

**Modelamiento de una losa de cimentación recalzada con micropilotes por medio del
software RS3**

Juan David Abella Fajardo

Daniel Felipe Corredor Figueredo

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Jorge Alejandro Mendoza Rizo

PhD en ingeniería civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

Agradezco primeramente a Dios por permitirme culminar esta etapa de mi vida. Luego a mis padres, Milton José Abella y Gloria Nubia Fajardo, ya que sin todo el amor y apoyo recibido durante este ciclo nada de esto sería posible. A mi compañero Daniel Felipe Corredor, quien desde el principio me brindó su amistad y confianza, con quien compartí momentos buenos y malos. A mi director Jorge Alejandro Mendoza Rizo, quien nos más que un profesor fue un amigo, y nos asesoró en todo momento sin escatimar su tiempo para sacarnos de cualquier duda. Por último, a todos los profesores y compañeros que hicieron parte de este largo proceso y de quienes aprendí gran cantidad de cosas.

Juan David Abella Fajardo

Dedicatoria

Catala tu hiciste esto posible.

Daniel Felipe Corredor Figueredo

Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| Introducción | 15 |
| 1. Marco Teórico..... | 16 |
| 1.1 Losa de Cimentación..... | 16 |
| 1.2 Asentamiento diferencial | 17 |
| 1.3 Asentamiento por consolidación..... | 17 |
| 1.3.1 Definición de consolidación | 17 |
| 1.3.2 Consolidación en tres dimensiones..... | 18 |
| 1.4 Micropilotes | 19 |
| 1.5 RS3..... | 22 |
| 2. Consideraciones del modelo | 22 |
| 2.1 Losa de cimentación | 23 |
| 2.2 Suelo bajo el área de influencia de la cimentación | 23 |
| 2.3 Consideraciones superestructura..... | 25 |
| 2.4 Dimensiones del modelo..... | 27 |
| 2.5 Nivel freático | 28 |
| 2.6 Micropilotes | 28 |
| 2.7 Etapas..... | 28 |
| 3. Diseño del modelo | 29 |

| | |
|--|----|
| 3.1 Configuración inicial del programa | 29 |
| 3.2 Geometría del modelo..... | 29 |
| 3.3 Propiedades de los suelos y estratificación..... | 30 |
| 3.4 Cimentaciones..... | 30 |
| 3.5 Nivel de agua | 30 |
| 3.7 Restricciones y malla | 31 |
| 3.8 Modelos definitivos | 32 |
| 3.8.1 Modelo base..... | 32 |
| 3.8.2 Modelo recalce No. 1 | 33 |
| 3.8.3 Modelo recalce No. 2..... | 34 |
| 3.8.4 Modelo recalce No. 3..... | 35 |
| 3.8.5 Modelo cimentación con micropilotaje | 36 |
| 4. Análisis de Resultados | 36 |
| 5. Conclusiones..... | 47 |
| Referencias Bibliográficas | 48 |
| Apéndices..... | 50 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Ejemplos de recalce de cimentaciones preexistentes mediante micropilotes (Lorente, 2013) | 20 |
| Figura 2. Localización de los sondeos iniciales..... | 23 |
| Figura 3. Localización de los sondeos finales. | 24 |
| Figura 4. Vista frontal del perfil estratigráfico. | 24 |
| Figura 5. Vista del perfil estratigráfico. | 24 |
| Figura 6. Distribución de las columnas en la losa de cimentación y línea de referencia..... | 26 |
| Figura 7. Dimensionamiento del modelo en planta | 27 |
| Figura 8. Dimensionamiento del modelo en perfil. | 27 |
| Figura 9. Restricciones del sistema..... | 31 |
| Figura 10. Malla del modelo en vista planta..... | 32 |
| Figura 11. Esquema del “Modelo recalce No. 1”. | 33 |
| Figura 12. Modelo recalce No. 1. Con un grupo de 9 micropilotes de 13 metros de longitud. | 33 |
| Figura 13. Distribución del grupo de 9 micropilotes..... | 34 |
| Figura 14. Esquema del “Modelo recalce No. 2”. | 34 |
| Figura 15. Modelo recalce No. 2. Con dos grupos de micropilotes de 13 metros de longitud. | 35 |
| Figura 16. Distribución del grupo de 4 micropilotes..... | 35 |
| Figura 17. Modelo recalce No. 3. Con dos grupos de micropilotes de 10 metros de longitud. | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 18. Asentamientos “Modelo base” | 38 |
| Figura 19. Diferencia de asentamientos “Modelo base” | 38 |
| Figura 20. Asentamientos modelo recalce No. 1. | 39 |
| Figura 21. Diferencia asentamientos “Modelo recalce No. 1”. | 40 |
| Figura 22. Asentamientos modelo recalce No. 2. | 41 |
| Figura 23. Diferencia asentamientos “Modelo recalce No. 2”. | 41 |
| Figura 24. Asentamientos modelo recalce No. 3. | 42 |
| Figura 25. Diferencia asentamientos “Modelo recalce No. 3”. | 43 |
| Figura 26. Asentamientos “Modelo cimentación con micropilotaje” | 44 |
| Figura 27. Diferencia asentamientos “Modelo cimentación con micropilotaje” | 44 |
| Figura 28. Asentamientos de modelos “Base”, “Recalce No. 3” y “Cimentación con micropilotaje” a 15 m..... | 45 |
| Figura 29. Asentamientos de modelos “Base”, “Recalce No. 3” y “Cimentación con micropilotaje” a 20 m..... | 45 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Valores máximos de asentamientos diferenciales calculados, expresados en función de la distancia entre apoyos o columnas. (Tomado de la tabla H.4.9-1, NSR-10) | 17 |
| Tabla 2. Propiedades del suelo..... | 25 |
| Tabla 3. Clasificación de las unidades de construcción por categorías. (Tomado de la tabla H.3.1-1, NSR-10)..... | 26 |
| Tabla 4. Asentamientos del modelo base..... | 37 |
| Tabla 5. Diferencia asentamientos modelo base..... | 39 |
| Tabla 6. Asentamientos finales. | 46 |
| Tabla 7. Porcentaje de disminución de asentamientos en los modelos con respecto al “Modelo base” | 46 |

Lista de Apéndices

| | Pág. |
|--|-------------|
| Apéndice A. Propiedades del Proyecto..... | 50 |
| Apéndice B. Dimensionamiento “External Box” | 52 |
| Apéndice C. Espesores de Estratos del “Borehole 4” | 53 |
| Apéndice D. Propiedades “Liner” y Viga que compone al micropilote | 54 |
| Apéndice E. Nivel freático..... | 55 |
| Apéndice F. Carga sobre la losa de cimentación | 56 |
| Apéndice G. Mallado del modelo. | 57 |
| Apéndice H. Desplazamiento total a los 200 días “Modelo Base” | 58 |
| Apéndice I. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo base” | 59 |
| Apéndice J. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base” | 60 |
| Apéndice K. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo recalce No1” | 62 |
| Apéndice L. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base” vs “Modelo recalce No1” | 63 |
| Apéndice M. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo recalce No2” | 66 |
| Apéndice N. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base” vs “Modelo recalce No2” | 67 |
| Apéndice O. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo recalce No3” | 69 |
| Apéndice P. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base” vs “Modelo recalce No3” ... | 70 |
| Apéndice Q. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo micropilotaje” | 72 |
| Apéndice R. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base” vs “Modelo micropilotaje”. 73 | 73 |

Resumen

Título. Modelamiento de una losa de cimentación recalzada con micropilotes por medio del software RS3*

Autores: Juan David Abella Fajardo
Daniel Felipe Corredor Figueredo**

Palabras Clave: Micropilote, Consolidación, Asentamiento diferencial, Recalce, Losa de cimentación, RS3.

En esta investigación se llevó a cabo el modelamiento de una losa de cimentación que sufre problemas de asentamientos diferenciales causados por la consolidación de un estrato de suelo arcilloso que no había sido detectado antes de la construcción, y en la cual se proponen micropilotes como método de recalce. Esto con el fin de definir la viabilidad del uso de los mismos, y así, evitar que se presenten problemas estructurales. Se hizo por medio del software RS3 de Rocscience, el cual usa el método de elementos finitos, evaluando diferentes modelos y comparándolos entre sí, para observar las variaciones e incidencias de los micropilotes en los asentamientos. Este proyecto se realizó por medio de tres grandes partes: La primera fue las consideraciones del modelo, donde se definieron los parámetros iniciales como nivel de agua, cargas, características del suelo y etapas de análisis, entre otras. Todos estos parámetros fueron definidos por los autores basándose en su criterio y en la literatura. La segunda parte fue el diseño del modelo, donde se muestra a grandes rasgos cómo se ingresaba la información en el programa para lograr un modelo útil y consistente. Por último, se realizó el análisis de resultados teniendo en cuenta la normativa vigente en Colombia (NSR-10) y concluyendo cuál de las disposiciones de micropilotes propuestas era la que mejor funcionaba.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas Escuela de Ingeniería Civil Director Jorge Alejandro Mendoza Rizo Ph.D en Geomecánica Computacional

Abstract

Title. Modeling of a reinforced foundation slab with micropiles through RS3 software*

Authors: Juan David Abella Fajardo
Daniel Felipe Corredor Figueredo**

Key Words: Micropile, Consolidation, Differential settlement, Foundation recovery, Raft foundation, RS3.

In this research, the modeling of a raft foundation that suffers from differential settlement problems caused by the consolidation of a layer of clay soil that had not been detected before construction, and in which micropiles are proposed as a method of foundation recovery. This in order to define the feasibility of using them, and thus avoid presenting structural problems. It was done through RS3 software from Rocscience, which uses the finite element method, evaluating different models and comparing them to each other, to observe the variations and incidences of the micropiles in the settlements. This project was carried out through three major parts: The first was the considerations of the model, where the initial parameters were defined as water level, loads, soil characteristics and analysis stages, among others. All these parameters were defined by the authors based on their criteria and literature. The second part was the design of the model, which shows in broad strokes how information was entered into the program to achieve a useful and consistent model. Finally, the results analysis was carried out taking into account the current regulations in Colombia (NSR-10) and concluding which of the micropile provisions proposed was the one that worked best.

* Degree work

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering School of Civil Engineering Director Jorge Alejandro Mendoza Rizo Ph.D in Computational Geomechanics

Introducción

Uno de los problemas que se presenta en el diseño y dimensionamiento del sistema de fundación, es la correcta determinación del asentamiento, tanto del máximo permitido como del máximo diferencial, el cual influye en varios aspectos inclusive en la integridad estructural (Vásquez, 2004). Cuando se presentan diferencias considerables entre los valores de asentamientos reales y los calculados, siendo superiores los de asentamientos reales, las posibles causas de error en el cálculo son: los estudios de suelos no se realizaron cumpliendo el proceso determinado por la norma, no fueron los suficientes, o, simplemente el suelo era poco homogéneo, afectando así la caracterización de los estratos de suelo (Ayala, 2009).

La problemática real se presenta cuando dichas fallas no se detectan durante la etapa de diseño sino cuando la edificación ya está en pie. Cuando se presentan estos problemas y existen posibilidades de generarse daños estructurales, las únicas opciones son derrumbar la parte de la estructura afectada o realizar un recalce para mitigar y remediar el daño causado (Auvinet, 2011).

Para este proyecto de investigación se propone el recalce de una losa de cimentación por medio de micropilotes con el fin de devolver la integridad estructural al sistema, y con ella, su serviciabilidad. Para esto se usó el software de geotecnia llamado RS3 de la empresa RocScience. El cual, por medio de análisis de elementos finitos permite modelar las condiciones planteadas en forma tridimensional. Cabe recordar que es un caso de estudio con condiciones definidas por criterio de los autores.

El uso de micropilotes para el recalce se propone porque este requiere poco espacio para su instalación, el equipo usado es de dimensiones pequeñas y es silencioso, la obra puede realizarse en poco tiempo y permite el uso de otras áreas de la estructura durante la ejecución. Además, los micropilotes pueden ser incorporados a la parte sana de la estructura sin necesidad de ejecutar otros elementos estructurales.

La finalidad que el proyecto tiene es mostrar la viabilidad del uso de micropilotes como opción de recalce para una estructura que presente problemas de asentamientos en su cimentación.

1. Marco Teórico

1.1 Losa de Cimentación

Una losa de cimentación es una zapata combinada que cubre la totalidad del área debajo de una estructura y que soporta varias columnas y muros. Estas son usadas cuando las cargas del edificio son tan pesadas o la capacidad portante del suelo es tan pequeña que las zapatas individuales cubrirán más de la mitad del área del edificio (Peck, Hanson y Thornburn, 1982). Por otra parte, Das (2012) afirma que este tipo de cimentación puede ser soportada con pilotes para reducir el asentamiento cuando es construida sobre un suelo altamente compresible. Así mismo, cuando se tiene un nivel freático alto, sobre los pilotes se construye la losa para así controlar su flotabilidad.

1.2 Asentamiento diferencial

En la gran mayoría de construcciones se tienen subsuelos heterogéneos donde las cargas soportadas por varias cimentaciones superficiales pueden variar de gran manera. Esto hace que se presenten diferentes asentamientos en distintas partes de un edificio. Este tipo de asentamiento, conocido como asentamiento diferencial, puede desencadenar en el daño de la superestructura (Das, 2012). La Norma Sismo Resistente, NSR-10, en su título H, define un asentamiento diferencial como “la diferencia entre los valores de asentamiento correspondientes a dos partes diferentes de la estructura” (H-18). Además, se presentan los límites permitidos, expresados en función de ℓ , como se puede ver en la Tabla 1.

Tabla 1.

Valores máximos de asentamientos diferenciales calculados, expresados en función de la distancia entre apoyos o columnas. (Tomado de la tabla H.4.9-1, NSR-10)

| Tipo de construcción | Δ_{max} |
|--|---------------------|
| (a) Edificaciones con muros y acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores | $\frac{\ell}{1000}$ |
| (b) Edificaciones con muros de carga en concreto o en mampostería | $\frac{\ell}{500}$ |
| (c) Edificaciones con pórticos en concreto, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores | $\frac{\ell}{300}$ |
| (d) Edificaciones en estructura metálica, sin acabados susceptibles de dañarse con asentamientos menores | $\frac{\ell}{160}$ |

1.3 Asentamiento por consolidación

1.3.1 Definición de consolidación Las características esfuerzo-deformación de un suelo o de una roca, son los que determinan el asentamiento que una estructura dada puede experimentar.

Cuando se construye una estructura sobre mantos de arcilla blanda, muchas veces enterrados debajo de otras capas de materiales más resistentes, pueden producirse asentamientos de gran magnitud y que se dan muy lentamente. Es a este proceso al que se le conoce con el nombre de consolidación (Peck et al., 1982).

Suelos blandos como arenas y arcillas están compuestos de partículas pequeñas, y generalmente el espacio entre estas están llenos de agua, lo cual es conocido como medio poroso saturado. La deformación del material depende de la rigidez del material poroso, pero también del comportamiento del fluido en los poros. Cuando se tiene una permeabilidad baja, las deformaciones pueden ser considerablemente retardadas por el fluido en los poros, el cual necesita un tiempo considerable para salir del suelo (Verruijt, 1995). En las arcillas al poseer una baja permeabilidad, cuando se aplica un incremento de carga, el agua intersticial no puede salir inmediatamente, y, al intentar juntarse entre sí las partículas de arcilla se crea presión en el agua de los poros que tiende a expulsar el líquido. En un principio este tiende a salir con rapidez, pero con el tiempo, la presión disminuye, y, por ende, la velocidad de salida del agua también. Esto permite que las partículas de suelo puedan aproximarse más entre ellas, lo que hace que el asentamiento que se vuelva muy lento (Peck et al., 1982).

