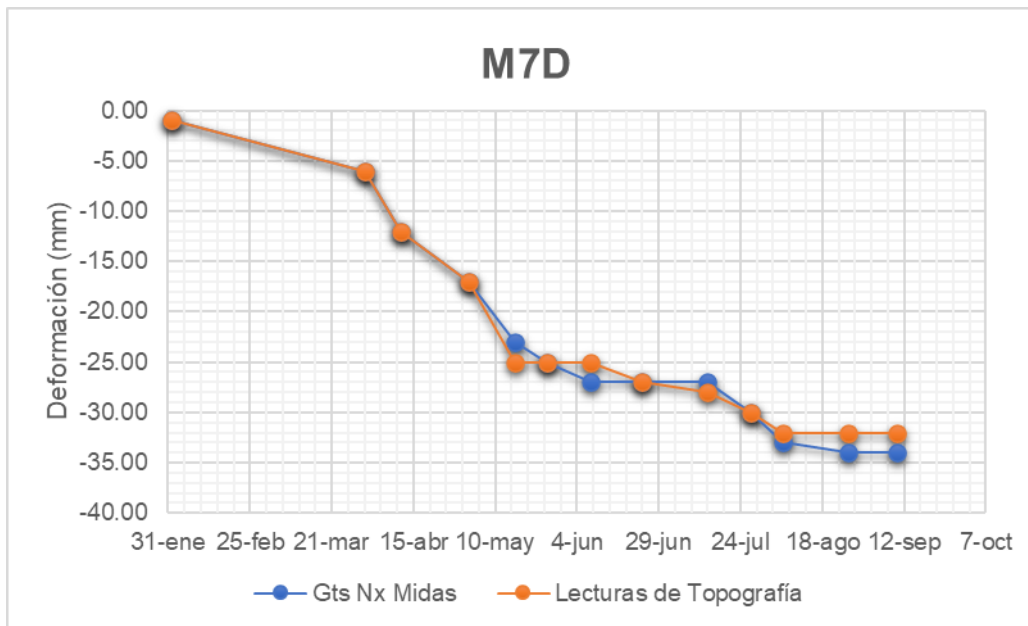


Figura 27. Asentamientos modelados vs reales dado M7D.

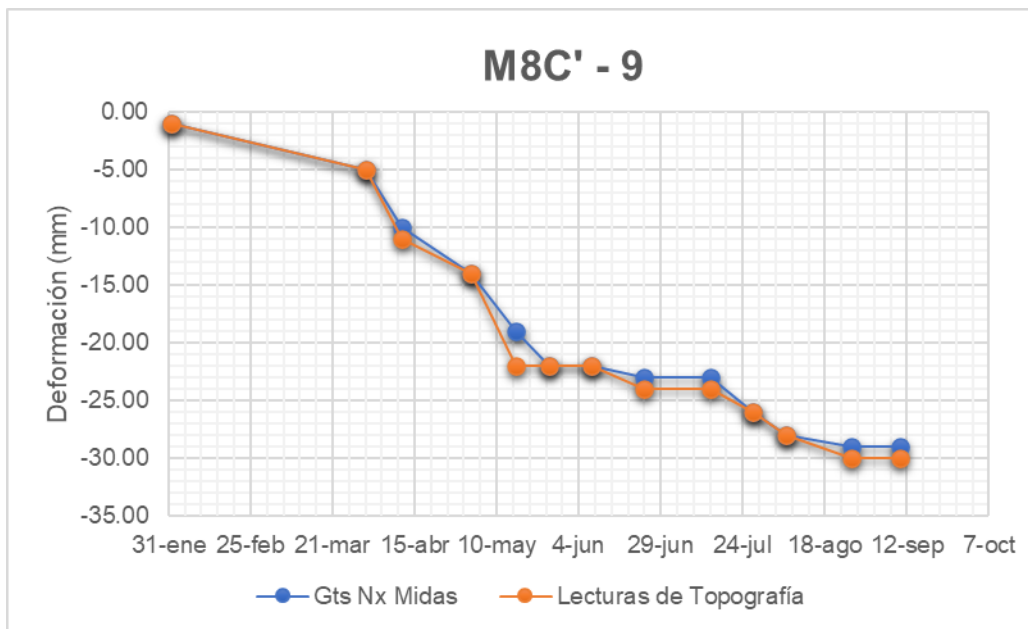


Figura 28. Asentamientos modelados vs reales dado M8C' - 9.

En las figuras 21 a 28 se evidenció la convergencia entre los asentamientos, medidos y simulados, por lo tanto, los parámetros geotécnicos se encuentran calibrados. La calibración se realizó a partir de la secuencia constructiva del proyecto, la cual el autor pudo conocer por pertenecer al equipo constructor. En el anexo se presentan los resultados de todas las columnas de la edificación.

Los parámetros, producto de la calibración, se emplearon en las metodologías simplificadas de diseño.

RESULTADOS

Los parámetros de deformación de los materiales se toman de la tabla 10. Estos provienen de la calibración del sistema y se emplean en las metodologías simplificadas de diseño.

GRUPO DE PILOTES

Para este análisis se calcula la capacidad de carga de los pilotes individuales, así como de la losa para posteriormente determinar el valor de carga última que soportará el conjunto la cual será el mayor entre la suma de las capacidades de carga individuales del número de pilotes contemplados en el análisis y la obtenida mediante el cálculo de la capacidad de un bloque de suelo reforzado con perímetro igual al generado por los pilotes de borde de la cimentación.

En la tabla 11 se evidencian los cálculos para la capacidad de carga última de los pilotes individuales, en condiciones no drenadas por ser materiales arcillosos saturados.

Tabla 11. Capacidad de carga última de los pilotes individuales.

Cota (m)	γ_{sat} (KN/m ³)	σ' (KN/m ²)	S_u (KN/m ²)	S_u/σ'	α	q_{si} (KN/m ²)	Q_{si} (KN)	Q_{su} (KN)
1.00	19.40	0.00	49.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2.00	19.40	9.40	49.10	5.22	0.24	11.78	18.85	18.85
3.00	19.40	18.80	49.10	2.61	0.32	15.71	25.14	43.99
4.00	19.40	28.20	49.10	1.74	0.39	19.15	30.64	74.63
5.00	18.50	36.70	101.20	2.76	0.32	32.38	51.81	126.44
6.00	18.50	45.20	101.20	2.24	0.35	35.42	56.67	183.11
7.00	18.50	53.70	101.20	1.88	0.38	38.46	61.54	244.65
8.00	18.50	62.20	101.20	1.63	0.40	40.48	64.77	309.42
9.00	18.50	70.70	101.20	1.43	0.43	43.52	69.63	379.05
10.00	18.60	79.30	56.20	0.71	0.58	32.60	52.16	431.21
11.00	18.60	87.90	56.20	0.64	0.61	34.28	54.85	486.06
12.00	18.60	96.50	56.20	0.58	0.64	35.97	57.55	543.61
13.00	18.60	105.10	56.20	0.53	0.67	37.65	60.24	603.85
14.00	18.60	113.70	56.20	0.49	0.69	38.78	62.05	665.90
15.00	18.30	122.00	45.10	0.37	0.78	35.18	56.29	722.19
16.00	18.30	130.30	45.10	0.35	0.80	36.08	57.73	779.92
17.00	18.30	138.60	45.10	0.33	0.82	36.98	59.17	839.09
18.00	18.30	146.90	45.10	0.31	0.85	38.34	61.34	900.43
19.00	18.30	155.20	45.10	0.29	0.87	39.24	62.78	963.21
20.00	18.30	163.50	45.10	0.28	0.89	40.14	64.22	1027.43
21.00	18.80	172.30	99.60	0.58	0.64	63.74	101.98	1129.41
22.00	18.80	181.10	99.60	0.55	0.65	64.74	103.58	1232.99
23.00	18.80	189.90	99.60	0.52	0.67	66.73	106.77	1339.76
24.00	18.80	198.70	99.60	0.50	0.68	67.73	108.37	1448.13
25.00	18.80	207.50	99.60	0.48	0.70	69.72	111.55	1559.68
26.00	18.80	216.30	99.60	0.46	0.71	70.72	113.15	1672.83
27.00	18.80	225.10	99.60	0.44	0.72	71.71	114.74	1787.57
28.00	18.80	233.90	99.60	0.43	0.73	72.71	116.34	1903.91
29.00	18.80	242.70	99.60	0.41	0.75	74.70	119.52	2023.43

La capacidad de carga última de los pilotes individuales, con 28 metros de longitud, es de 2023.43 KN. Teniendo en cuenta que son 371 pilotes, la suma de la capacidad de carga de los pilotes es 750693 KN.

También, se presentan los resultados para el bloque de suelo, para este se tomó el perímetro conformado por los pilotes de 28.00 metros. Los valores se pueden evidenciar en la tabla 12.

Tabla 12. Capacidad de carga última del bloque de suelo.

Bg (m)	Lg (m)	S (KN/m ²)	q _d (KN/m ²)	Qsub (KN)	Qpub (KN)	Qugb (KN)
16.62	54.92	75.05	99.60	300654	636383	937037

Nota: Qsub: capacidad de carga última del bloque por fricción. Qpub: capacidad de carga última del bloque por punta.

Al comparar los valores de capacidad de carga última, para los pilotes individuales y el bloque de suelo, se determina que la capacidad de carga última del grupo es 750693 KN. Esta es mayor que la carga total de la estructura.

Por otra parte, se calculan los asentamientos, elásticos y por consolidación, para el grupo de pilotes. En la tabla 13 se presentan los asentamientos elásticos para pilotes individuales y en la tabla 14 para el grupo de pilotes.

Tabla 13. Asentamientos elásticos para pilotes individuales.

S _{e1} (m)	S _{e2} (m)	S _{e3} (m)	S _{et} (m)	S _{et} (mm)
0.0047569	0.000233621	0.000336	0.0053266	5.3265847

Nota: S_{e1}: acortamiento del pilote debido a su material. S_{e2}: asentamiento por la carga en la punta. S_{e3}: asentamiento por la carga en el fuste. S_{et}: asentamiento elástico total del pilote.

Tabla 14. Asentamientos elásticos del grupo de pilotes.

Lado (m)	Base Cim. (m)	S_{et} (m)	S_{eg} (mm)
0.40	19.39	0.0053266	37.085808

Nota: S_{eg} : asentamientos elásticos totales del grupo de pilotes.

Los asentamientos por consolidación se calculan empleando las metodologías de Terzaghi y Peck (1967) y Tomlinson (2001). Los resultados se evidencian en las tablas 15 y 16.