1.3.2 Consolidación en tres dimensiones Terzaghi en 1919 con su teoría, fue el primero en tener éxito para explicar el fenómeno de la consolidación. Sin embargo, dicha teoría se restringe a una sola dimensión, y fue Biot en 1941 quien la extendió a tres dimensiones. Las propiedades básicas del suelo que fueron asumidas por Biot (1941), son las siguientes: (1) isotropía del suelo, (2) reversibilidad de las relaciones esfuerzo - deformación bajo condiciones de equilibrio final, (3) linealidad de las relaciones esfuerzo - deformación, (4) deformaciones pequeñas, (5) el agua

contenida en los poros es incompresible, (6) el agua puede contener burbujas de aire, y, (7) el agua fluye a través del esqueleto poroso de acuerdo a la ley de Darcy.

Las ecuaciones de la teoría clásica de elasticidad pueden ser totalmente definidas usando dos constantes del material, estas son el *Módulo de Young* (E) y *el coeficiente de Poisson* (ν), explica Merxhani (2016). Añade además, que otras constantes fundamentales que pueden ser usadas son el módulo de volumen (K), el módulo de cortante (G) y la constante de Lamé (λ), las cuales están relacionadas al coeficiente de Poisson y al módulo de Young como se muestra:

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (1)$$

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (3)$$

1.4 Micropilotes

Los micropilotes son pilotes pequeños con diámetros inferiores a los 350mm, usados para transmitir la carga de una estructura a estratos más profundos. Romana (2003) menciona que la primera aplicación documentada donde se usó este sistema fue para el recalce de la Escuela A. Angiulli en Nápoles, donde se usaron micropilotes de 13m de longitud y 100mm de diámetro nominal. Esto funcionó tan bien que causó sensación y se extendió por toda Europa. De igual manera, explica que una de las grandes áreas de utilización de los micropilotes es el de recalce de estructuras, ver Figura 1, donde trabaja principalmente a compresión, y que las ventajas más importantes de ser usado de esta forma son:

- Los equipos son de tamaño reducido y pueden trabajar incluso dentro de un sótano.

- Pueden instalarse en cualquier tipo de terreno y atravesar, si es necesario, inclusiones duras (como por ejemplo elementos de cimentaciones antiguas de hormigón o mampostería).
- Su perforación es muy similar a la de un sondeo, lo que permite detectar eventuales cavidades (y en su caso rellenarlas a través de la perforación).
- Dada su esbeltez trabaja casi exclusivamente por fuste por lo que no es preciso que la punta se apoye en un estrato más compacto.
- Como se trata de un elemento de construcción sencilla el proyecto puede ser flexible y ajustarse a las posibles condiciones del terreno (y de la cimentación) si son cambiantes. (p. 5)

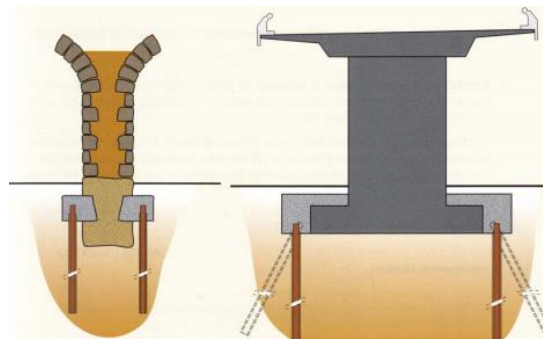


Figura 1. Ejemplos de recalde de cimentaciones preexistentes mediante micropilotes (Lorente, 2013)

En Colombia esta técnica es relativamente nueva. En el valle de Aburrá fue el primer lugar en Colombia donde se empezaron a emplear micropilotes de cimentación. En su trabajo, Rojas (2017) menciona que a pesar de la existencia de gran variedad de metodologías teóricas de cálculo de la capacidad portante a carga axial de compresión de pilotes y micropilotes, la mayoría usan de entrada información y parámetros geotécnicos que no siempre están disponibles o que no son del todo confiables, razón por la cual se exige la ejecución de pruebas de cargas físicas para validar

los diseños supuestos y verificar los resultados de obtenidos de carga, asentamiento y comportamiento. Además, afirma que no existe en la normativa colombiana un documento unificado e integral que indique número y tipo de pruebas en un proyecto, niveles de carga, ciclos, montaje y mucho menos una guía simplificada para la aplicación de cálculos de capacidad portante a carga axial de compresión dependiendo de las condiciones y situaciones locativas.

Para Das (2012, p. 546), “la selección del tipo de pilote que se utilizará y la estimación de su longitud necesaria son tareas muy difíciles que requieren buen juicio”. Explica también que la carga última del pilote está dada por:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (4)$$

Donde:

Q_p = Carga soportada en la punta del pilote

Q_s = Carga soportada por la fricción superficial desarrollada en los lados del pilote

Cuando se tiene un estrato competente a una profundidad razonable, los pilotes se pueden prolongar hasta la superficie de dicha superficie. En este caso, la capacidad última depende de la capacidad de soporte de carga del material subyacente, denominándose pilotes de carga de punta. Por otra parte, si no se tiene un estrato competente a una profundidad razonable, se usan los llamados pilotes de fricción, en los que la mayoría de la capacidad de carga viene dada por la resistencia derivada de la fricción superficial. Se obtiene entonces la ecuación (5) para pilotes de carga de punta y la ecuación (6) para los pilotes de fricción.

$$Q_u \approx Q_p \quad (5)$$

$$Q_u \approx Q_s \quad (6)$$

Bruce, DiMillio y Juran (1997) mencionan dos tipos de pilotes, los de desplazamiento y los de reemplazo. Los primeros, se caracterizan porque durante su instalación se desplaza lateralmente el

suelo a través del cual es introducido. Por otra parte, los pilotes de reemplazo se caracterizan por perforarse un pozo en el cual el pilote es colocado o fundido. Los micropilotes son capaces de soportar cargas sorprendentemente altas, existiendo registros de cargas de compresión de más de 5000 kN.

1.5 RS3

RS3 es un programa de la línea de RocScience para el análisis 3D de estructuras geotécnicas para aplicaciones civiles y mineras. El significado de su nombre viene de *programa de análisis en 3 dimensiones de Roca y Suelo*. Es un programa de análisis de elementos finitos de uso general para excavaciones subterráneas, diseño de túneles y soportes, excavación superficial, diseño de cimientos, terraplenes, consolidación, filtración de agua subterránea, entre otros. Este es la unión de otros programas de RocScience, tales como Slide, Phase2 y Settle3D.

2. Consideraciones del modelo

Para poder comenzar con el diseño del modelo se hace necesario definir y caracterizar varios de los elementos que hacen parte del mismo. En el caso de este estudio, los elementos a definir son:

2.1 Losa de cimentación

Para el proyecto se planteó una losa de cimentación maciza de 0.3m de espesor y de dimensiones 20m x 10m. El material elegido para la losa es concreto reforzado, y se implementaron las propiedades predeterminadas por el software.

2.2 Suelo bajo el área de influencia de la cimentación

Para los propósitos de este estudio, se asume que inicialmente se realizaron tres sondeos, cuya ubicación es mostrada en la Figura 2. Para el caso problema, se inician a presentar asentamientos que no van acorde a los que deberían ocurrir con el tipo de suelo encontrado. Por tal razón, se decide realizar dos sondeos en la zona donde más se ve asentamiento de la losa para determinar si hay presencia de un estrato de suelo que no fue identificado por las exploraciones anteriores. La localización de los cinco sondeos realizados se puede apreciar en la Figura 3.

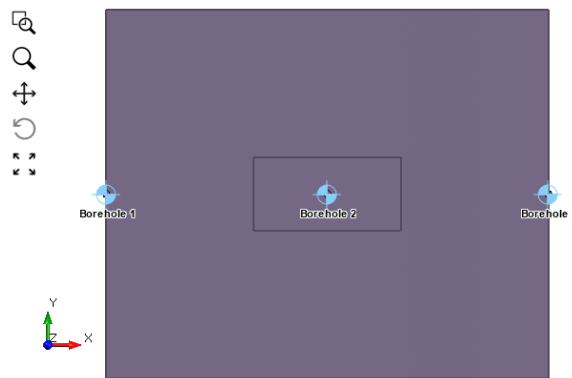


Figura 2. Localización de los sondeos iniciales.

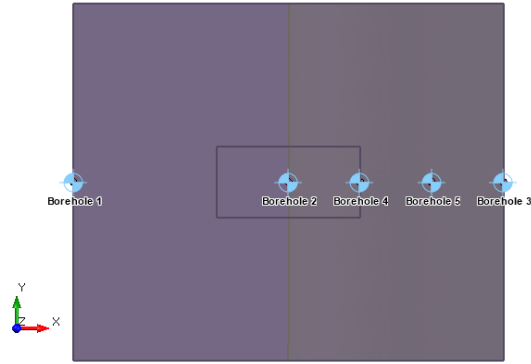


Figura 3. Localización de los sondeos finales.

El perfil estratigráfico del suelo se aprecia en la Figura 4 y en la Figura 5.

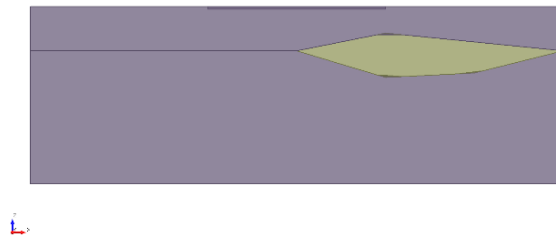


Figura 4. Vista frontal del perfil estratigráfico.

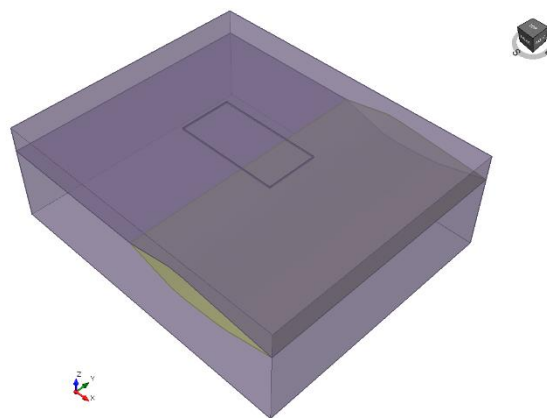


Figura 5. Vista del perfil estratigráfico.

Por último, las propiedades de los suelos hallados se pueden apreciar en la Tabla 2. Vale la pena mencionar que inicialmente se tenía planeado utilizar varios estratos de suelo, pero debido a la gran cantidad de condiciones necesarias para el correcto modelamiento, fue necesario reducirlo a dos para que el programa funcionara de manera óptima.

Tabla 2.

Propiedades del suelo

| Nombre | γ | n | ϕ' | c' | E | ν |
|---------|----------|-----|---------|------|-------|-------|
| - | KN/m3 | % | ° | kPa | MPa | - |
| Arena | 17 | 0.3 | 35 | 0 | 35000 | 0.3 |
| Arcilla | 17 | 0.3 | 30 | 10.5 | 2750 | 0.3 |

Donde:

γ = Peso específico

n = porosidad

ϕ' = ángulo de fricción

c' = cohesión

E = módulo elástico

ν = coeficiente de Poisson

2.3 Consideraciones superestructura

La superestructura que se encuentra soportada sobre la cimentación de estudio se caracterizó como una estructura aporticada en concreto reforzado, con quince columnas, cada una a 5m de la otra, como se muestra en la Figura 6, donde también se puede observar una línea A-A', la cual será la

línea de referencia sobre la que se analizarán los desplazamientos más adelante. Esta estructura transfiere una carga de 200 kN/m^2 al área total de la losa de cimentación. Bajo estas condiciones cada columna debe soportar una carga de aproximadamente 3000 kN , dichas columnas tendrán unas dimensiones de $0.4\text{m} \times 0.4\text{m}$, siendo denominada como una estructura de categoría media (NSR, 2010). Se tomó esta decisión para poder explorar los resultados del recalce con micropilotaje bajo cargas considerables.

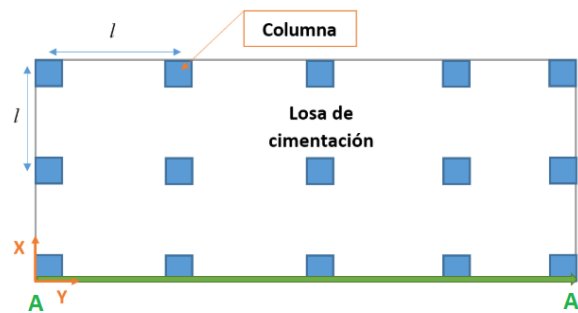


Figura 6. Distribución de las columnas en la losa de cimentación y línea de referencia.

Tabla 3.

Clasificación de las unidades de construcción por categorías. (Tomado de la tabla H.3.1-1, NSR-10)

| Categoría de la unidad de construcción | Según los niveles de construcción | Según las cargas máximas de servicio en columnas (kN) |
|--|-----------------------------------|---|
| Baja | Hasta 3 niveles | Menores de 800 kN |
| Media | Entre 4 y 10 niveles | Entre 801 y 4,000 kN |
| Alta | Entre 11 y 20 niveles | Entre 4,001 y 8,000 kN |
| Especial | Mayor de 20 niveles | Mayores de 8,000 kN |

2.4 Dimensiones del modelo

El dimensionamiento de los límites de la caja externa, donde finalmente queda contenido el modelo, se realizó mediante modelos sencillos con una carga de 200 kN/m^2 sobre una losa de cimentación igual a la ya antes caracterizada. Esto con el fin de encontrar las dimensiones con las cuales el modelo no se ve afectado por las condiciones de los límites del sistema. Como los sondeos para una estructura de este tipo (categoría media, según la NSR 10) llegan hasta los 15 m de profundidad se decidió usar 20 m de profundidad para el modelo, para que este límite no afectará los cálculos del programa. El dimensionamiento del modelo se puede observar en las Figuras 7 y 8.

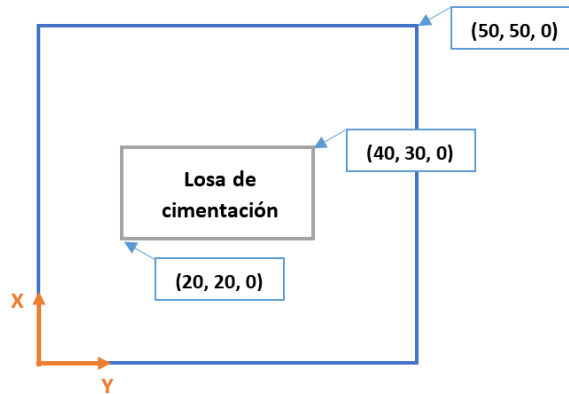


Figura 7. Dimensionamiento del modelo en planta

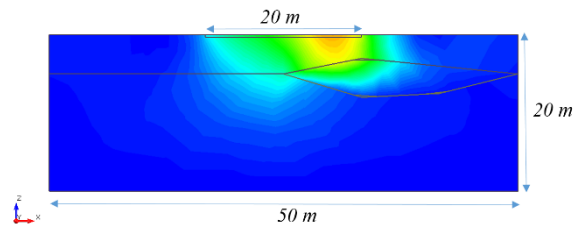


Figura 8. Dimensionamiento del modelo en perfil.

2.5 Nivel freático

El nivel freático se dispuso a 1 m. de profundidad con respecto a la superficie. Esto para asegurar que la arcilla estuviera completamente saturada, y el proceso de consolidación se presentara.

2.6 Micropilotes

El recalce se realizó por medio de micropilotes hincados de profundidad a definir. Se usaron micropilotes tubulares de acero estructural ASTM A36 de 30 GPa con 30 cm de diámetro “d”, tendrán una separación “s” de 0.75m entre ellos, para lograr una relación d/s cercana a 3 como se recomienda (The Constructor, 2018).

2.7 Etapas

Las llamadas etapas serán los momentos de interés donde se analizará el modelo puntualmente. El tiempo de las etapas se definió a los 1, 5, 10, 50, 100, 150 y 200 días. Inicialmente se analizó hasta los 500 días, pero después de los 200 días no se presentaban cambios considerables en los asentamientos, y para que el programa computará de manera óptima se eliminaron las etapas de esos últimos 300 días.

3. Diseño del modelo

El diseño en el software RS3 se realizó mediante varios pasos que se mencionan a continuación:

3.1 Configuración inicial del programa

Acá se seleccionan los diferentes parámetros con el que el software va a operar la información. Como parámetros importantes se seleccionaron las unidades de medida de los diferentes parámetros, los “Stages” que son los instantes de tiempo de interés dentro del modelo y por último los tipos de análisis a usar, en este caso se usarán para las propiedades del suelo el modelo constitutivo de Mohr-Coulomb y para el caso de la consolidación se acopla la teoría de Biot en la resolución del problema. Además, se incluyen las etapas ya definidas. Ver Anexo 1.

3.2 Geometría del modelo

En este paso se realizó la “External box” que albergará todo el modelo, también se realizó la excavación donde se ubicará la losa de cimentación. Como se puede apreciar en el Anexo 2 es necesario en este paso asignar las coordenadas de una primera esquina y posteriormente las coordenadas de la esquina opuesta.

3.3 Propiedades de los suelos y estratificación

Una vez realizados los pasos ya nombrados, se procedió a introducir las anteriormente mencionadas propiedades para cada uno de los dos suelos (Tabla 2). Además, se colocaron los diferentes “Borehole” que funcionan simulando en el modelo una exploración del suelo, ya que en estos se coloca el espesor de cada estrato. En el Anexo 3, como ejemplo, se muestran los espesores que fueron asignados al “Borehole 4”. Por último, se divide la geometría permitiendo que el software interpole y genere el perfil estratigráfico del suelo. Esto se puede apreciar en las Figuras 4 y 5.

3.4 Cimentaciones

Por medio de la herramienta “Liner” se creó la losa de cimentación de dimensiones y características ya definidas. Además, en los modelos en los que son necesarios los micropilotes se realizó el diseño y creación de estos. En el Anexo 4 se muestran las propiedades que se ingresaron para definir el “liner” y la viga que compone a los micropilotes.

3.5 Nivel de agua

El agua es parte fundamental del modelo, ya que esta es necesaria para que la arcilla se consolide. Para esto se ubicó el nivel freático cerca de la superficie y, además, se seleccionó la opción de trascender, esto para que el agua tuviera un comportamiento más realista, permitiendo el cambio en los niveles de esta. Ver Anexo 5.

3.6 Cargas

Sobre la cara superior de la losa de cimentación se asignó la carga anteriormente mencionada de 200 kN/m². Esta carga está aplicada de manera uniforme y durante todas las fases del modelo, como se ve en el Anexo 6.

3.7 Restricciones y malla

Las restricciones se hicieron de forma manual y siguiendo las instrucciones del menú de ayuda del programa. Se colocaron restricciones en las paredes laterales con respecto a cada eje, en las aristas se bloqueó el movimiento en las direcciones X y Y, y en la cara del fondo se usó restricción en las tres direcciones del plano. En la Figura 9 se muestra la disposición de las restricciones del sistema.

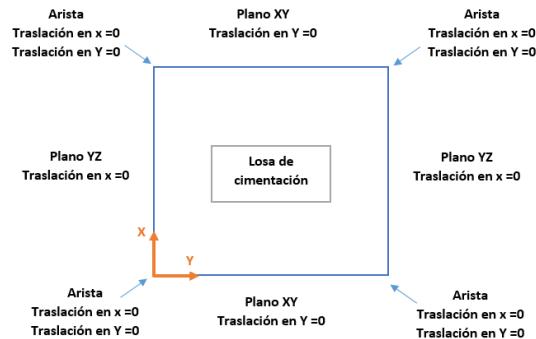


Figura 9. Restricciones del sistema.

Para realizar la malla se usaron tetraedros de cuatro nodos graduados. Sin embargo, para un análisis detallado del área de interés, se refinó la malla de manera tal, que esta se extendiera dos metros respecto a la losa tanto en el eje X como en el Y, usando profundidades de refinamiento de

15 y 13 metros, la primera para los modelos donde se emplearon micropilotes de 13 metros, y la segunda para los demás modelos. En la Figura 10 se puede observar la malla en vista de planta, en el área resaltada se aprecia la malla refinada. Una vez terminado el proceso de crear la malla, se generó como resultado una malla compuesta de más de 50,000 elementos. En el Anexo 7 se presenta otra vista del mallado resultante.

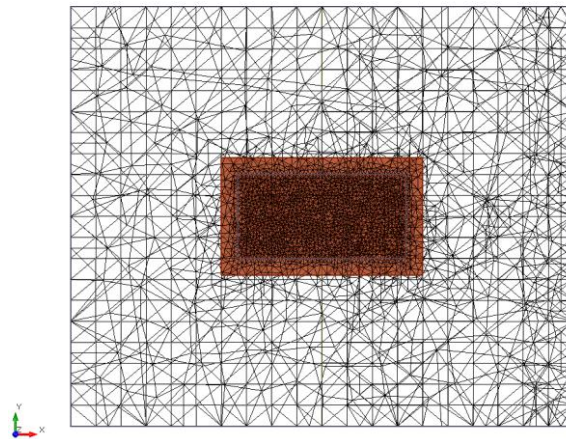


Figura 10. Malla del modelo en vista planta

3.8 Modelos definitivos

En total se realizaron cuatro modelos definitivos, todos con la misma geometría, propiedades de suelo, nivel de agua y cargas. La diferencia se encuentra en la cimentación, estas diferencias se muestran a continuación

3.8.1 Modelo base En este modelo la única cimentación existente es la losa de cimentación. Este se tomó de base comparativa para analizar cómo los diferentes recalces influyen en el cambio

de los asentamientos. En el Anexo 8 se muestra el modelo obtenido del desplazamiento total a los 200 días.

3.8.2 Modelo recalce No. 1 En este modelo se realizó el recalce usando un único grupo de nueve micropilotes de 13m. de longitud como se muestra en la Figura 11. Este recalce se planeó inicialmente con micropilotes a 10m de profundidad, pero se seguían presentando asentamientos diferenciales por lo que se procedió a aumentar su longitud a 13m para obtener los resultados deseados. En el modelo los micropilotes fueron implantados a partir del día 50. En la Figura 12 se puede ver los micropilotes en el modelo, en la Figura 13 la distribución del grupo de micropilotes.

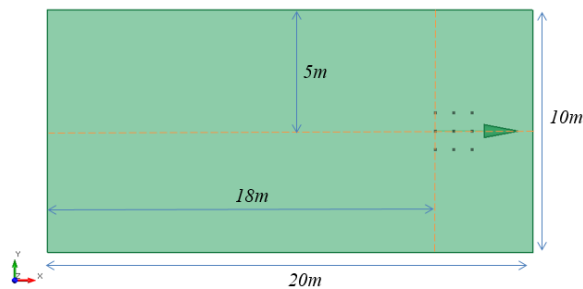


Figura 11. Esquema del “Modelo recalce No. 1”.

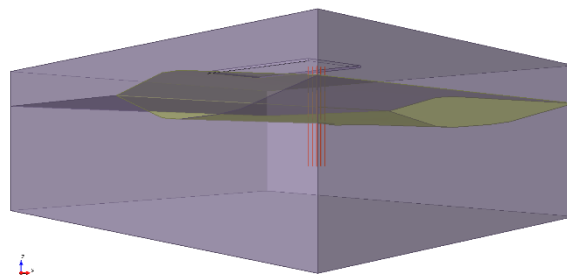


Figura 12. Modelo recalce No. 1. Con un grupo de 9 micropilotes de 13 metros de longitud.

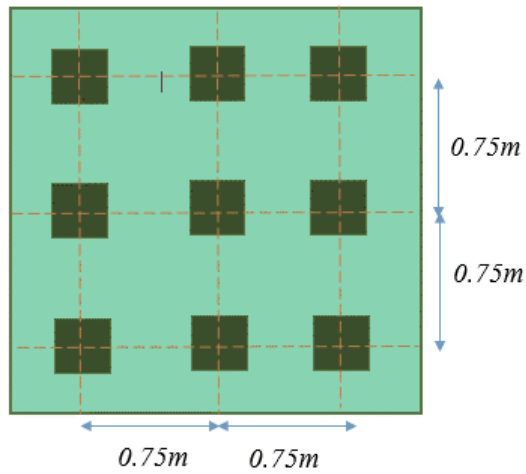


Figura 13. Distribución del grupo de 9 micropilotes.

3.8.3 Modelo recalce No. 2 Este recalce consistió en usar dos grupos de cuatro micropilotes, cada uno dispuesto como se muestra en la Figura 14 a una profundidad de 13m. Al igual que en el modelo anterior, los micropilotes fueron implantados a partir del día 50. En la Figura 15 se aprecia la ubicación de estos y en la Figura 16 la distribución de cada grupo.

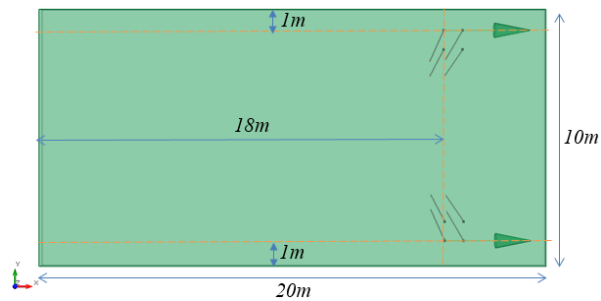


Figura 14. Esquema del "Modelo recalce No. 2".

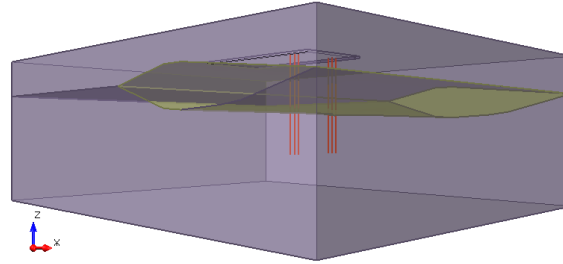


Figura 15. Modelo recalce No. 2. Con dos grupos de micropilotes de 13 metros de longitud.

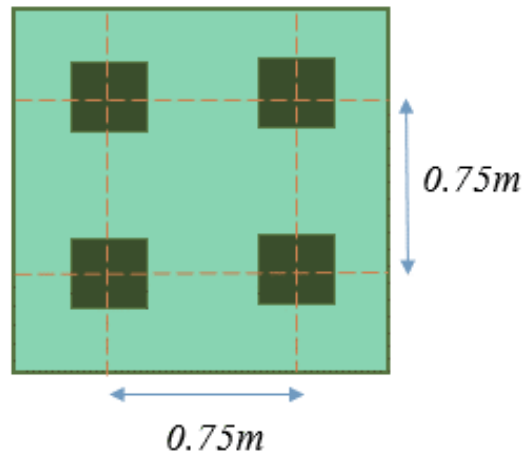


Figura 16. Distribución del grupo de 4 micropilotes.

3.8.4 Modelo recalce No. 3 En el punto anterior se obtuvieron buenos resultados, pero se decidió reducir la profundidad de los micropilotes a 10m para observar si eran capaces o no de disminuir los asentamientos diferenciales. La ubicación fue la misma del modelo anterior (4.8.3) y se implantaron en el día 50 del modelo. La simulación del modelo se observa en la Figura 17.

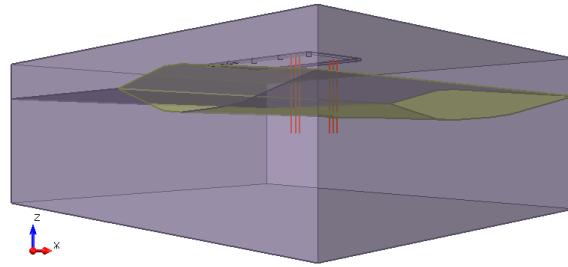


Figura 17. Modelo recalce No. 3. Con dos grupos de micropilotes de 10 metros de longitud.

3.8.5 Modelo cimentación con micropilotaje Por último, se evaluó el caso si la cimentación hubiera contado con los micropilotes desde el primer día. Para esto, se seleccionó el modelo que mejor resultados dio en cuanto a la relación asentamiento-cantidad de pilotes. Para esto se eligió el “Modelo recalce No. 3” del punto 4.8.4.

4. Análisis de Resultados

Los análisis de los asentamientos se realizaron sobre la línea de las columnas en el borde de la losa de cimentación, cada 5m. Dicho esto, los puntos de interés serán 0, 5, 10, 15 y 20 m.

En la primera parte del análisis se decide comprobar los asentamientos de la estructura en cada una de las etapas, ya preestablecidas. Esto se puede ver en la Tabla 3.

Tabla 4.

Asentamientos del modelo base.

| Días \ Dist. (m) | Asentamientos (m) | | | | |
|------------------|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 1 | 0.011 | 0.024 | 0.031 | 0.039 | 0.024 |
| 5 | 0.015 | 0.029 | 0.039 | 0.050 | 0.035 |
| 10 | 0.017 | 0.032 | 0.042 | 0.056 | 0.043 |
| 50 | 0.020 | 0.035 | 0.047 | 0.064 | 0.054 |
| 100 | 0.021 | 0.036 | 0.049 | 0.067 | 0.057 |
| 150 | 0.021 | 0.037 | 0.049 | 0.067 | 0.058 |
| 200 | 0.021 | 0.037 | 0.049 | 0.067 | 0.058 |

Luego se calculó el valor máximo de asentamiento diferencial para esta estructura. Teniendo en cuenta las consideraciones hechas anteriormente se puede decir que esta estructura se cataloga como un caso C, según la Tabla 1, obteniendo como resultado lo siguiente:

$$\Delta Max = \frac{l}{300} = 0.0167 \text{ m}$$

Donde:

ΔMax = Diferencia máxima del asentamiento.

l = Distancia entre columnas o apoyos.

Paso seguido, se calculó la diferencia entre los valores dados entre columnas consecutivas, los resultados están consignados en la Tabla 4, los valores resaltados representan que hay existencia de asentamiento diferencial. Para visualizar con mayor facilidad los resultados de los asentamientos se puede observar la Figura 18, mientras que en la Figura 19 se muestra la diferencia de los asentamientos. Los valores que sobrepasen la línea punteada revelan que se presenta un asentamiento diferencial.