Tabla 15. Asentamientos calculados mediante Terzaghi y Peck (1968).

Hi (m)	Hf (m)	Espesor (m)	Incremento Esf. (KN/m ²)	Asentamiento (m)
19.67	20.00	0.33	237.50	0.0100
20.00	22.00	2.00	219.75	0.0050
22.00	24.00	2.00	193.86	0.0042
24.00	26.00	2.00	172.55	0.0036
26.00	28.00	2.00	154.74	0.0032
28.00	30.00	2.00	139.69	0.0027
30.00	32.00	2.00	126.83	0.0024
32.00	34.00	2.00	115.73	0.0022
34.00	36.00	2.00	106.09	0.0018
36.00	38.00	2.00	97.65	0.0017
38.00	40.00	2.00	90.21	0.0015
40.00	42.00	2.00	83.61	0.0014
42.00	44.00	2.00	77.74	0.0011
44.00	46.00	2.00	72.48	0.0010
46.00	48.00	2.00	67.75	0.0009
48.00	50.00	2.00	63.48	0.0009
50.00	52.00	2.00	59.61	0.0008
52.00	54.00	2.00	56.09	0.0007
54.00	56.00	2.00	52.89	0.0007
56.00	58.00	2.00	49.95	0.0006
58.00	60.00	2.00	47.26	0.0006
60.00	62.00	2.00	44.78	0.0005
62.00	64.00	2.00	42.50	0.0005
64.00	66.00	2.00	40.39	0.0005
66.00	68.00	2.00	38.43	0.0003
68.00	70.00	2.00	36.62	0.0003
70.00	72.00	2.00	34.93	0.0003
72.00	74.00	2.00	33.36	0.0003
74.00	76.00	2.00	31.89	0.0003
76.00	78.00	2.00	30.52	0.0002
78.00	80.00	2.00	29.24	0.0002
80.00	82.00	2.00	28.04	0.0002
82.00	84.00	2.00	26.91	0.0002
84.00	86.00	2.00	25.85	0.0002
86.00	88.00	2.00	24.85	0.0002
88.00	90.00	2.00	23.91	0.0002
90.00	92.00	2.00	23.02	0.0002
92.00	94.00	2.00	22.18	0.0001
94.00	96.00	2.00	21.38	0.0001
96.00	98.00	2.00	20.63	0.0001
98.00	100.00	2.00	19.92	0.0001
100.00	102.00	2.00	19.24	0.0001
Total				0.0521

Tabla 16. Asentamientos calculados mediante Tomlinson (2001).

Hi (m)	Hf (m)	Espesor (m)	Incremento Esf. (KN/m ²)	Asentamiento (m)
19.67	20.00	0.33	138.53	0.0068
20.00	22.00	2.00	130.90	0.0034
22.00	24.00	2.00	119.26	0.0030
24.00	26.00	2.00	109.16	0.0025
26.00	28.00	2.00	100.34	0.0023
28.00	30.00	2.00	92.59	0.0019
30.00	32.00	2.00	85.73	0.0017
32.00	34.00	2.00	79.62	0.0015
34.00	36.00	2.00	74.17	0.0014
36.00	38.00	2.00	69.27	0.0013
38.00	40.00	2.00	64.86	0.0011
40.00	42.00	2.00	60.86	0.0010
42.00	44.00	2.00	57.23	0.0009
44.00	46.00	2.00	53.92	0.0008
46.00	48.00	2.00	50.90	0.0007
48.00	50.00	2.00	48.13	0.0007
50.00	52.00	2.00	45.58	0.0006
52.00	54.00	2.00	43.24	0.0006
54.00	56.00	2.00	41.07	0.0005
56.00	58.00	2.00	39.07	0.0005
58.00	60.00	2.00	37.21	0.0005
60.00	62.00	2.00	35.48	0.0005
62.00	64.00	2.00	33.87	0.0003
64.00	66.00	2.00	32.37	0.0003
66.00	68.00	2.00	30.97	0.0003
68.00	70.00	2.00	29.66	0.0003
70.00	72.00	2.00	28.43	0.0002
72.00	74.00	2.00	27.28	0.0002
74.00	76.00	2.00	26.19	0.0002
76.00	78.00	2.00	25.17	0.0002
78.00	80.00	2.00	24.21	0.0002
80.00	82.00	2.00	23.31	0.0002
82.00	84.00	2.00	22.45	0.0002
84.00	86.00	2.00	21.64	0.0002
86.00	88.00	2.00	20.88	0.0001
88.00	90.00	2.00	20.15	0.0001
90.00	92.00	2.00	19.47	0.0001
92.00	94.00	2.00	18.81	0.0001
94.00	96.00	2.00	18.19	0.0001
96.00	98.00	2.00	17.60	0.0001
98.00	100.00	2.00	17.04	0.0001
100.00	102.00	2.00	16.51	0.0001
Total				0.0378

Los asentamientos totales se estiman como la suma de los elásticos y los de consolidación. Los resultados se expresan en la tabla 17.

Tabla 17. Asentamientos totales para grupo de pilotes.

Asentamientos	Terzaghi y Peck (1967) (cm)	Tomlinson (2001) (cm)
	5.21	3.78
Seg (cm)	3.71	3.71
Total	8.92	7.49

De acuerdo con lo anterior, los asentamientos calculados mediante Terzaghi y Peck (1967) son de mayor magnitud que los de Tomlinson (2001). En una etapa posterior, se comparan con los estimados mediante elementos finitos.

MÉTODO SIMPLIFICADO: TAMEZ-GONZÁLEZ (2001)

Este método considera el aporte conjunto de la losa y de los pilotes. La tabla 18 contiene el resultado del cálculo de la capacidad de carga última de la losa.

Tabla 18. Capacidad de carga última de la losa de cimentación.

Df (m)	B (m)	L (m)	qu (KN/m ²)	Qu (KN)
0.80	19.39	57.97	282.96	318057.00

Nota: qu: presión de contacto última calculada con la teoría general de la capacidad de carga. Qu: carga última para la losa.

La capacidad de carga última del sistema losa – pilotes, es la suma de la losa y el grupo de pilotes. Su valor es, 1068749 KN.

Al aplicar la metodología se obtiene la proporción de carga para la losa y los pilotes. Adicionalmente, se calculan los asentamientos del sistema. En la tabla 19 se muestran los resultados.

Tabla 19. Distribución de carga y asentamientos por el método simplificado de Enrique Tamez Gonzalez.

Fp	Fl	Pt (KN)	Pp (KN)	PI (KN)	S _e (m)	S _c (m)	S _t (m)	S _t (cm)
0.9446	0.0554	270000	255037	14963	0.0123	0.0020	0.0143	1.4300

La magnitud de los asentamientos, calculados por la teoría simplificada, es baja en comparación con los medidos durante el proceso constructivo. Por lo tanto, se calcularon los asentamientos empleando la disipación de esfuerzos propuesta por Terzaghi y Peck (1967) y Tomlinson (2001). Esto con la finalidad de comparar los resultados y determinar aquel que presente mejor ajuste a los reales. En la tabla 20 se evidencian los valores calculados para los 3 métodos.

Tabla 20. Resultados método simplificado Enrique Tamez usando diferentes teorías de disipación de esfuerzos.

Método de disipación de esfuerzos	Fp	FI	Pt (KN)	Pp (KN)	PI (KN)	S _e (m)	S _c (m)	S _t (m)	S _t (cm)
Original - sin modificar	0.9446	0.0554	270000	255037	14963	0.0123	0.0020	0.0143	1.4300
Tomlinson (2001)	0.9346	0.0654	270000	252335	17665	0.0125	0.0023	0.0148	1.4800
Terzaghi y Peck (1967)	0.8961	0.1039	270000	241937	28063	0.0162	0.0037	0.0199	1.9900

A partir de los resultados se evidencia la variación de los asentamientos para las distintas teorías de distribución de esfuerzos. Estos valores se comparan con los estimados mediante elementos finitos.

MÉTODO SIMPLIFICADO: POULOS (2002)

Este método permite conocer la proporción de la carga que asume cada uno de los subsistemas, losa y pilotes. La teoría simplificada se desarrolló para losas con espesor uniforme, sin embargo, la losa analizada es nervada. En estos casos resulta conveniente el análisis desacoplado de la losa para evaluar su rigidez en cada dirección. Para este proyecto, el espaciamiento entre vigas es igual en ambos sentidos, por lo tanto, la rigidez será aproximadamente la misma. A partir de lo anterior, como simplificación, se determinó el espesor equivalente de la losa, para esto se tomó el volumen de concreto de la cimentación y se dividió entre el área total. En la tabla 21 se observan algunos resultados de la teoría simplificada.

Tabla 21. Cálculo de rigidez de la losa y del grupo de pilotes.

t_{eq} (m)	E_r (KN/m ²)	E_s (KN/m ²)	μ_s	Kr:	Pilotes	E_p (KN/m ²)	E_s (KN/m ²)	K_p	K_{gp}
1.00	17800000	132480.01	0.36	0.0223	455	21000000	92249.21	227.64	2633.06

Nota: t_{eq} : espesor equivalente de la losa.

A partir de los valores anteriores se calcula la proporción de la carga. Los resultados se evidencian en la tabla 22.

Tabla 22. Distribución de cargas y asentamiento método simplificado: Harry Poulos.

r_c (m)	r_0 (m)	r_m (m)	L (m)	ζ	ξ	ρ	μ	α_{cp}	K_{pr}	Pr/Pt	Pt (KN)	Pr (KN)	Pp (KN)	St (cm)
0.8869	0.20	27.99	28.00	4.94	1.00	0.62	0.36	0.70	2633.06	2.55E-06	270000	0.69	269999.31	10.20

De acuerdo con lo anterior, el aporte de la losa en la capacidad de carga del conjunto es nulo. Por lo tanto, el comportamiento del sistema lo determina el grupo de pilotes.

En la figura 29 se puede observar la curva de comportamiento del sistema losa – pilotes.