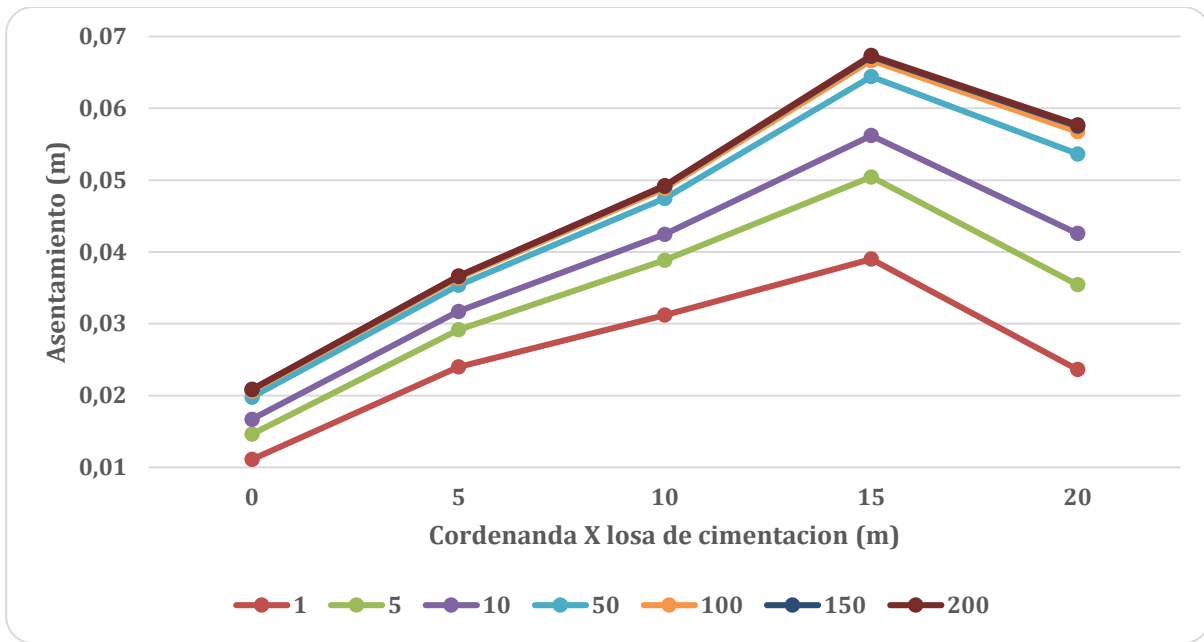


Figura 18. Asentamientos “Modelo base”

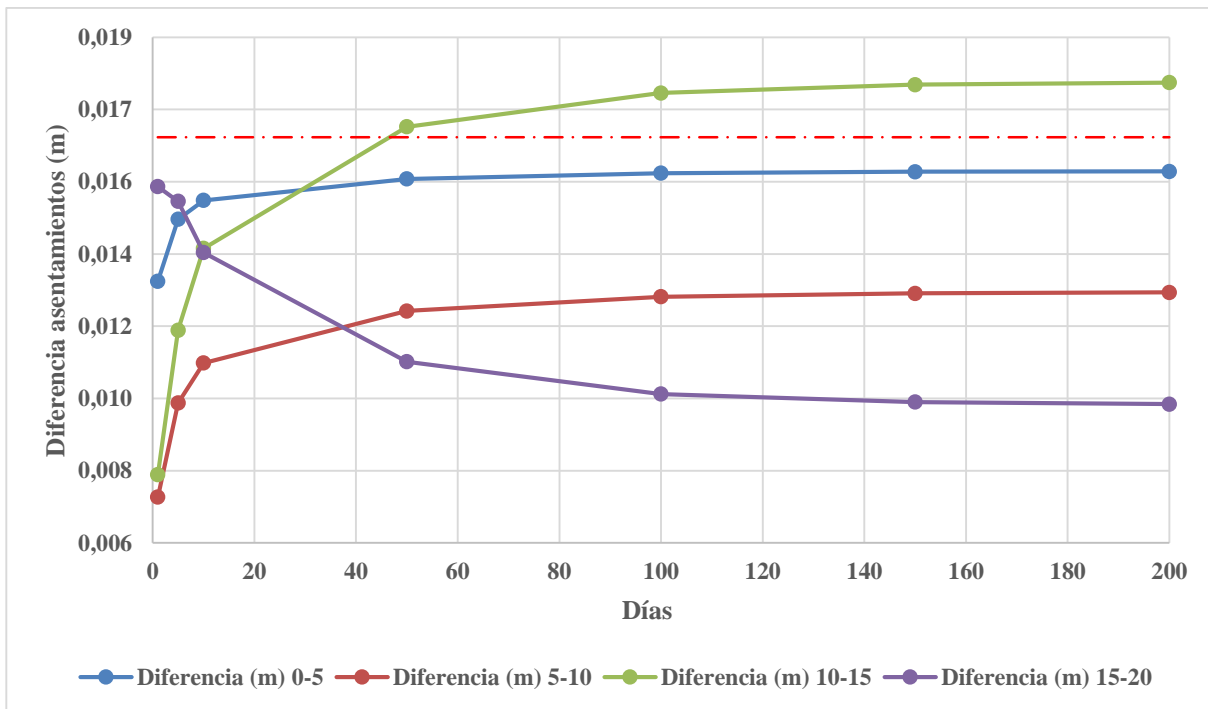


Figura 19. Diferencia de asentamientos “Modelo base”

Tabla 5.

Diferencia asentamientos modelo base.

| Diferencia (m) | | | |
|----------------|-------|-------|-------|
| 0-5 | 5-10 | 10-15 | 15-20 |
| 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 0.013 | 0.007 | 0.008 | 0.015 |
| 0.015 | 0.010 | 0.012 | 0.015 |
| 0.015 | 0.011 | 0.014 | 0.014 |
| 0.016 | 0.012 | 0.017 | 0.011 |
| 0.016 | 0.012 | 0.018 | 0.010 |
| 0.016 | 0.013 | 0.018 | 0.010 |
| 0.016 | 0.013 | 0.018 | 0.010 |

Posteriormente se siguió el mismo proceso para el “Modelo recalce No. 1”, los resultados se encuentran en la Figura 20 y 21.

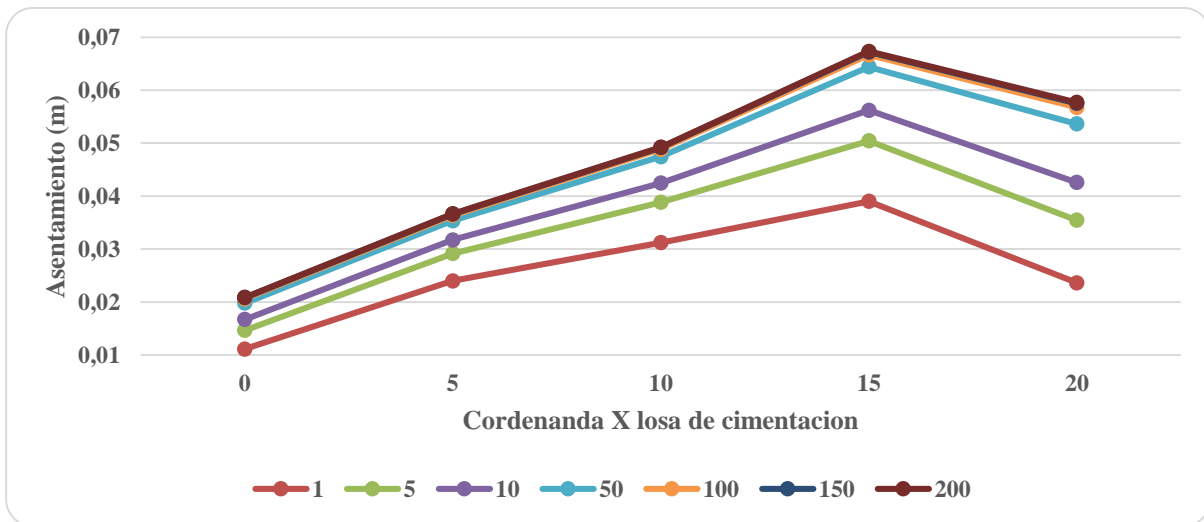


Figura 20. Asentamientos modelo recalce No. 1.

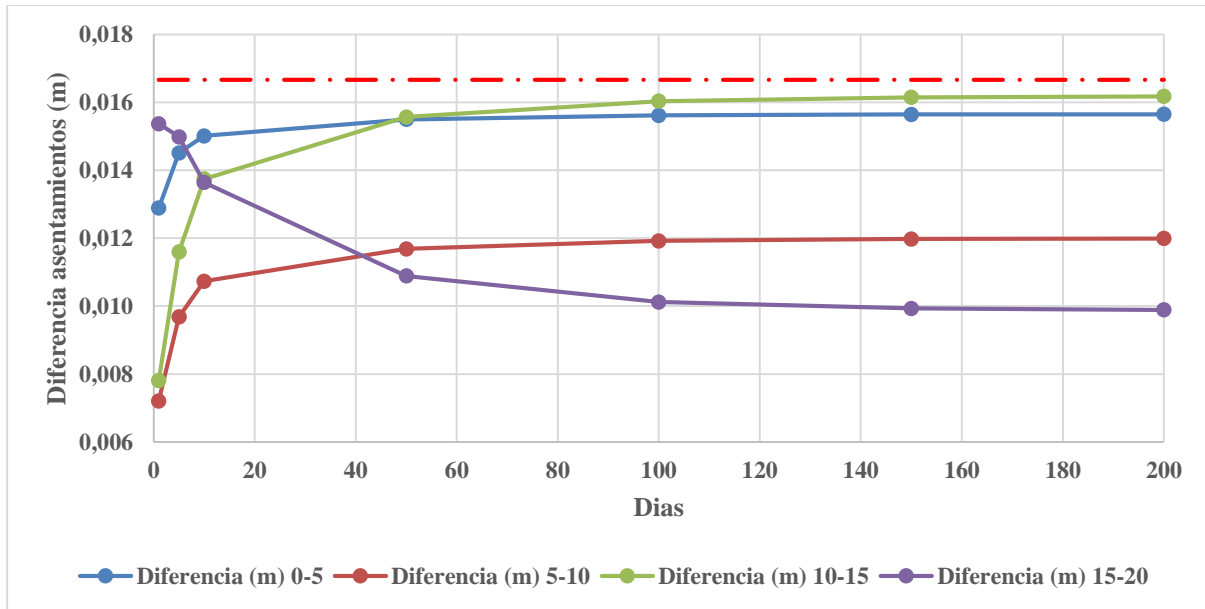


Figura 21. Diferencia asentamientos “Modelo recalce No. 1”.

Como se puede observar, los resultados obtenidos son satisfactorios ya que se logró disminuir los asentamientos y evitar que se presenten asentamientos diferenciales en la edificación, aunque cabe destacar que los resultados están muy cercanos de sobrepasar el mínimo exigido por la NSR-10. Adicional a esto, se compararon los asentamientos presentados a lo largo del tiempo entre el “Modelo base” y el “Modelo recalce No. 1”, como se ve en el Anexo 12.

De igual manera como se hizo con los dos modelos anteriores, en el “Modelo recalce No. 2” se revisaron los asentamientos totales y asentamientos diferenciales en la estructura, los resultados se ven en las Figuras 22 y 23.

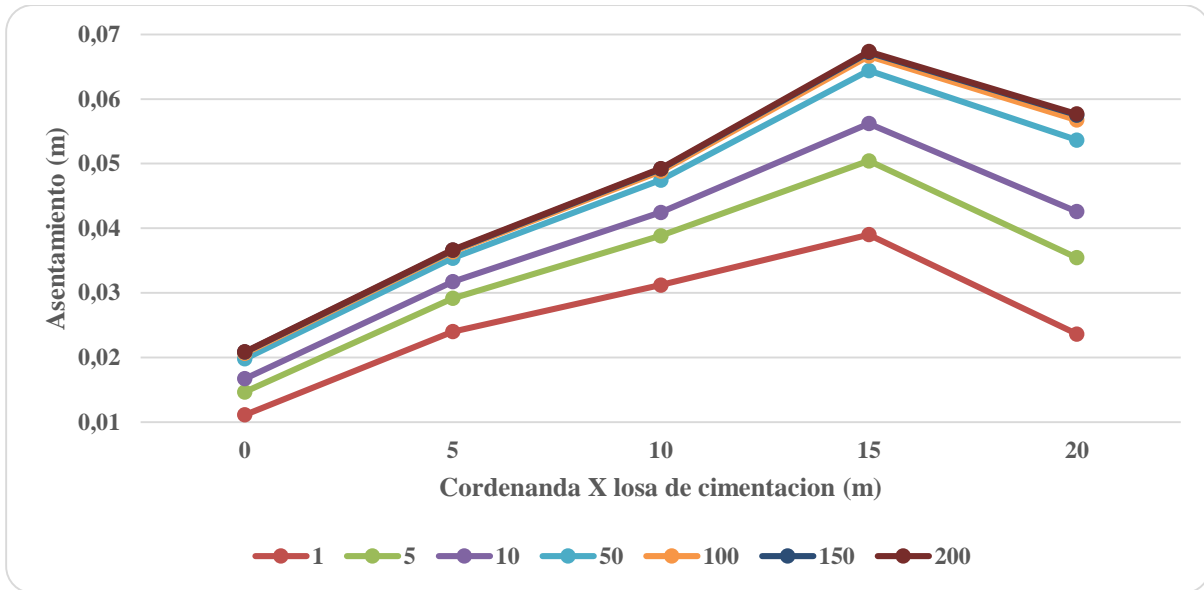


Figura 22. Asentamientos modelo recalce No. 2.

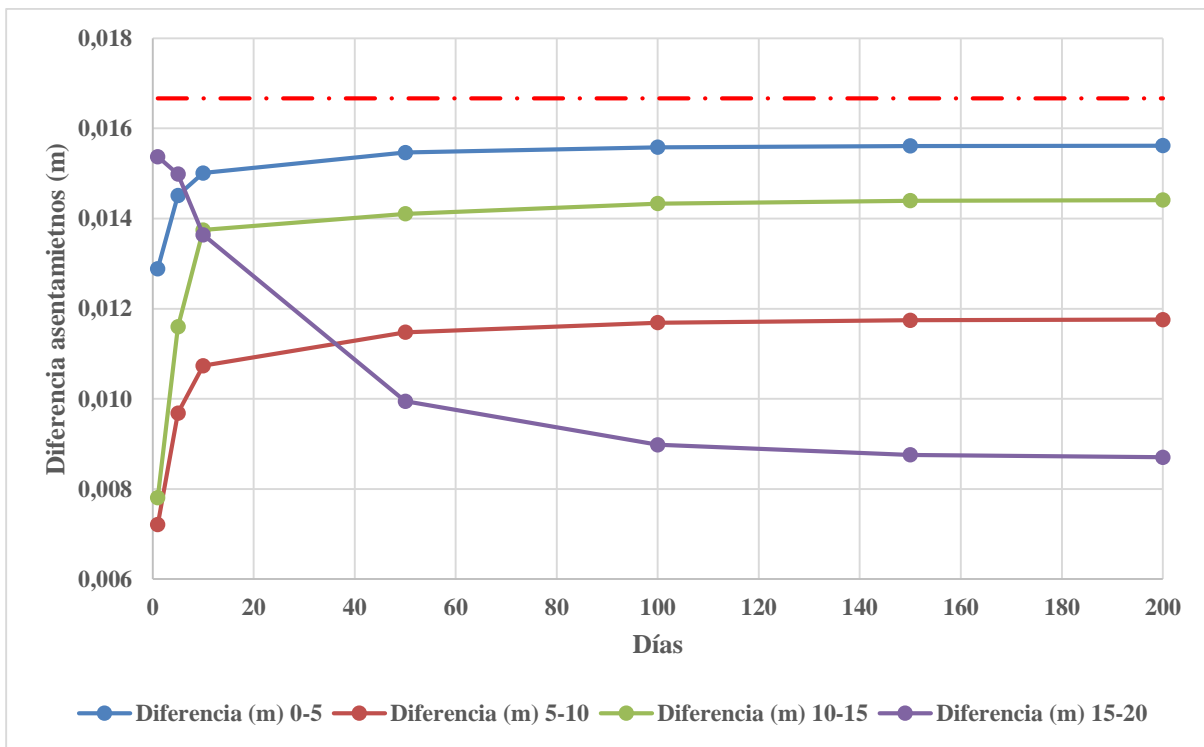


Figura 23. Diferencia asentamientos “Modelo recalce No. 2”.