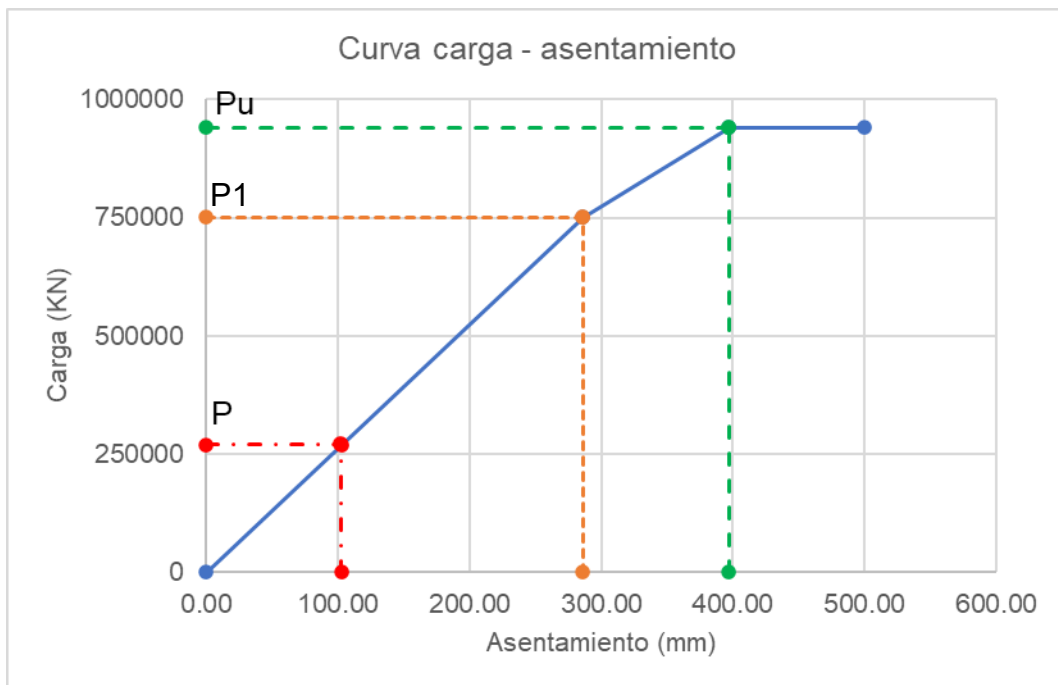


Figura 29. Curva carga-aseptamiento.

Nota: P representa la carga total del sistema.

A continuación, en la tabla 23 se presenta el resumen de los resultados para los métodos simplificados.

Tabla 23. Resumen distribución de cargas y asentamientos para los métodos simplificados.

Método	Distribución de cargas	Fr	Fp	Pr (KN)	Pp (KN)	Pt (KN)	St (cm)
Grupo de pilotes	Terzaghi y Peck (1967)	0.0000	1.0000	0.00	270000	270000	8.92
	Tomlinson (2001)	0.0000	1.0000	0.00	270000	270000	7.49
Enrique Tamez	Original - sin modificar	0.0554	0.9446	14963	255037	270000	1.43
	Tomlinson (2001)	0.0654	0.9346	17665	252335	270000	1.48
	Terzaghi y Peck (1967)	0.1039	0.8961	28063	241937	270000	1.99
Harry Poulos	-	0.0000	1.0000	0.00	270000	270000	10.20

Los resultados, presentados hasta el momento, corresponden a las teorías simplificadas de análisis de los sistemas losa – pilotes. Estos valores se compararon con los obtenidos mediante métodos numéricos.

MÉTODOS NUMÉRICOS

A partir del modelo geotécnico calibrado, se estimó el asentamiento proyectado a 20 años. Este periodo corresponde a la vida útil de la estructura. En la figura 30 se ilustra el valor obtenido.

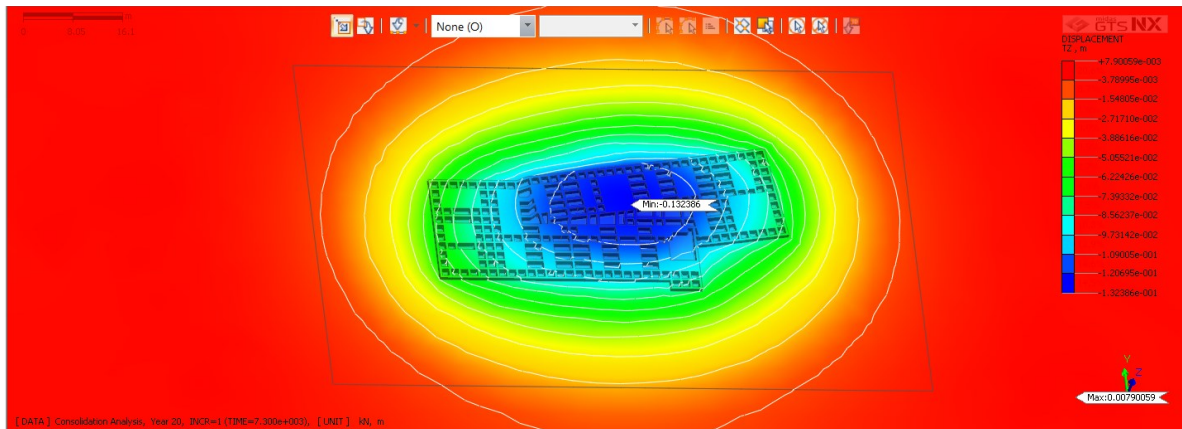


Figura 30. Asentamientos haciendo uso de elementos finitos. Elaboración propia haciendo uso del software Gts Nx Midas.

De acuerdo con el modelo, el asentamiento total de la estructura luego de 20 años es 13.24 cm. Este resultado se puede comparar con los obtenidos mediante las técnicas simplificadas de análisis, con el fin de verificar la convergencia entre ellos.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados de cada una de las técnicas utilizadas. En la tabla 24 se puede observar el resumen.

Tabla 24. Resumen resultados.

Método	Distribución de cargas	Fr	Fp	Pr (KN)	Pp (KN)	Pt (KN)	St (cm)
Grupo de pilotes	Terzaghi y Peck (1967)	0.0000	1.0000	0	270000	270000	8.92
	Tomlinson (2001)	0.0000	1.0000	0	270000	270000	7.49
Enrique Tamez	Original - sin modificar	0.0554	0.9446	14963	255037	270000	1.43
	Tomlinson (2001)	0.0654	0.9346	17665	252335	270000	1.48
	Terzaghi y Peck (1967)	0.1039	0.8961	28063	241937	270000	1.99
Harry Poulos	-	0.0000	1.0000	0	270000	270000	10.20
Elementos finitos		-	-	-	-	-	13.24

Los resultados permiten identificar la variación en la distribución de la carga y el asentamiento para cada una de las metodologías empleadas. Para el grupo de pilotes, no existe aporte de la losa, por lo tanto, toda la carga es asumida por los pilotes. Por su parte, el asentamiento obtenido con la teoría de Tomlinson (2001) es de menor magnitud que el calculado mediante Terzaghi y Peck (1967).

La teoría simplificada de Tamez González (2001) considera el aporte conjunto entre la losa y los pilotes. De acuerdo con los resultados, la proporción de la carga cambia dependiendo la teoría de distribución de esfuerzos que se utilice. Siendo mayor el aporte de la losa cuando se aplica la teoría de Terzaghi y Peck (1967), mientras que el aporte más bajo se obtiene al aplicar el método con la consideración original. Los asentamientos también se comportan según lo mencionado anteriormente.

La teoría simplificada de Poulos (2002) calcula la proporción de la carga entre losa y pilotes. Los resultados evidencian, para este proyecto, que la contribución de la losa es nula, es decir, los pilotes asumen toda la carga. El aporte nulo de la losa se debe a su rigidez, la cual es baja, a causa de su poco peralte y sus dimensiones.

Al comparar la predicción del comportamiento por las diferentes metodologías, se observa que la teoría de Enrique Tamez presenta los valores más bajos de asentamientos, mientras que los obtenidos para el grupo de pilotes y Poulos están más cerca del valor calculado mediante elementos finitos. Teniendo en cuenta, que los elementos finitos son la mejor herramienta para la solución de problemas complejos, es posible decir que, la teoría de Tamez Gonzalez obtiene asentamientos del orden del 10% de los esperados. Por su lado, el grupo de pilotes y la teoría de Poulos se acercan al 70% y 80% del asentamiento esperado, respectivamente.

La discrepancia de resultados entre el grupo de pilotes, teoría simplificada de Poulos, y métodos numéricos se explica en lo aproximado de las 2 primeras. Adicionalmente, la geometría de la losa es irregular, lo cual genera variaciones en la distribución de los esfuerzos. Por otro lado, las teorías simplificadas no pueden analizar la carga por dados sino para la losa como un elemento único con cargas uniformes. En consecuencia, al usar teorías simplificadas se deben conocer sus limitaciones.

CONCLUSIONES

Para el desarrollo de este proyecto se empleó la información de una edificación de 24 niveles en la ciudad de Montería. Los datos corresponden a propiedades del suelo, cargas, geometría, y asentamientos medidos durante la construcción. A partir de la información se generó el modelo geotécnico, en el software Gts Nx Midas. Para calibrar el modelo se compararon los asentamientos reales con los estimados por simulación numérica. Se encontró que la correlación de Helenelund, para el índice de compresibilidad, representa el comportamiento de los materiales arcillosos en el proyecto. Los índices, producto de la calibración, incluyen el efecto de compresión en el suelo a causa del alto número de pilotes y las cargas aplicadas hasta el momento. Para el caso del proyecto, los índices calibrados estuvieron entre 0.13 y 0.15. El índice de compresión de laboratorio puede ser mayor al obtenido con la calibración debido a que no considera el efecto de la hinca y construcción.

La distribución de carga y asentamientos, para el sistema losa - pilotes, se calculó mediante teorías simplificadas. A partir de elementos finitos se obtuvo el asentamiento a 20 años. De acuerdo con los resultados, es posible decir que la teoría de Enrique Tamez no representa el comportamiento de la edificación. Esto debido a que el asentamiento calculado corresponde al 10% del valor esperado para la edificación. Por otro lado, la teoría de Poulos no consideró el aporte de la losa al sistema, a causa de la baja rigidez de esta. Por lo tanto, la teoría de Poulos tomó únicamente el aporte de los pilotes.

De acuerdo con lo anterior, los asentamientos para la teoría de Poulos, y el grupo de pilotes son similares. Estos asentamientos representan el 80% y el 70%, del valor real, respectivamente, obtenido a partir de la simulación.

Teniendo en cuenta los resultados de este trabajo, las teorías simplificadas no representan el comportamiento de la edificación. Sin embargo, se pueden emplear métodos como el grupo de pilotes o la teoría de Poulos, para generar aproximaciones en la etapa de prediseño de cimentaciones con geometría

compleja. Se concluye que las teorías simplificadas no pueden representar el comportamiento de los sistemas con geometrías complejas. Las aproximaciones de las teorías simplificadas deben confirmarse luego mediante métodos numéricos. Por otro lado, no se recomienda el uso de la teoría de Tamez Gonzalez, debido a la discrepancia que presenta con la aproximación de elementos finitos. Es necesario realizar estudios adicionales que permitan su ajuste a las condiciones de la ciudad.