En este caso los resultados obtenidos fueron aún mejores comparados con los del “Modelo recalce No. 1”, debido a que los asentamientos totales fueron menores y, además, se disminuyeron los asentamientos diferenciales. La comparación entre este modelo y el “Modelo base” se encuentra en el Anexo 14.

En el Anexo anteriormente nombrado se ve de mejor manera cómo disminuyeron los asentamientos con respecto al modelo sin recalce. Como los resultados fueron positivos con esta disposición se disminuye la profundidad de hincado, y a este se le llamó “Modelo recalce No. 3” y los resultados obtenidos se plasmaron en las Figuras 24 y 25.

De este modelo es posible afirmar que se siguen obteniendo resultados positivos, disminuyendo la profundidad de la cimentación, ya que los asentamientos se reducen en buena medida a comparación del “Modelo base”, y los asentamientos diferenciales que se presentan están dentro de los límites permitidos por la norma.

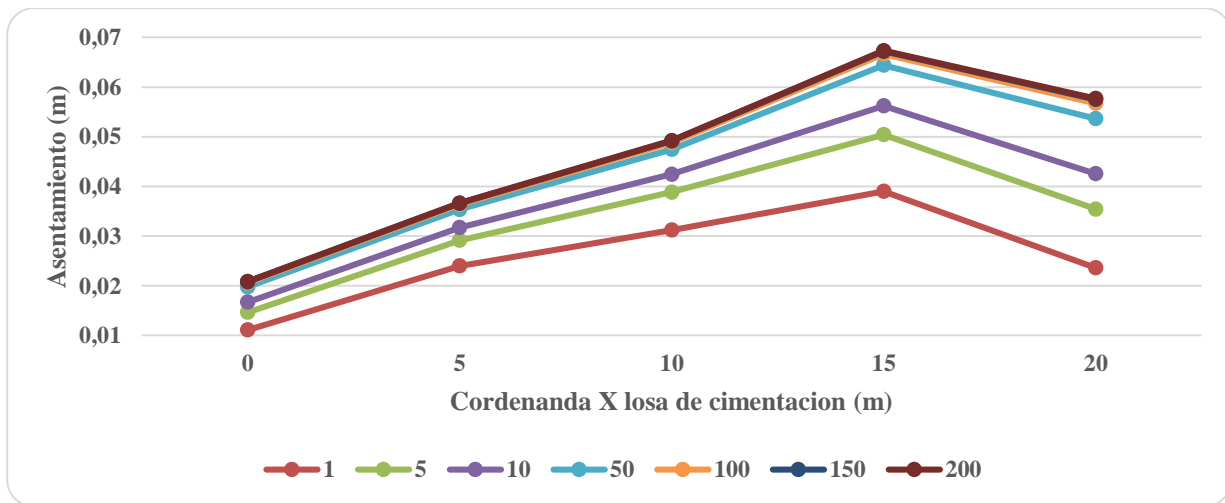


Figura 24. Asentamientos modelo recalce No. 3.

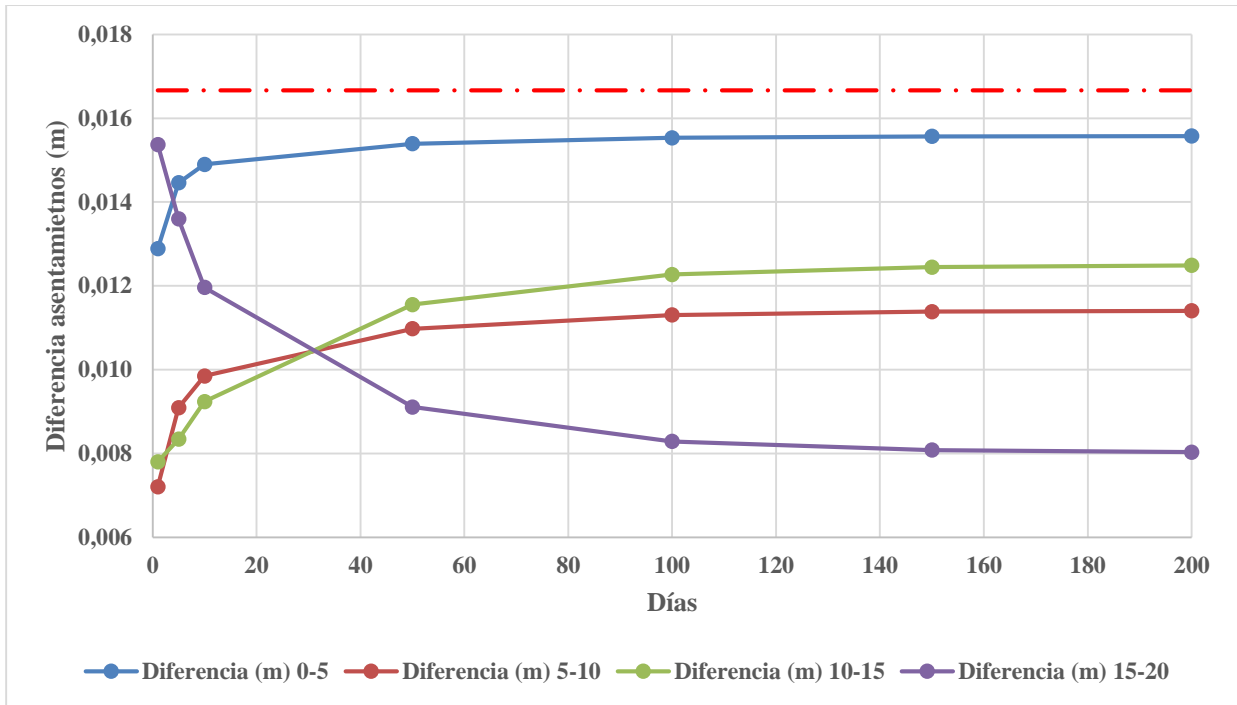


Figura 25. Diferencia asentamientos “Modelo recalce No. 3”.

Del mismo modo que con los otros dos modelos de recalce, éste también se comparó con el “Modelo base” como se ve en el Anexo 16.

Adicional a esto, para finalizar, se analizaron los datos de los asentamientos del “Modelo cimentación con micropilotaje”, como se ve en las Figuras 26 y 27, esto en función de conocer qué tan provechoso pudiera ser si la cimentación se hace compuesta desde el comienzo y no a manera de recalce.

Estos datos se compararon tanto con los del “Modelo base” como con los del “Modelo recalce No.3”. Este proceso se realizó ya que se deseaba conocer cuál es la influencia de los micropilotes dependiendo de su etapa de implantación. En las Figuras 14 y 15 se puede ver la comparación de este último modelo con todos los modelos anteriores. Los datos de este modelo comparados con los del “Modelo base se encuentran en el Anexo 18.

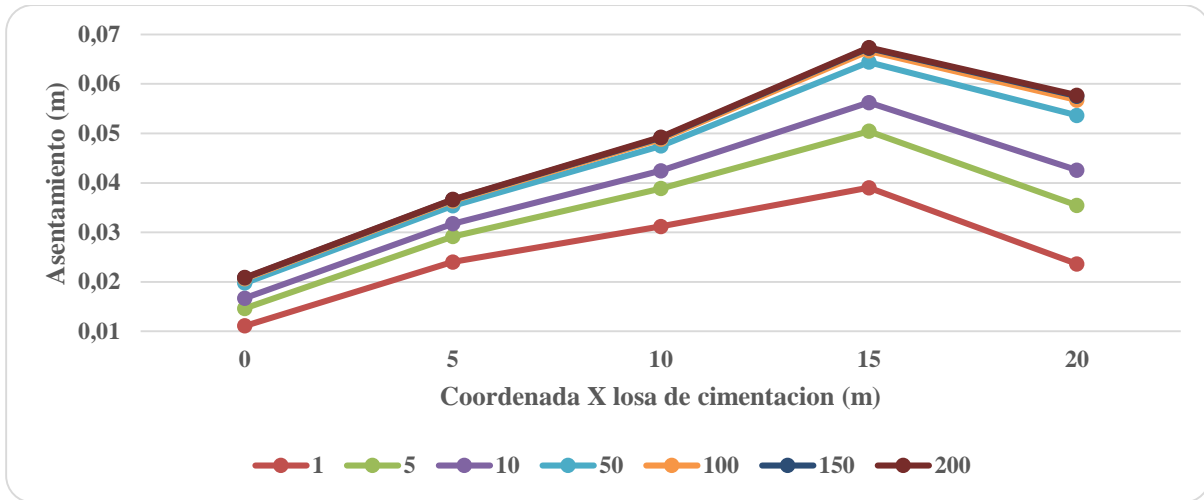


Figura 26. Asentamientos “Modelo cimentación con micropilotaje”.

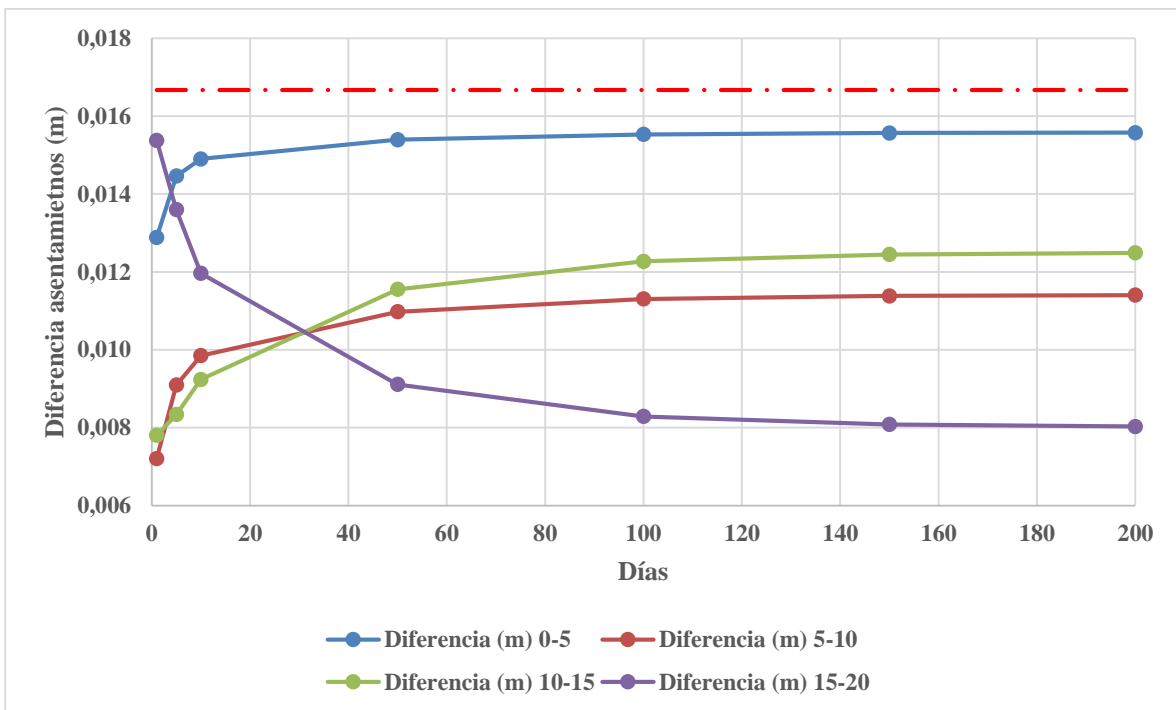


Figura 27. Diferencia asentamientos “Modelo cimentación con micropilotaje”.

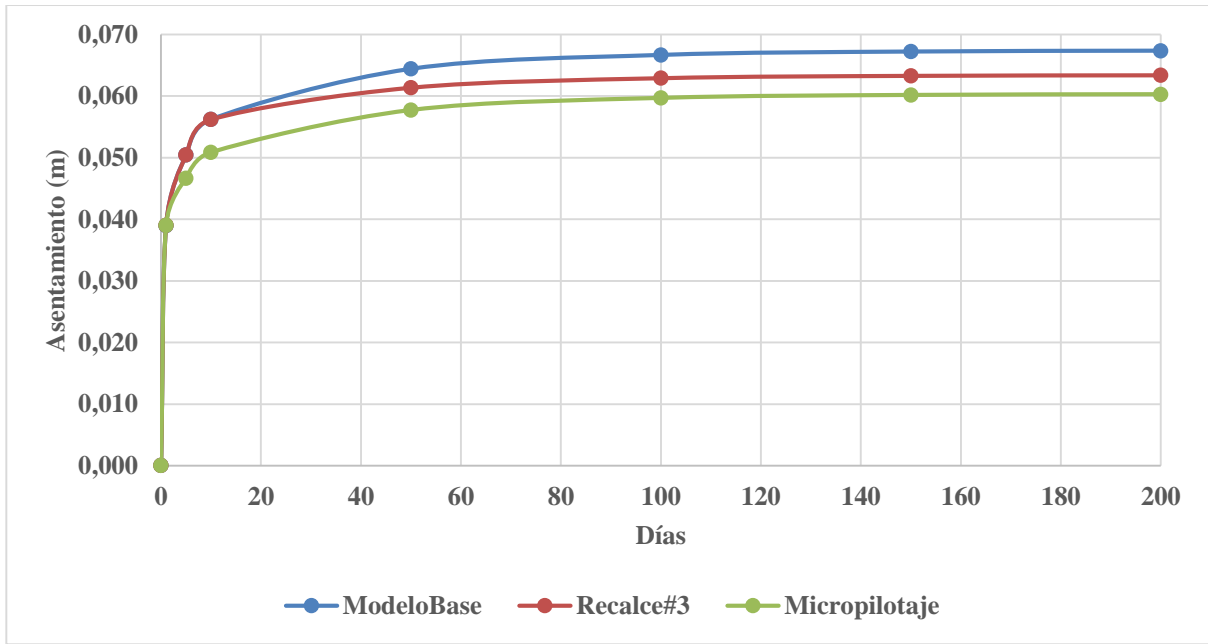


Figura 28. Asentamientos de modelos “Base”, “Recalce No. 3” y “Cimentación con micropilotaje” a 15 m.

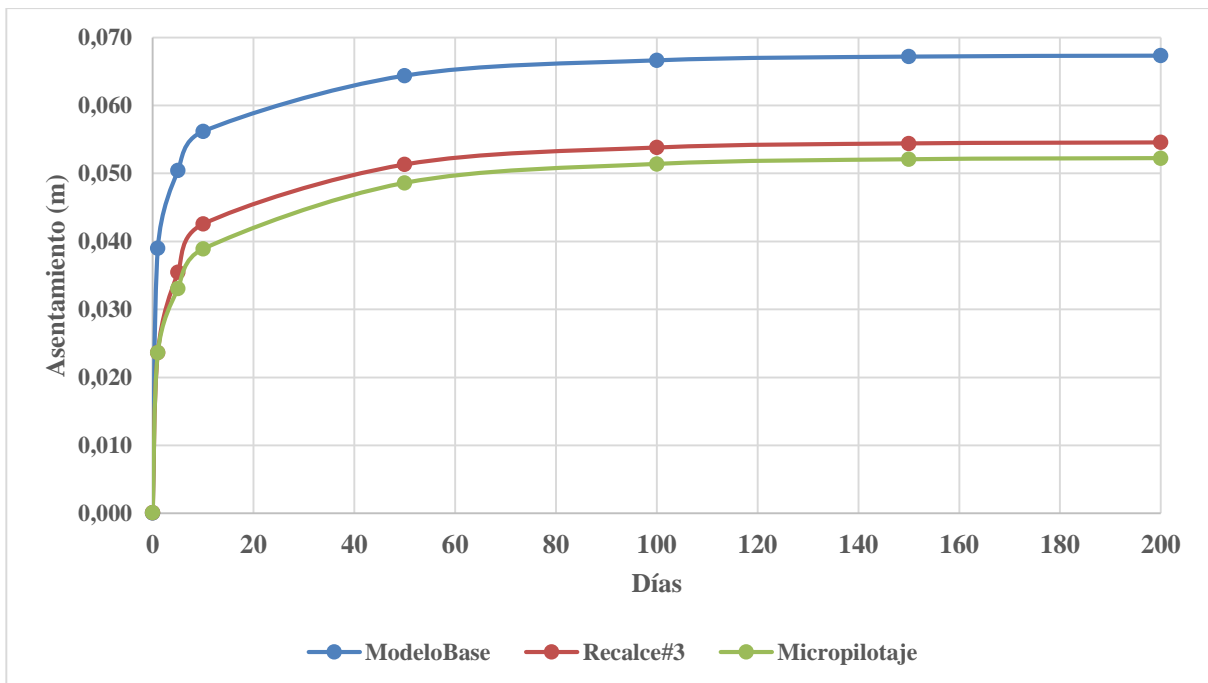


Figura 29. Asentamientos de modelos “Base”, “Recalce No. 3” y “Cimentación con micropilotaje” a 20 m.