Como recomendación de este trabajo, se menciona la necesidad de registrar la secuencia constructiva y tomar lectura de los asentamientos. Estas lecturas deben realizarse durante el proceso constructivo y los primeros años de servicio de la edificación. Lo anterior, con la finalidad de poder reconstruir la historia de las edificaciones, y acercarse al entendimiento de la interacción losa - pilotes. A partir de esto será posible generar teorías simplificadas, por tipos de suelos, que puedan ponerse en práctica en el país. Esto se traduciría en proyectos eficientes que no pongan en riesgo la seguridad de las personas ni de sus bienes.

REFERENCIAS

- Anandarajah, A. (2010). *Computational methods in elasticity and plasticity: Solids and porous media*. Springer.
- Blyth, F. G. H., & De Freitas, M. H. (2006). *A geology for engineers* (7.^a ed.). Elsevier.
- Budhu, M. (2010). *Soil mechanics and foundations* (3.^a ed.). John Wiley & sons.
- Burland, J. B. (1965). The yielding and dilation of clay. *Géotechnique*, 15(2), 211–214. <https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.2.211>
- Carvajal-Monsalve, N. F., & Farbiarz-Farbiarz, Y. (2015a). *Est-río apto-cimentación.dwg*.
- Carvajal-Monsalve, N. F., & Farbiarz-Farbiarz, Y. (2015b). *Memoria de cálculo estructural informe #3: Proyecto río - torre 1*.
- Castilla-Negrete, P. E. (2014a). *2014_12_19_Asentamientos edificación*.
- Castilla-Negrete, P. E. (2014b). *Carta remisión pilotes cuadrados de 14.00 m parque residencial río*.
- Castilla-Negrete, P. E. (2015). *Estudio geotécnico y de suelos para la construcción de la torre 1 del parque residencial río, localizado en el municipio de Montería, departamento de Córdoba*.
- Cozzolino, E. V. M. (1961). Statistical forecasting of compression index. *Fifth international conference on soil mechanics and foundation engineering vol. 1*, 51–53. <https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Cunha, R. P., Poulos, H. G., & Small, J. C. (2001). Investigation of design alternatives for a piled raft case history. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(8), 635–641.

- Fellenius, B. H. (1991). Pile foundations. En H.-Y. Fang (Ed.), *Foundation engineering handbook* (2.^a ed., pp. 511–536). Chapman & hall.
- Fraser, R. A., & Wardle, L. J. (1976). Numerical analysis of rectangular rafts on layered foundations. *Géotechnique*, 26(4), 613–630.
- Gonzalez-G., A. J. (1999). Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. *X Jornada geotécnicas de la ingeniería colombiana*.
- Helenelund, K. V. (1953). Settlement observation in Finland. *Third international conference on soil mechanics and foundation engineering*, 370–376.
<https://www.issmge.org/publications/online-library>
- Horikoshi, K., & Randolph, M. F. (1998). A contribution to optimum design of piled rafts. *Géotechnique*, 48(3), 301–317.
- Instituto geográfico Agustín Codazzi. (s/f). *Montería*.
https://diccionario.igac.gov.co/?_termino=480827. Recuperado el 4 de septiembre de 2023, de https://diccionario.igac.gov.co/?_termino=480827
- Instituto geográfico Agustín Codazzi. (2020). *Colombia en mapas*. Colombia en mapas. <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>
- Katzenbach, R., Arslan, U., Moormann, Christian, & Reul, O. (1998). Piled raft foundation - interaction between piles and raft. *Darmstadt Geotechnics*, 4, 279–296.
- Koppula, S. D. (1981). Statistical estimation of compression index. *Geotechnical testing journal*, 4(2), 68–73.
- Ministerio de minas y energía. (2001). *Mapa de geológico del departamento de Córdoba*.
- Murthy, V. N. S. (2007). *Advanced foundation engineering: Geotechnical engineering series*. CBS publishers and distributors.

- Potts, D. M. (2003). Numerical analysis: A virtual dream or practical reality? *Géotechnique*, 53(6), 535–573.
- Potts, D. M., & Zdravkovic, L. (1999). *Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory* (Vol. 1). Thomas Telford.
- Poulos, H. G. (2001). Piled raft foundations: Design and applications. *Géotechnique*, 51(2), 95–113.
- Poulos, H. G. (2002). Simplified design procedure for piled raft foundations. En M. W. O'Neill & F. C. Townsend (Eds.), *Deep foundations 2002: An International perspective on theory, design, construction, and performance* (Vol. 1, pp. 441–458). American society of civil engineers.
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. John Wiley & sons.
- Poulos, H. G., Small, J. C., Ta, L. D., Sinha, J., & Chen, L. (1997). Comparison of some methods for analysis of piled rafts. *14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1119–1124.
- Prakoso, W. A., & Kulhawy, F. H. (2001). Contribution to piled raft foundation design. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 127(1), 17–28.
- Randolph, M. F. (1994). Design methods for pile groups and piled rafts. En *Thirteenth international conference on soil mechanics and foundation engineering* (Vol. 5, pp. 61–82). Oxford and IBH publishing.
- Randolph, M. F., & Reul, O. (2019). Practical approaches for design of pile groups and piled rafts. *4th Bolivian International Conference on Deep Foundations*, 1–27.

- Roscoe, K. H., & Burland, J. B. (1968). On the generalized stress-strain behavior of wet clays. En J. Heyman & F. A. Leckie (Eds.), *Engineering plasticity* (pp. 535–609). Cambridge university press.
- Roscoe, K. H., & Schofield, A. N. (1963). Mechanical behaviour of an idealised “wet-clay”. *European conference on soil mechanics and foundation engineering Vol.1*, 47–54.
- Servicio Geológico Colombiano. (2020). *Mapa geológico de Colombia en relieve 2020*.
- Skempton, A. W., & Jones, O. T. (1944). Notes on the compressibility of clays. *Quarterly journal of the geological society of London*, 100, 119–135. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1944.100.01-04.08>
- Tamez-González, E. (2001). *Ingeniería de cimentaciones: Conceptos básicos de la práctica*. TGC Geotecnia.
- Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1967). *Soil mechanics in engineering practice* (2.^a ed.). John Wiley & sons.
- Tomlinson, M. J. (2001). *Foundation design and construction* (7.^a ed.). Pearson education.
- Velásquez-Álvarez, A. (2015). *Informe de prospección sísmica proyecto río Montería*. www.consulcivil.com
- Wood, D. M. (2004). *Geotechnical modelling*. CRC Press.
- Yu, H. S. (1998). CASM: a unified state parameter model for clay and sand. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 22(8), 621–653. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9853\(199808\)22:8<621::AID-NAG937>3.0.CO;2-8](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9853(199808)22:8<621::AID-NAG937>3.0.CO;2-8)

ANEXO

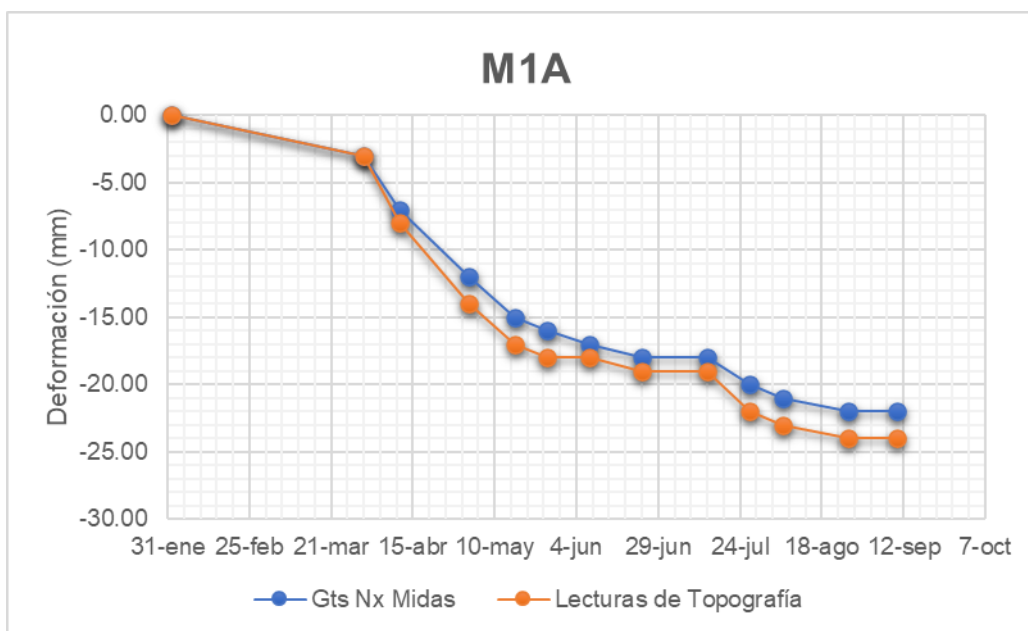


Figura A1. Asentamientos modelados vs reales dado M1A.

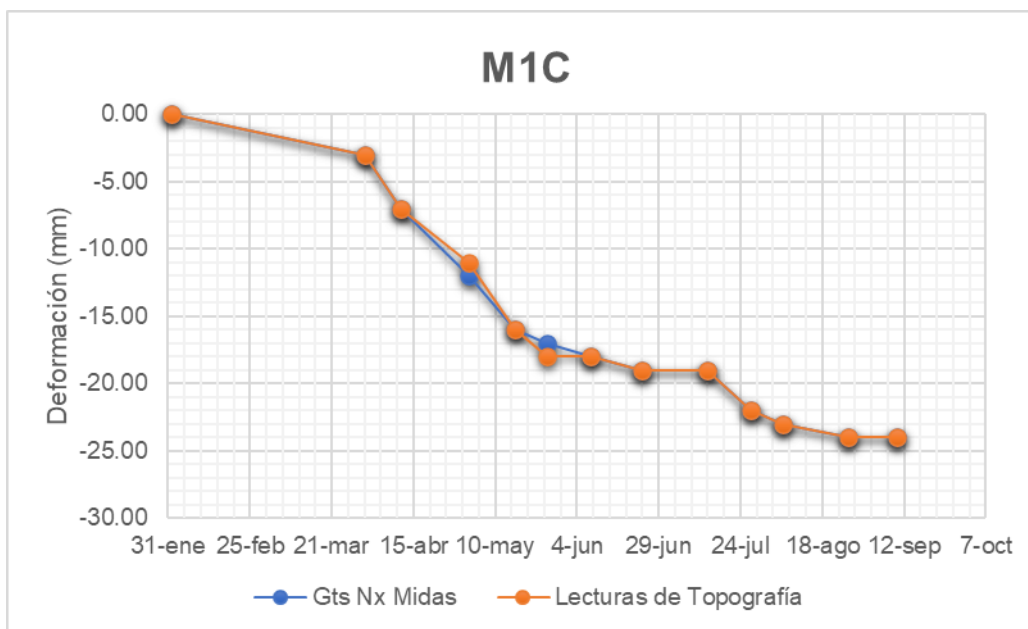


Figura A2. Asentamientos modelados vs reales dado M1C.