Como se puede apreciar, se observa una considerable disminución en los asentamientos totales. Además, no se presentan asentamientos diferenciales que superen los permitidos por la NSR-10.

En resumen, se obtienen los resultados consignados en la Tabla 5, dichos resultados son los asentamientos calculados para la etapa final del modelo, es decir para el día 200. Para finalizar se calculo el porcentaje de disminución del asentamiento medido con respecto a los asentamientos del “Modelo base” como se puede ver en la Tabla 6.

Tabla 6.

Asentamientos finales.

| Modelo C. losa (m) | Base | Recalce No.1 | Recalce No.2 | Recalce No.3 | Micropilotaje |
|-----------------------------------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| 0 | 0.021 | 0.021 | 0.021 | 0.021 | 0.021 |
| 5 | 0.037 | 0.036 | 0.036 | 0.037 | 0.036 |
| 10 | 0.049 | 0.048 | 0.048 | 0.048 | 0.048 |
| 15 | 0.067 | 0.065 | 0.063 | 0.063 | 0.06 |
| 20 | 0.058 | 0.055 | 0.054 | 0.055 | 0.052 |

Tabla 7.

Porcentaje de disminución de asentamientos en los modelos con respecto al “Modelo base”.

| Modelo C. losa (m) | Recalce No.1 | Recalce No.2 | Recalce No.3 | Micropilotaje |
|-----------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| 0 | 0.00% | 0.00% | 0.00% | 0.00% |
| 5 | -2.70% | -2.70% | 0.00% | -2.70% |
| 10 | -2.04% | -2.04% | -2.04% | -2.04% |
| 15 | -2.99% | -5.97% | -5.97% | -10.45% |
| 20 | -5.17% | -6.90% | -5.17% | -10.34% |

5. Conclusiones

A partir de los modelos realizados en esta investigación por el método de elementos finitos (FEM), es posible afirmar que es posible usar micropilotes como sistema de recalce para mitigar asentamientos en una estructura.

De un buen estudio de suelos y buena caracterización de estos, es posible realizar un mejor diseño de la cimentación, como en este caso se pudo observar que usando los micropilotes desde el primer día de la simulación se lograron disminuir los asentamientos en el área de aplicación hasta casi el doble a comparación de si se implantaran dichos pilotes en el día 50 cuando ya se habían presentado asentamientos en el terreno.

Por otra parte, se puede ver que la disposición de los micropilotes juega un papel más importante que la profundidad a la que se hincan, ya que comparando los modelos “Recalce No.2” y “Recalce No.3” donde solo se cambio la profundidad su cambio fue mínimo. A diferencia de cuando se compararon “Recalce No.1” y “Recalce No. 2” donde se cambió la disposición y no la profundidad los cambios en la profundidad fueron notorios.

Por último, es posible concluir que los micropilotes solo disminuyen asentamientos cerca de su lugar de aplicación, ya que estos siempre fueron aplicados en una distancia cercana a los 16m medida desde el borde de la losa y su efecto, con respecto a los asentamientos, en el punto 0m de la losa fue nulo.

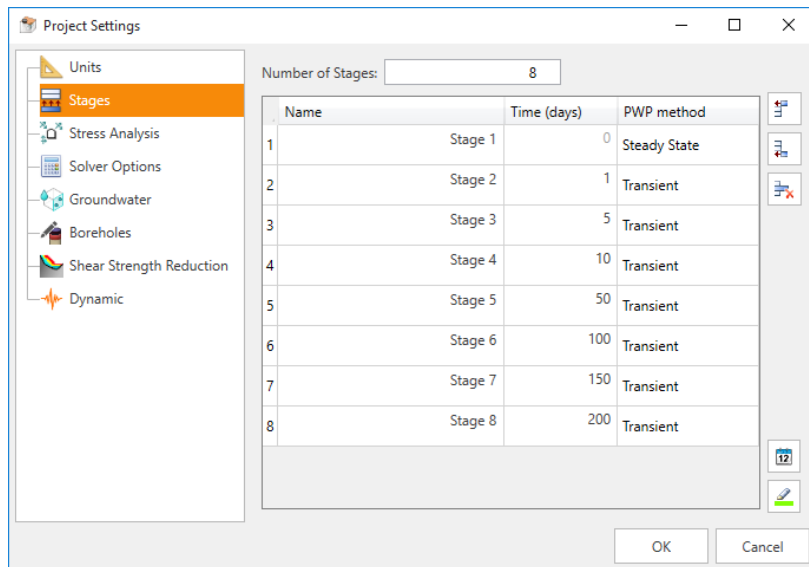
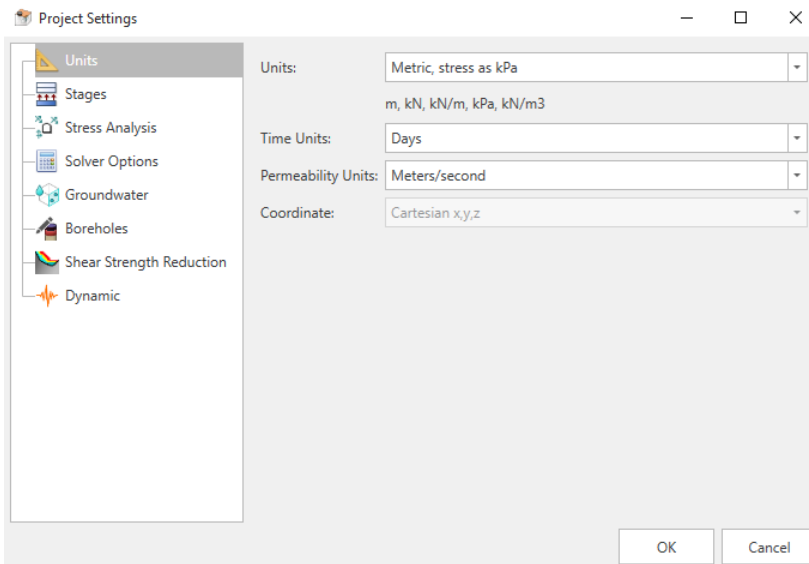
Referencias Bibliográficas

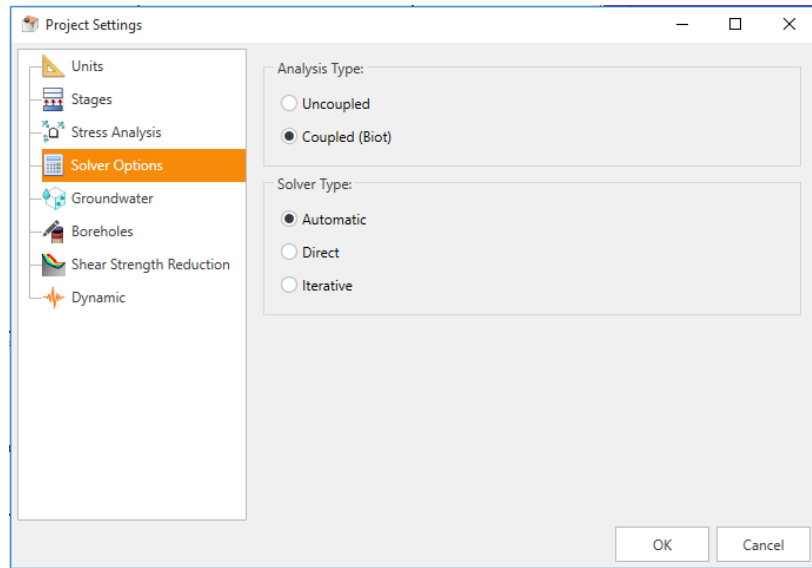
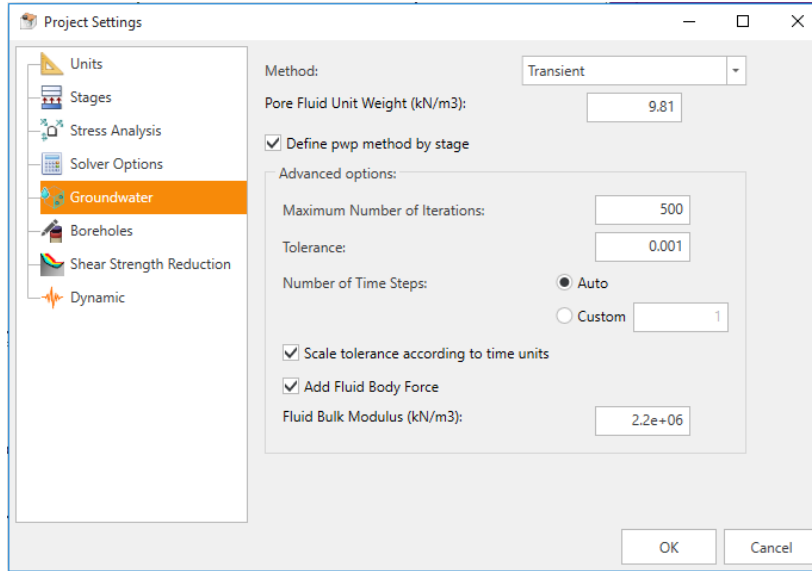
- AIS, Asociación colombiana de ingeniería sísmica. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/ring/n32/n32a4>
- Auvinet, G. (sf). *Riesgos geotécnicos para la construcción de vivienda en el valle de México*. Recuperado de http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/si/si_04/te_01/ar_06.pdf
- Ayala, F. (2009). *Método para determinar el modelo del suelo no homogéneo y sus parámetros, por medio de algoritmos genéticos, para el diseño de sistemas de puesta a tierra* (Tesis de magíster). Universidad Nacional de Colombia
- Biot, M., (February 1941). General Theory of Three- Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12, 155-164.
- Bruce, D., DiMillio, A., and Juran, I. (1997). Micropiles: the state of practice Part 1: Characteristics, definitions and classifications. *Ground Improvement*, 1 (1), 25-35. Recuperado de <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/abs/10.1680/gi.1997.010104>
- Das, B., (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*, México DF, México: Cengage Learning.
- Garza, L. (2004). *Diseño y construcción de cimentaciones*. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/39943/1/87065626.20043.pdf>
- Lorente Fernández, R. (2013). *Ejecución de micropilotes en recalce de cimentaciones*. Recuperado de <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/3690/tfg%20304.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Merxhani, A. (2016). An introduction to linear poroelasticity. *ArXiv*, 1607, 04274. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/1607.04274.pdf>
- Peck, R., Hanson, W., y Thornburn, T., (1983). *Ingeniería de Cimentaciones*, México DF, México: Editorial Limusa.
- Rojas, C., (2017). *Análisis y correlación de pruebas de carga sobre micropilotes y tres metodologías usadas para calcular la capacidad de carga axial a compresión* (tesis de maestría). Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/61118/1/80040322.2017.pdf>
- Romana, M., (Junio de 2003). Micropilotes Uso en recalces. *II curso sobre Recalces, Inclusiones, Inyecciones y Jet-Grouting*. Conferencia llevada a cabo en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Valencia, Valencia, España.
- The Constructor. (2018). *Pile Foundation Spacing and Skin Friction in Pile Group Construction*. Recuperado de <https://theconstructor.org/geotechnical/pile-foundation-spacing-skin-friction-group/17100/>
- Verruijt A. (1995) Theory of Consolidation. In: *Computational Geomechanics. Theory and Applications of Transport in Porous Media*, vol 7. Springer, Dordrecht. Recuperado de https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-1112-8_2#citeas

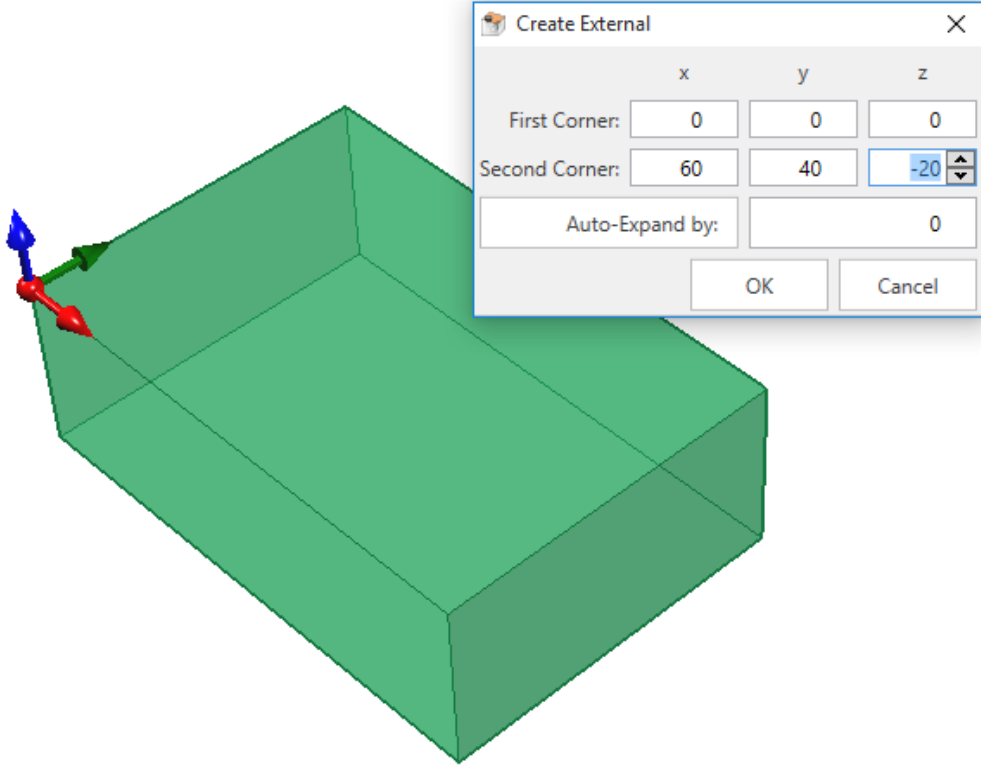
Apéndices

Apéndice A. Propiedades del Proyecto

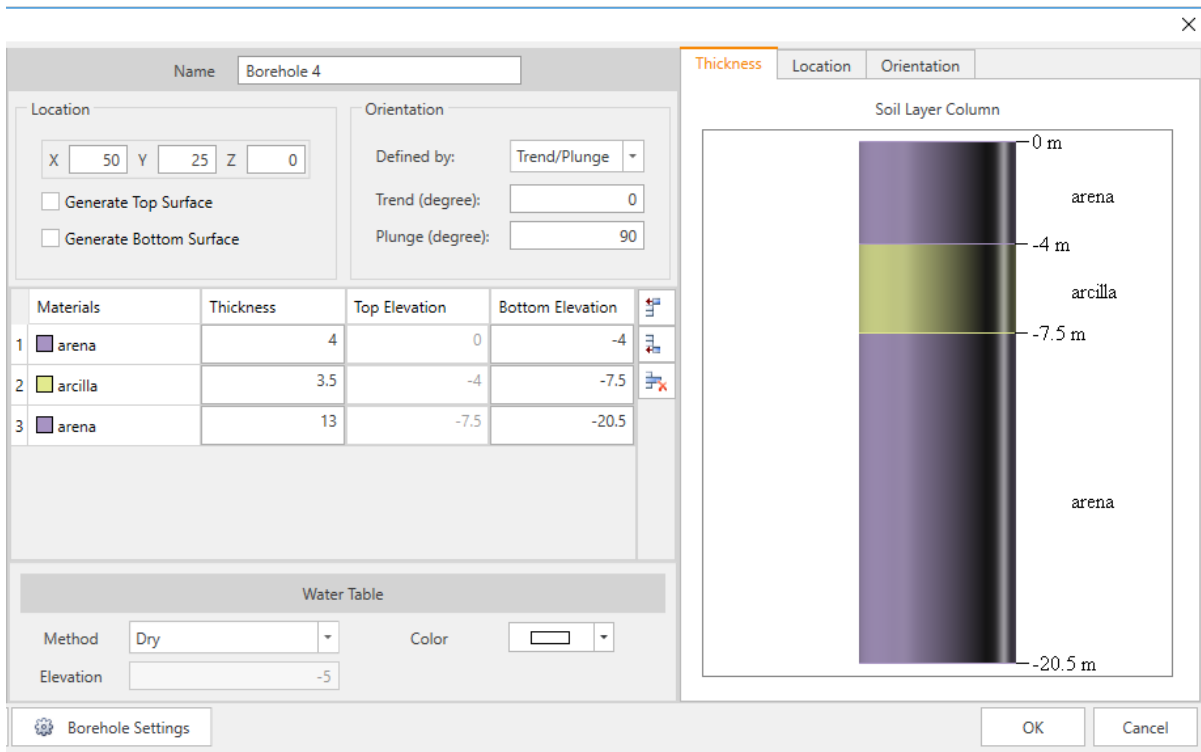




Apéndice B. Dimensionamiento “External Box”