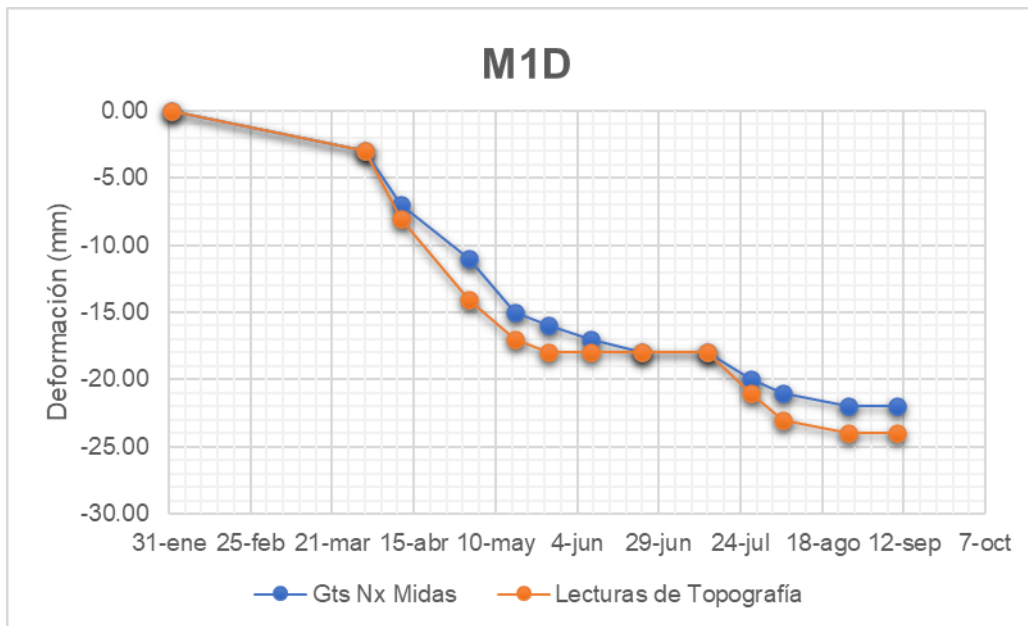


Figura A3. Asentamientos modelados vs reales dado M1D.

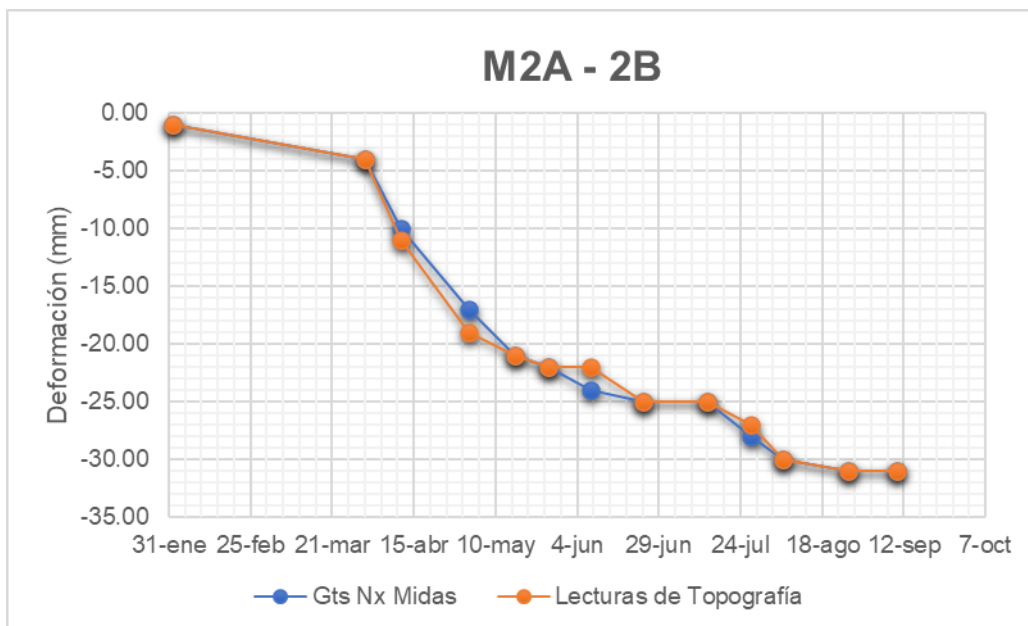


Figura A4. Asentamientos modelados vs reales dado M2A - 2B.

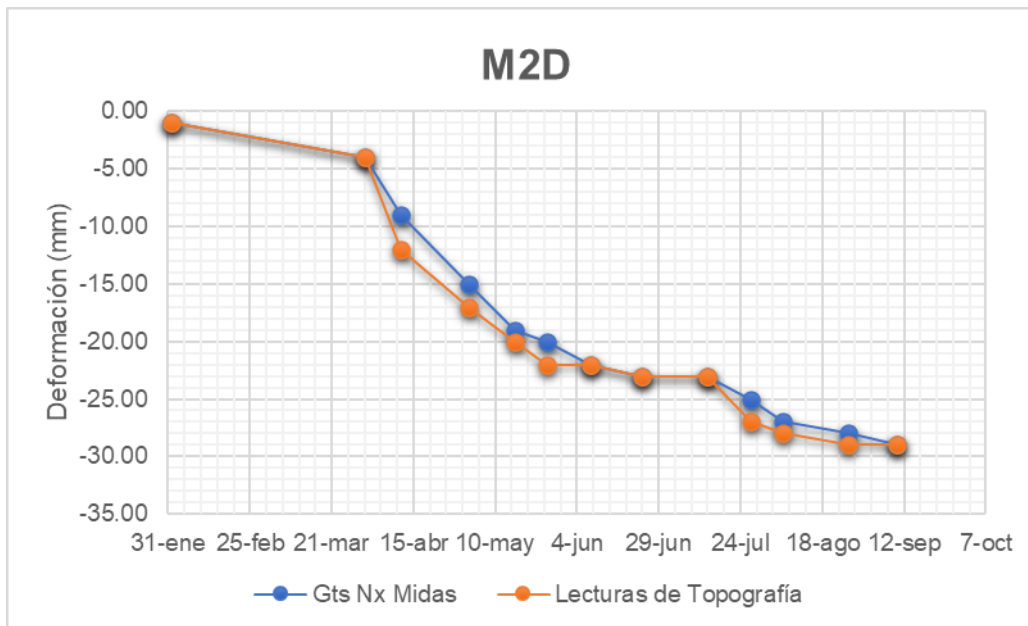


Figura A5. Asentamientos modelados vs reales dado M2D.

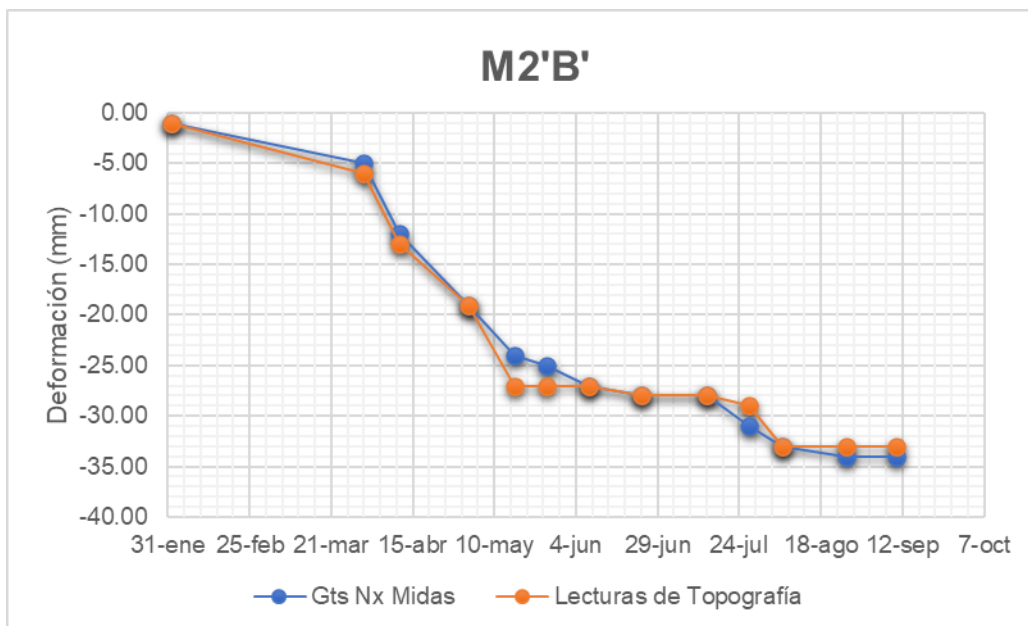


Figura A6. Asentamientos modelados vs reales dado M2'B'.

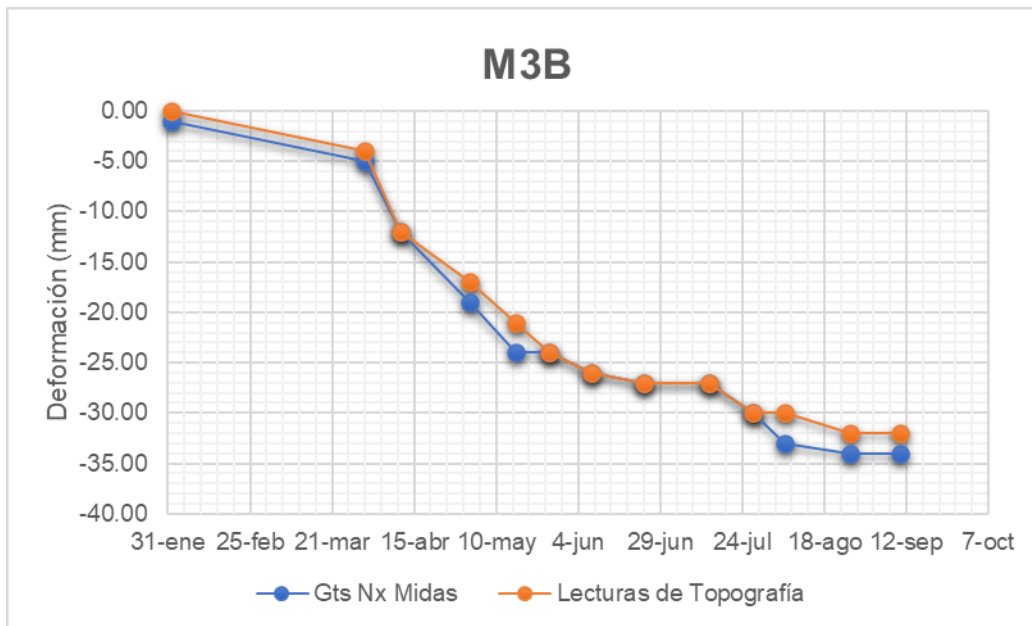


Figura A7. Asentamientos modelados vs reales dado M3B.

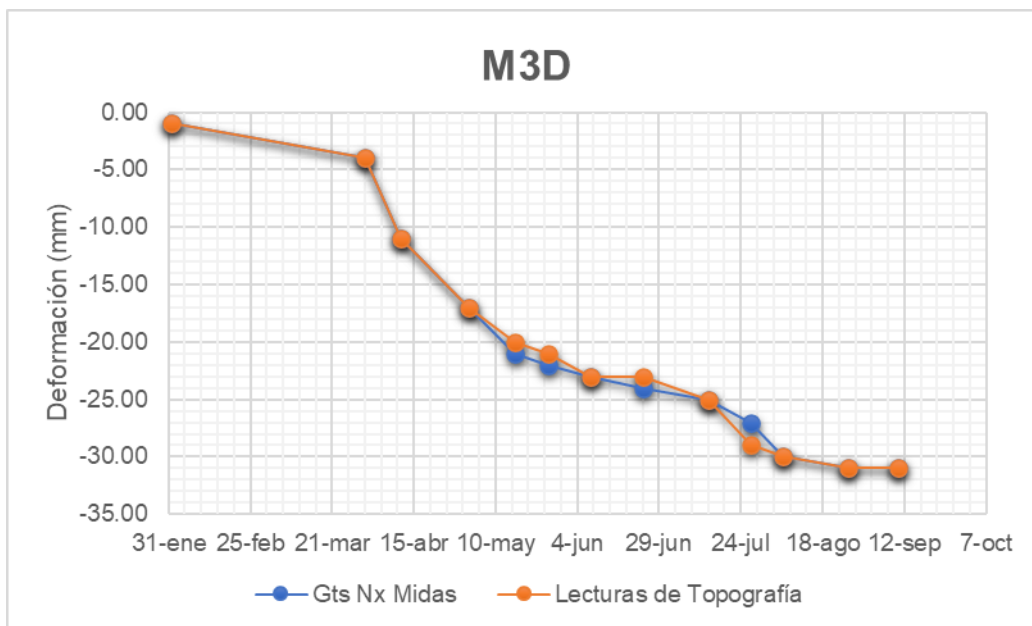


Figura A8. Asentamientos modelados vs reales dado M3D.

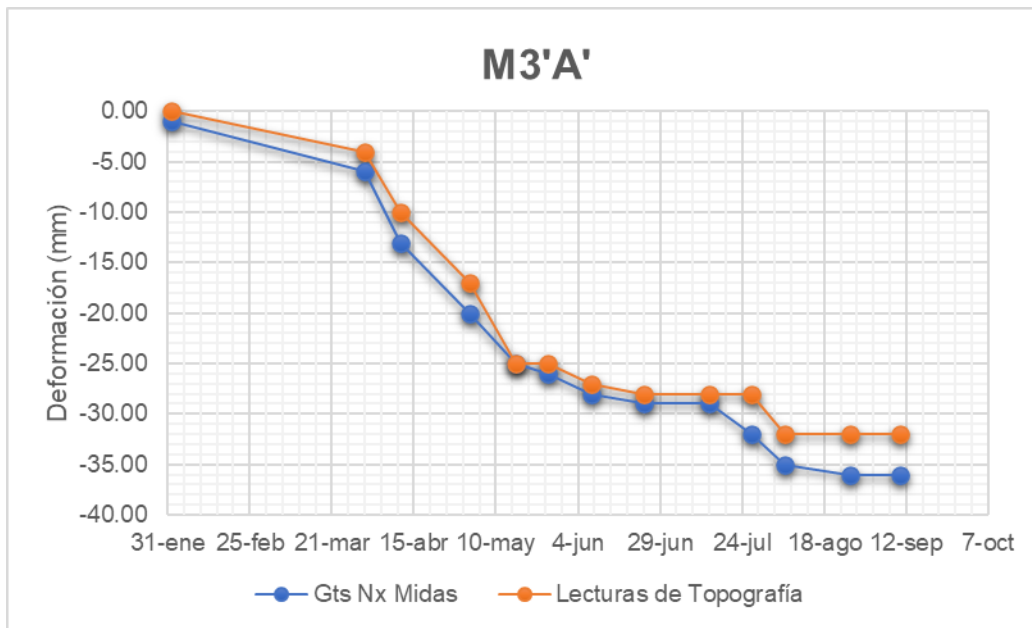


Figura A9. Asentamientos modelados vs reales dado M3'A'.

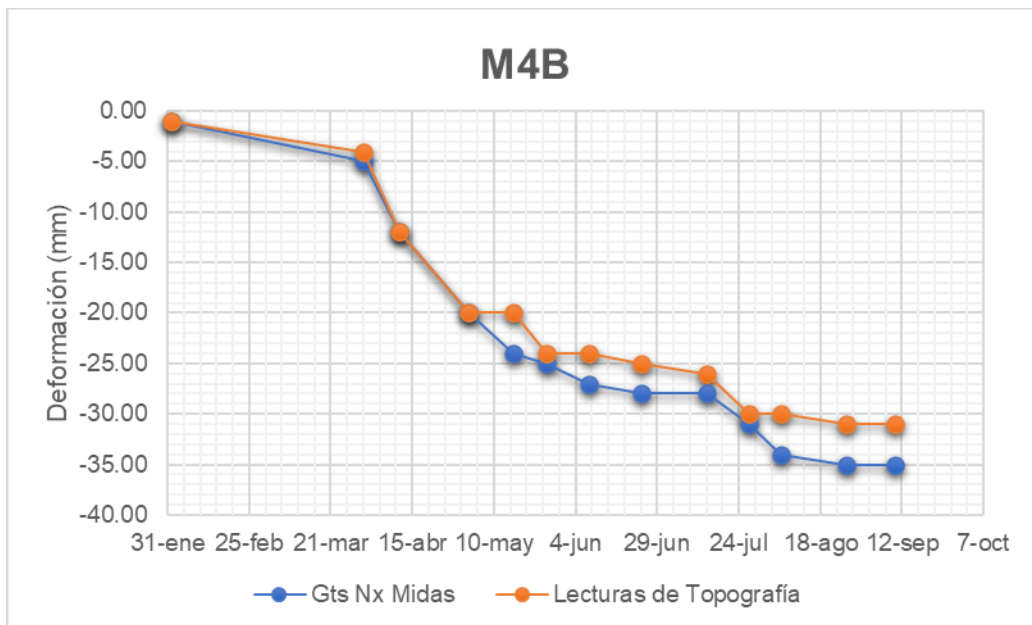


Figura A10. Asentamientos modelados vs reales dado M4B.

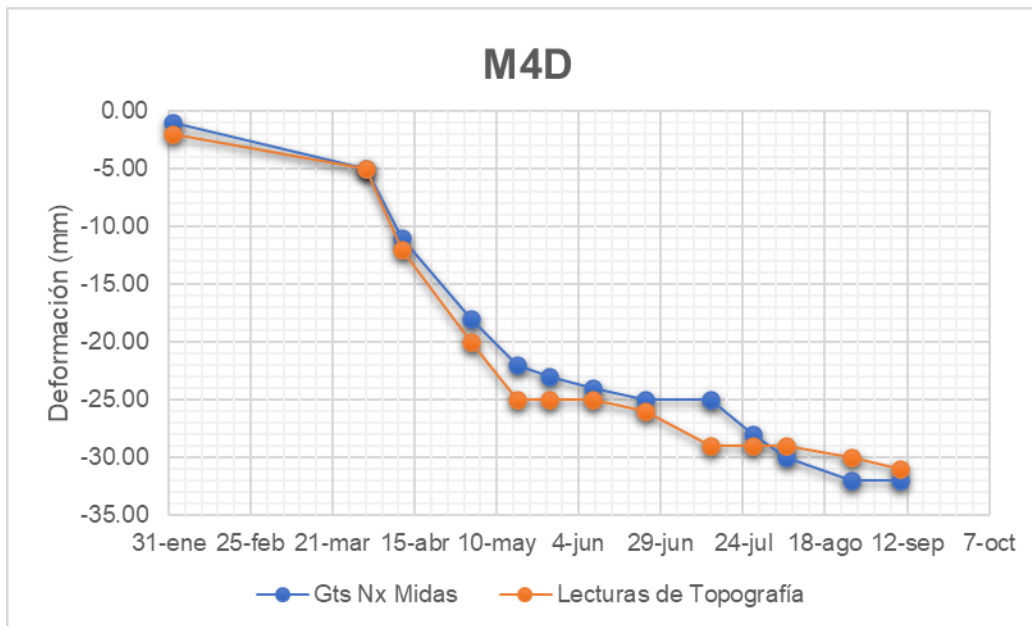


Figura A11. Asentamientos modelados vs reales dado M4D.