Apéndice C. Espesores de Estratos del “Borehole 4”



Apéndice D. Propiedades “Liner” y Viga que compone al micropilote

Liner Properties

Name:

Liner Layer Type:

Strength Parameters

Material Type: Elastic Plastic

Include weight in analysis

Reinforcement

Spacing (m):

Section Depth (m):

Area (m²):

Moment of Inertia (m⁴):

Young's Modulus (kPa):

Poissons Ratio:

Shear Strength (kPa):

Compressive Strength (kPa):

Tensile Strength (kPa):

Unit Weight (kN/m³):

Concrete

Concrete

Thickness (m):

Young's Modulus (kPa):

Poisson's Ratio:

Shear Strength (kPa):

Compressive Strength (kPa):

Tensile Strength (kPa):

Unit Weight (kN/m³):

Stage Reinforced Concrete Liner Properties

+

OK Cancel

Beam Properties

Name:

Beam Type:

Elastic Properties

Young's Modulus (kPa):

Poisson's Ratio:

Strength Parameters

Material Type: Elastic Plastic

Shear Strength (kPa):

Compressive Strength (peak) (kPa):

Compressive Strength (residual) (kPa):

Tensile Strength (peak) (kPa):

Tensile Strength (residual) (kPa):

Stage Beam Properties

Geometry

Area (m²):

I-min (m⁴):

I-max (m⁴):

Include Weight in Analysis

Unit Weight (kN/m³):

Pre-Tensioning

Pre-Tensioning Force (kN):

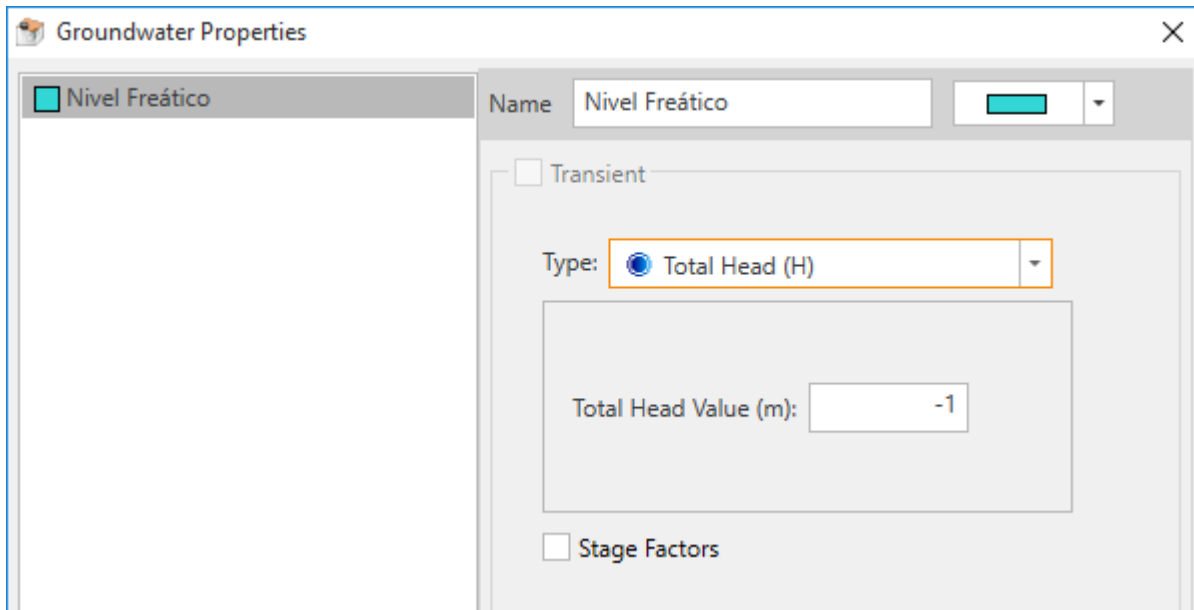
Mesh conforming

Element Formulation

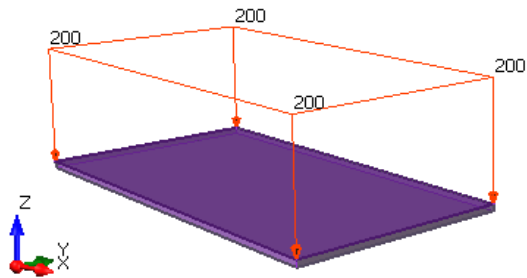
+

OK Cancel

Apéndice E. Nivel freático



Apéndice F. Carga sobre la losa de cimentación



Edit Load

Name: Face Load

Load Type: Uniform Load

Attached To: Solid Material

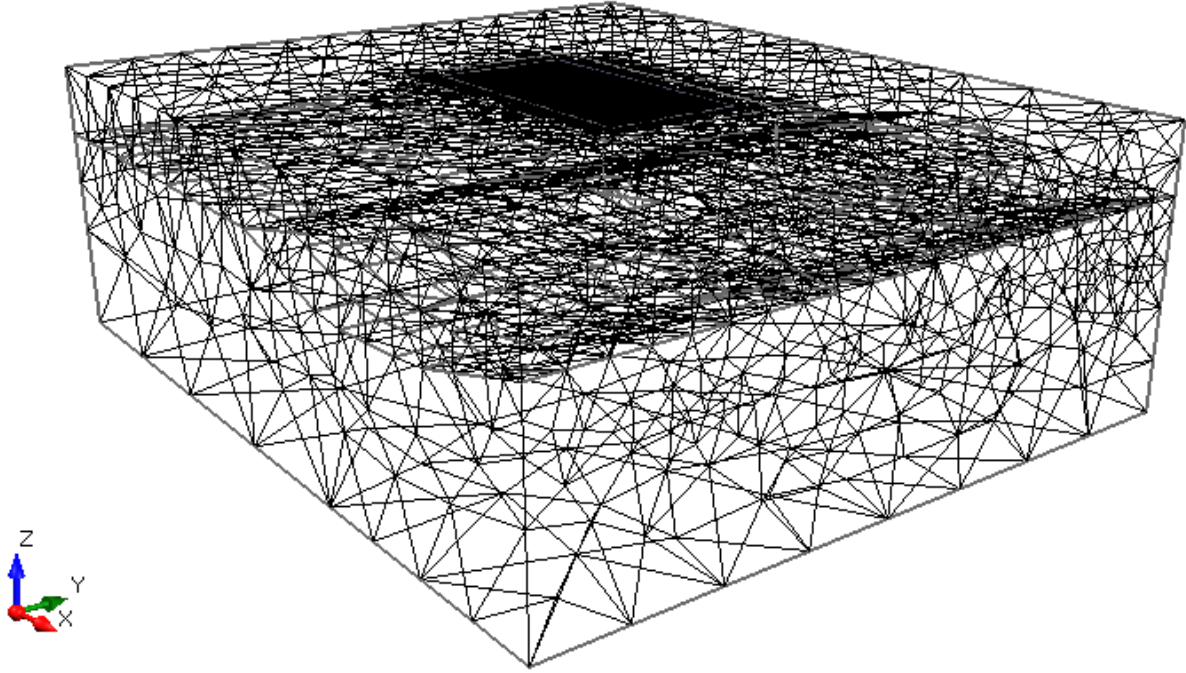
Magnitude: 200 (kN/m²)

Orientation: Normal

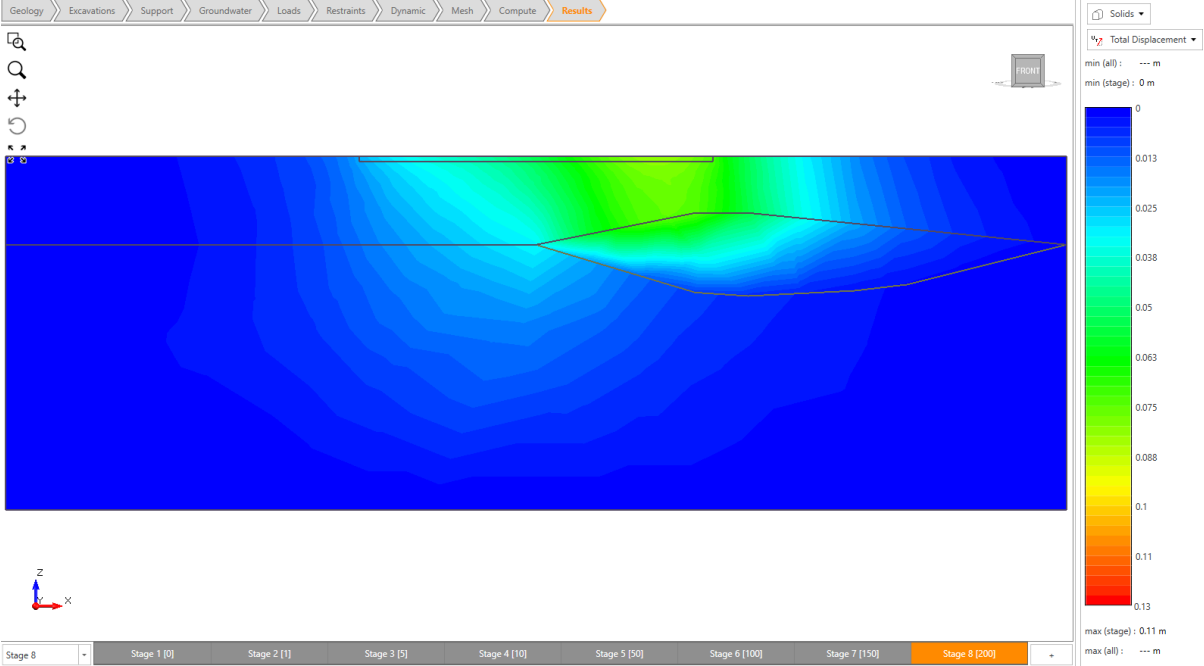
Staging: Install at stage: Stage 2, Remove at stage: Never

Apply Cancel

Apéndice G. Mallado del modelo.



Apéndice H. Desplazamiento total a los 200 días “Modelo Base”