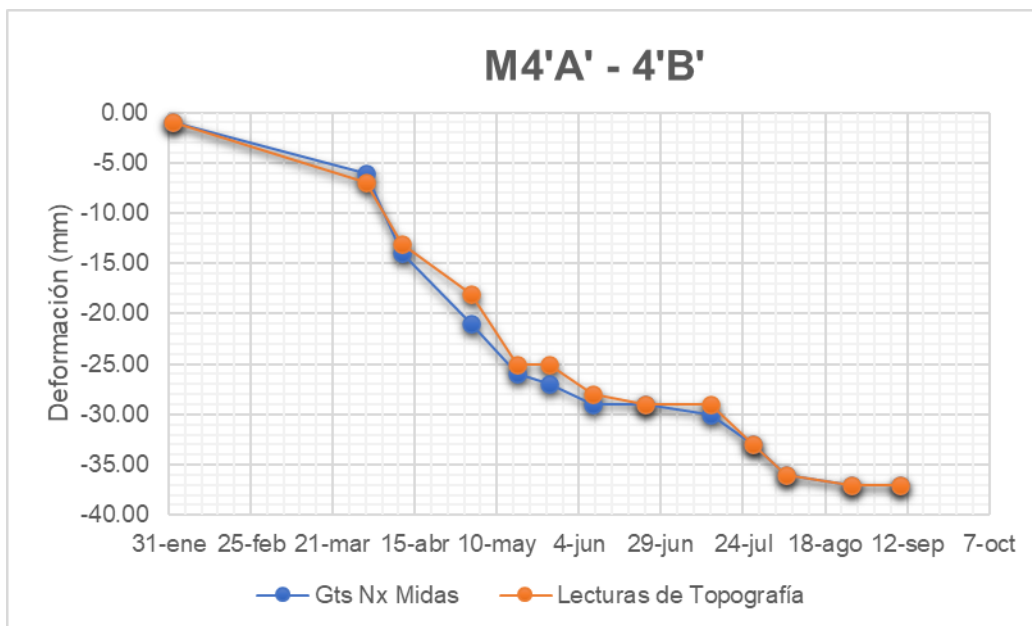


Figura A12. Asentamientos modelados vs reales dado M4'A' - 4'B'.

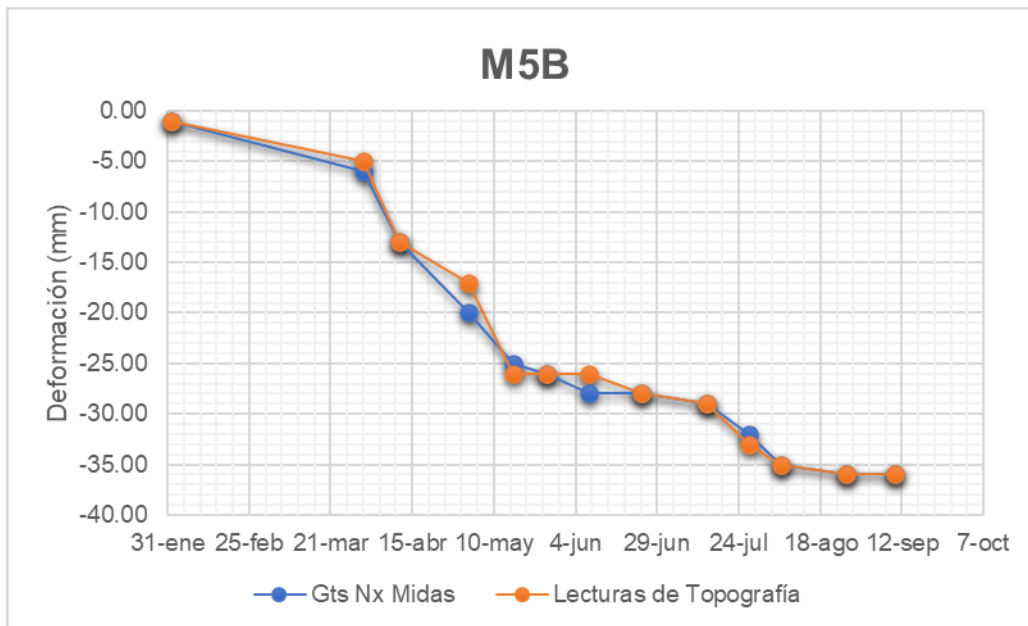


Figura A13. Asentamientos modelados vs reales dado M5B.

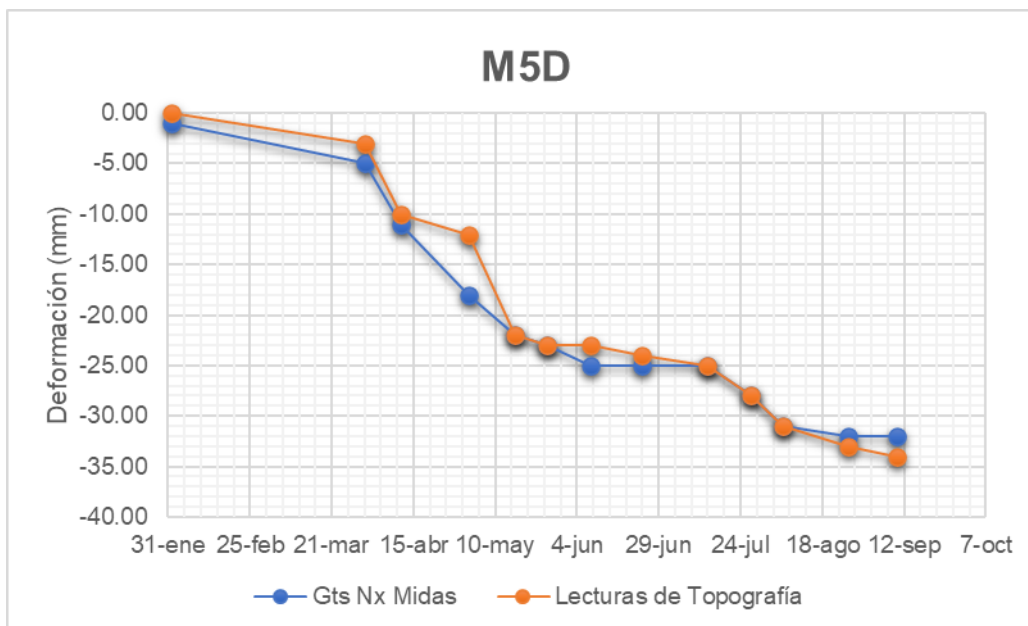


Figura A14. Asentamientos modelados vs reales dado M5D.

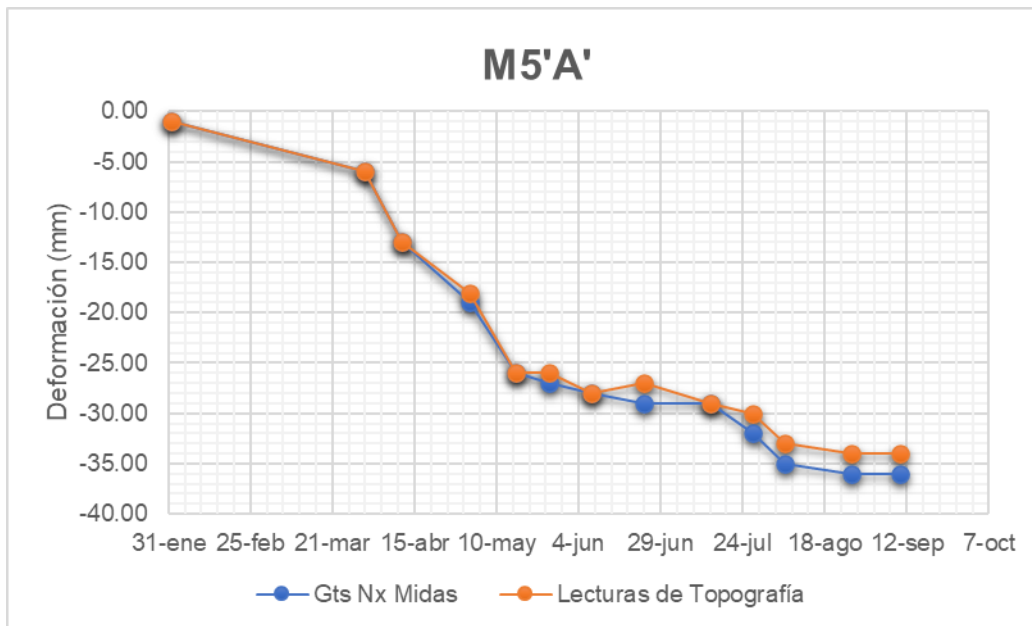


Figura A15. Asentamientos modelados vs reales dado M5'A'.

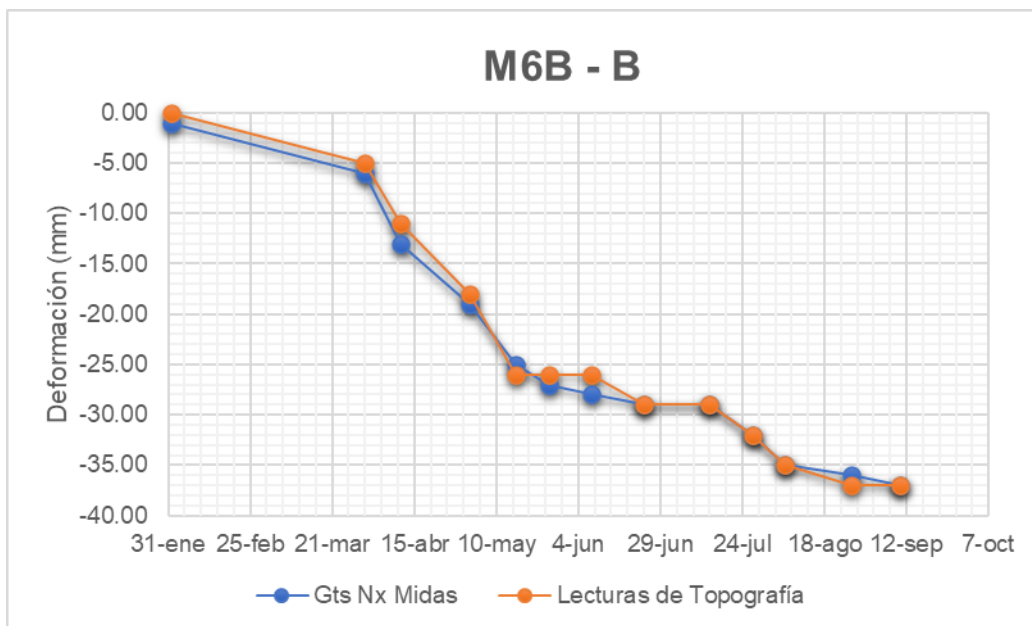


Figura A16. Asentamientos modelados vs reales dado M6B - B.

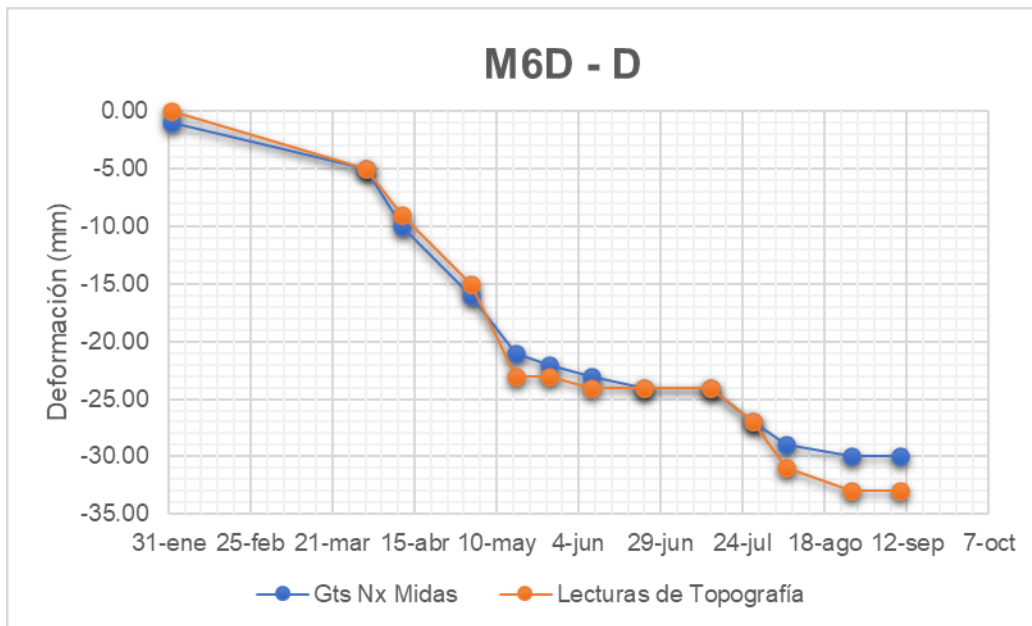


Figura A17. Asentamientos modelados vs reales dado M6D - D.

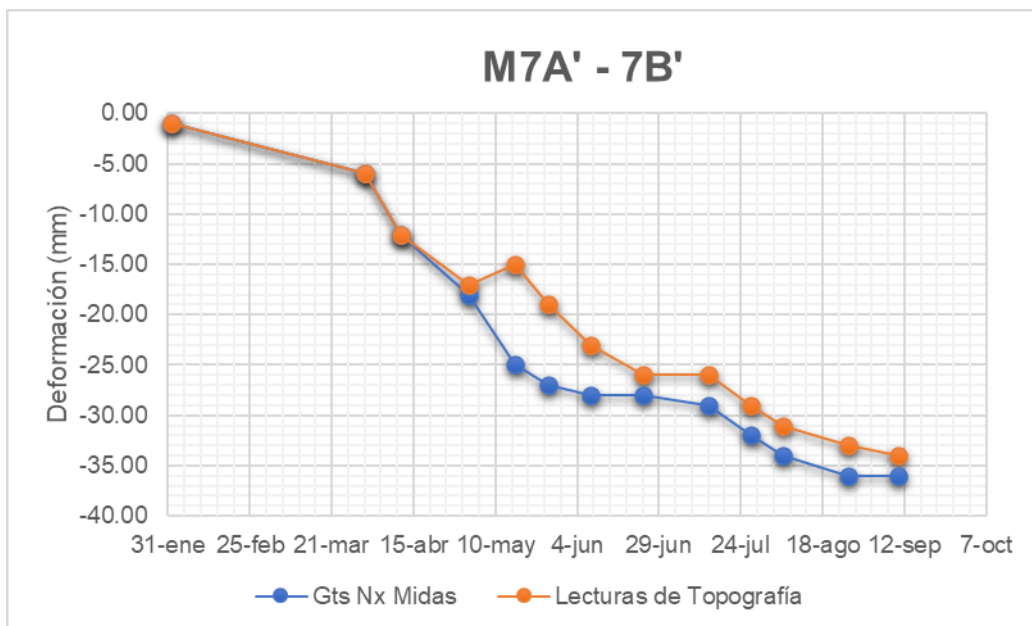


Figura A18. Asentamientos modelados vs reales dado M7A' - 7B'.

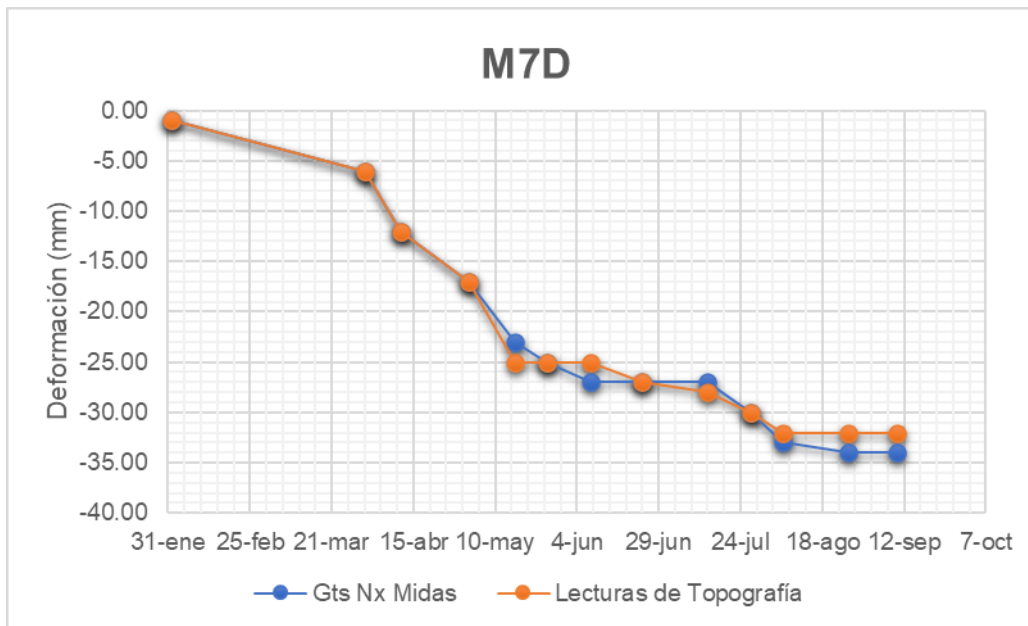


Figura A19. Asentamientos modelados vs reales dado M7D.

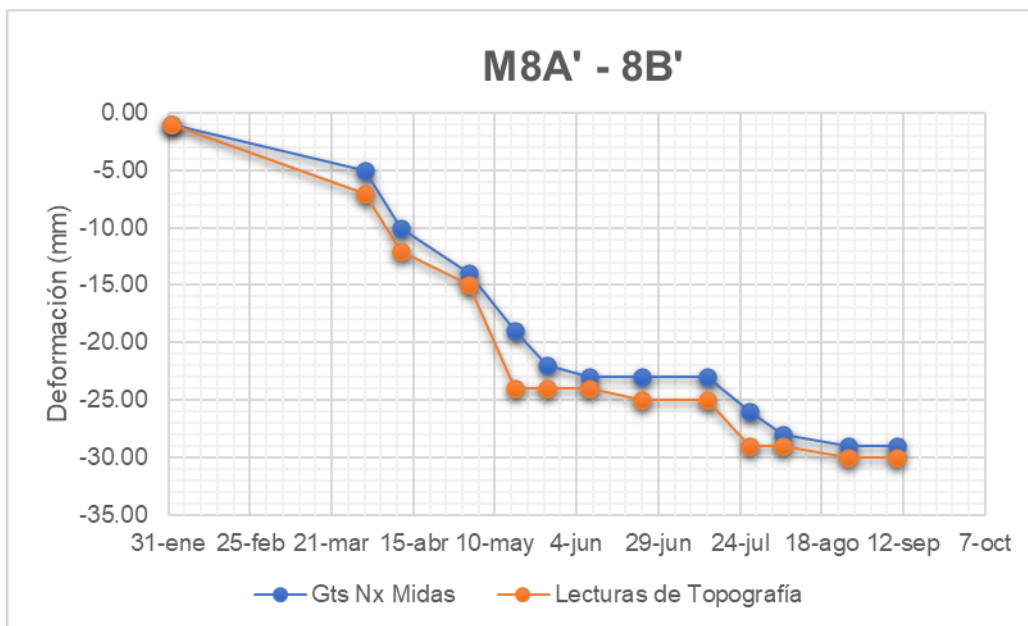


Figura A20. Asentamientos modelados vs reales dado M8A' - 8B'.

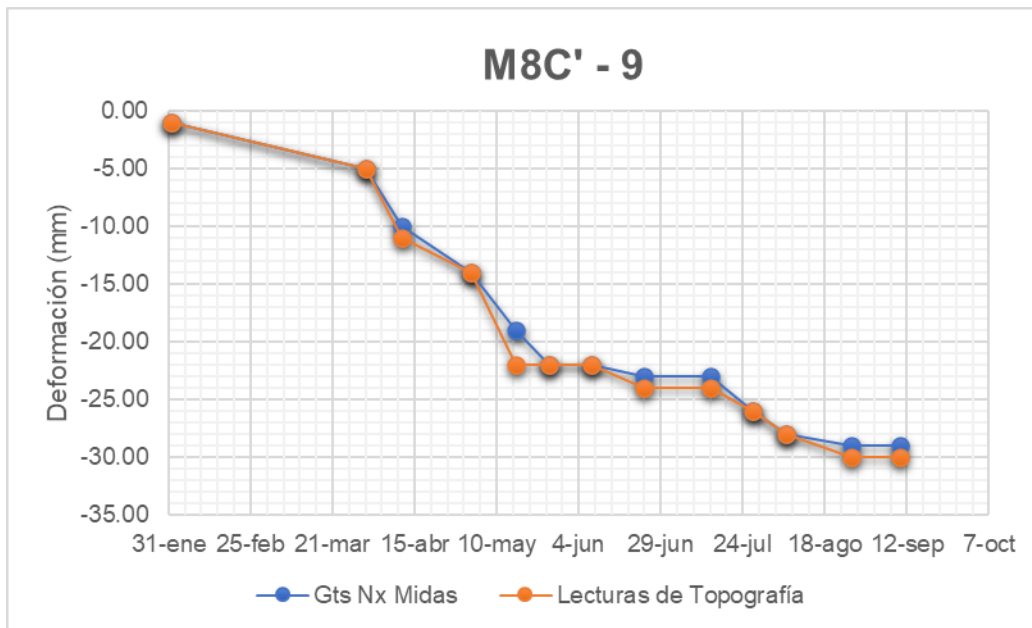


Figura A21. Asentamientos modelados vs reales dado M8C' - 9.