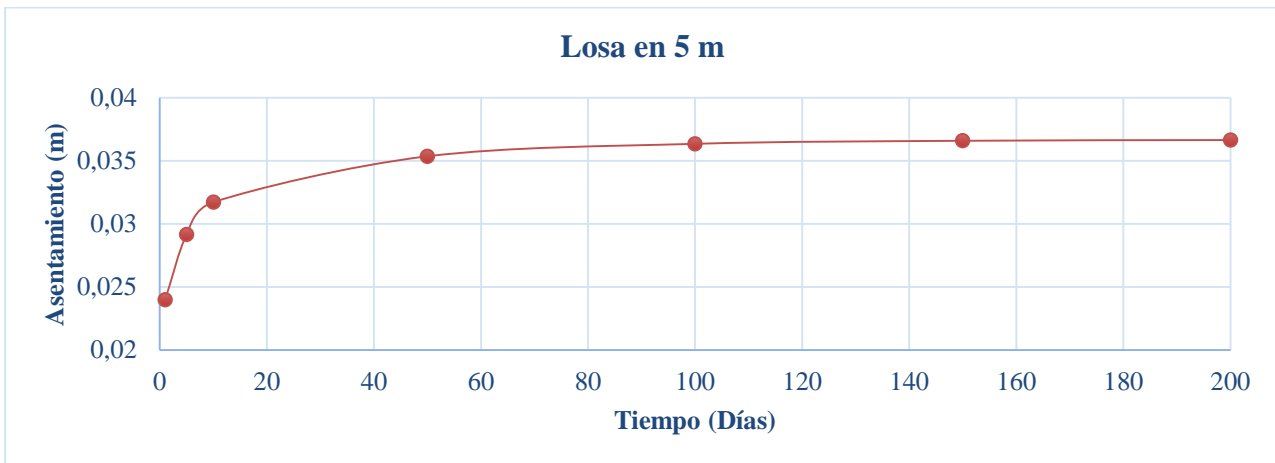


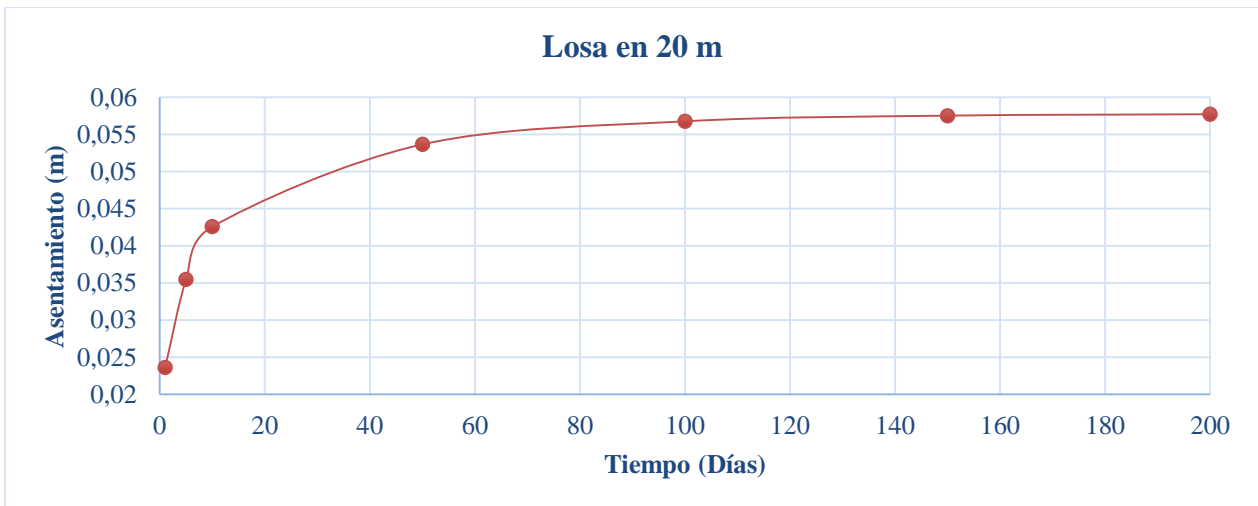
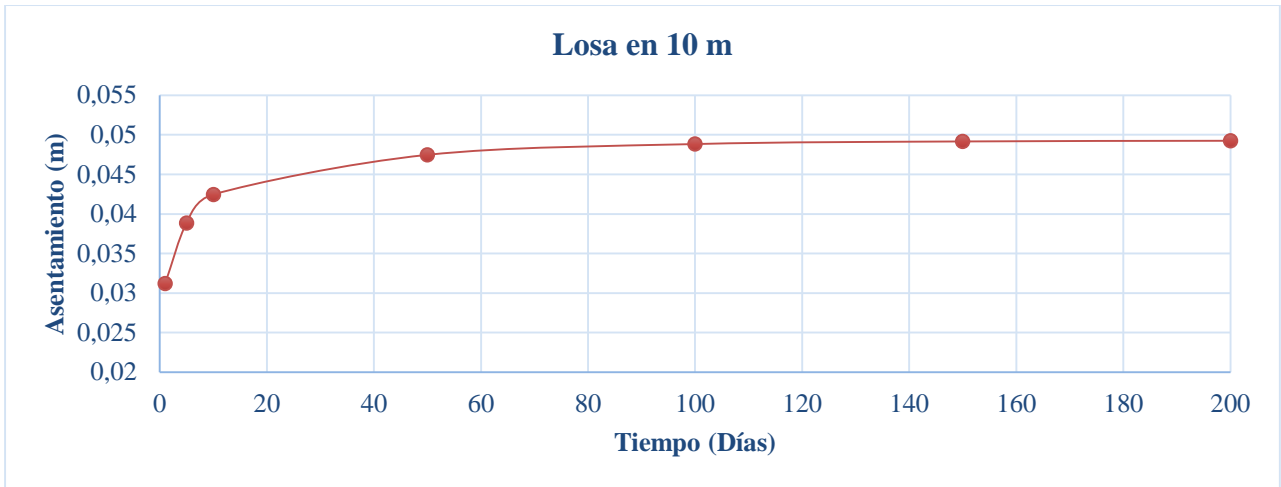
Apéndice I. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo base”

| SIN MICROPILOTES | | Días | | | | | | | |
|------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Distancia (m) | 0 | 0.000 | 0.011 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.021 | 0.021 | 0.021 |
| | 5 | 0.000 | 0.024 | 0.029 | 0.032 | 0.035 | 0.036 | 0.037 | 0.037 |
| | 10 | 0.000 | 0.031 | 0.039 | 0.042 | 0.047 | 0.049 | 0.049 | 0.049 |
| | 15 | 0.000 | 0.039 | 0.050 | 0.056 | 0.064 | 0.067 | 0.067 | 0.067 |
| | 20 | 0.000 | 0.024 | 0.035 | 0.043 | 0.054 | 0.057 | 0.058 | 0.058 |

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Diferencia (m) | 0-5 | 0.000 | 0.013 | 0.015 | 0.015 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
| | 5-10 | 0.000 | 0.007 | 0.010 | 0.011 | 0.012 | 0.012 | 0.013 | 0.013 |
| | 10-15 | 0.000 | 0.008 | 0.012 | 0.014 | 0.017 | 0.018 | 0.018 | 0.018 |
| | 15-20 | 0.000 | 0.015 | 0.015 | 0.014 | 0.011 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |

Apéndice J. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base”



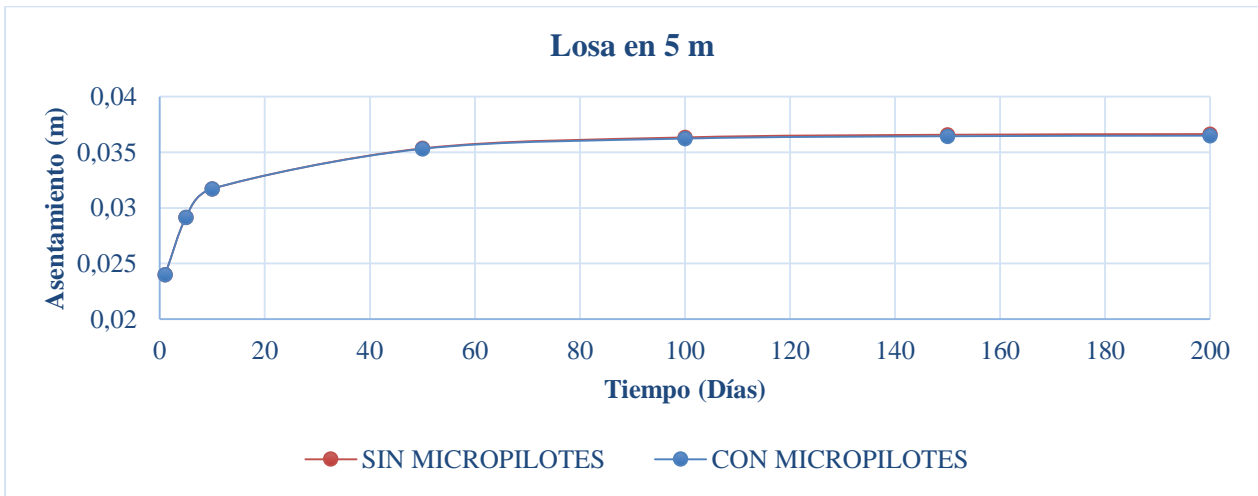
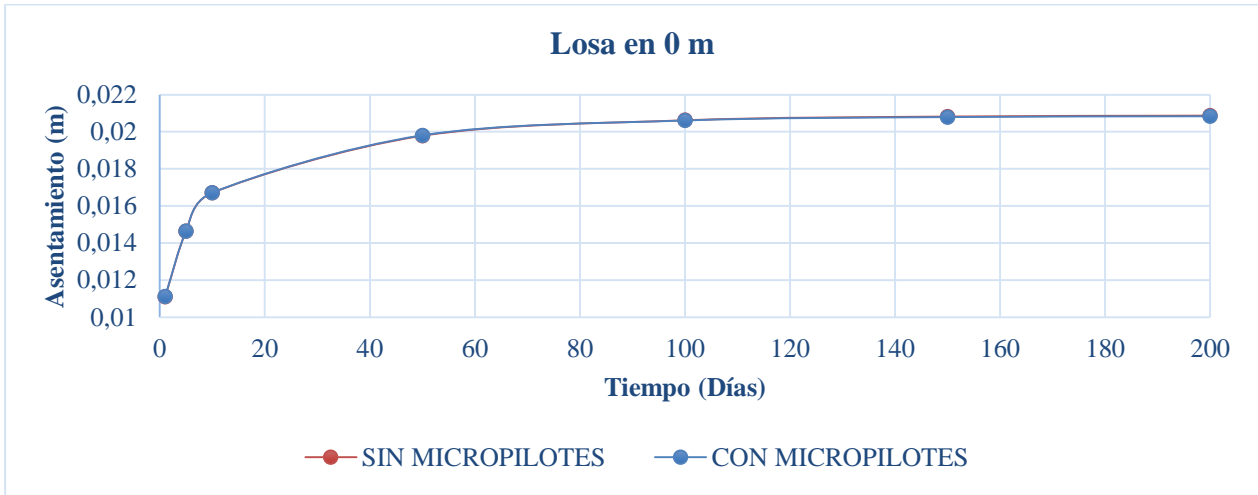


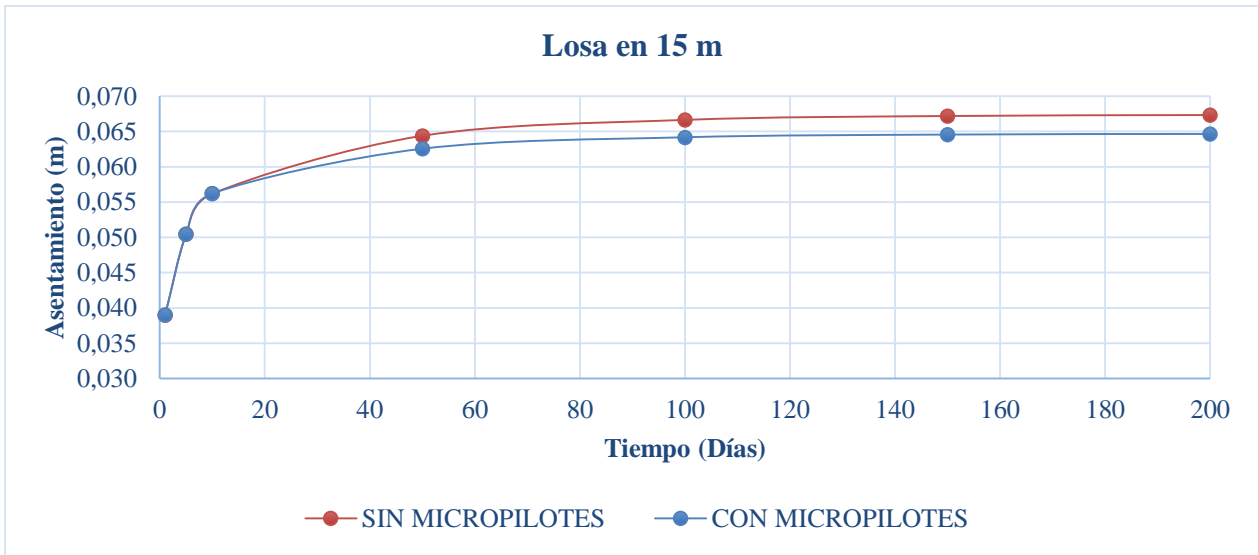
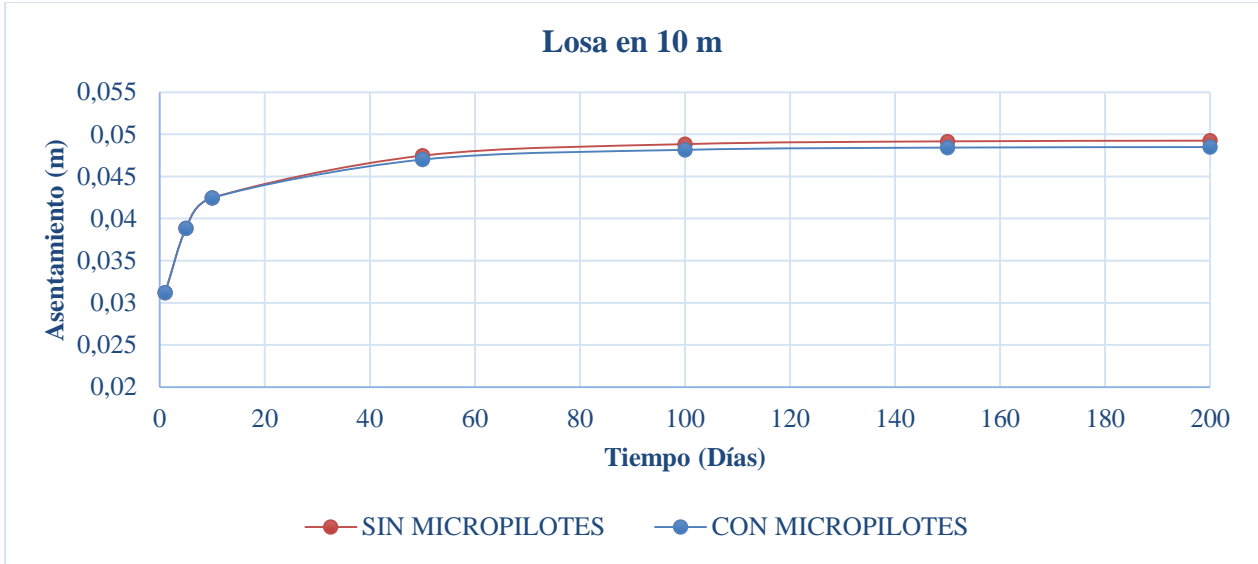
Apéndice K. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo recalce No1”

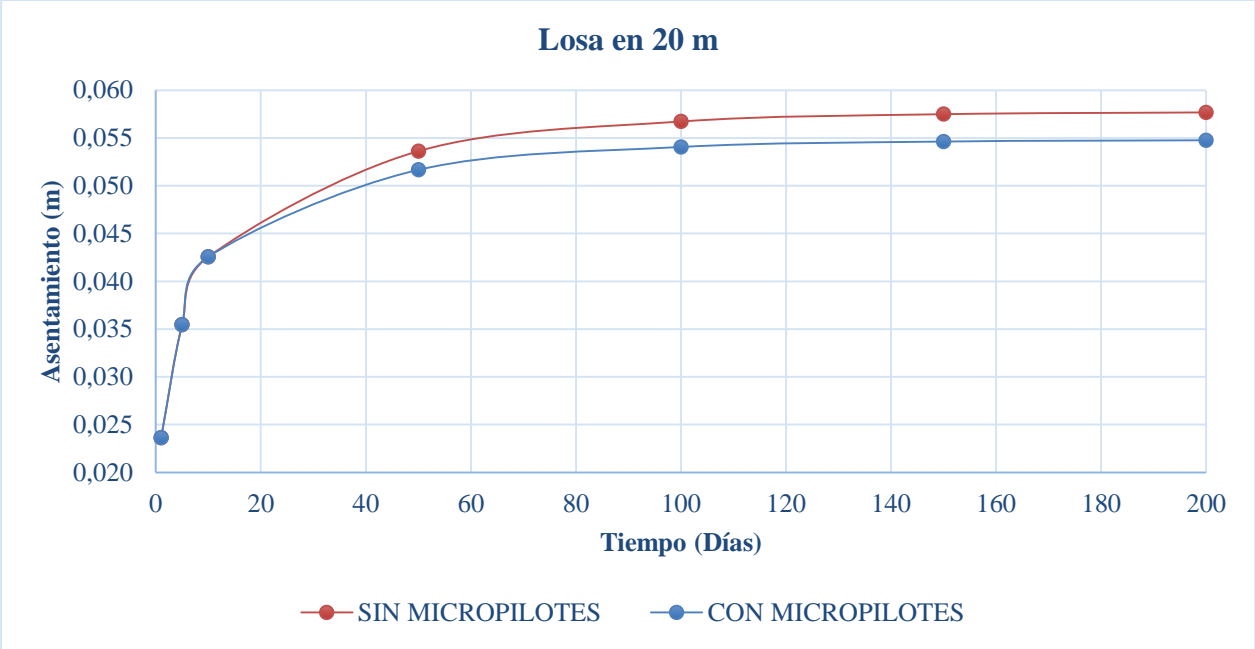
| CON MICROPILOTES | | Días | | | | | | | |
|------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Distancia (m) | 0 | 0.000 | 0.011 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.021 | 0.021 | 0.021 |
| | 5 | 0.000 | 0.024 | 0.029 | 0.032 | 0.035 | 0.036 | 0.036 | 0.036 |
| | 10 | 0.000 | 0.031 | 0.039 | 0.042 | 0.047 | 0.048 | 0.048 | 0.048 |
| | 15 | 0.000 | 0.039 | 0.050 | 0.056 | 0.063 | 0.064 | 0.065 | 0.065 |
| | 20 | 0.000 | 0.024 | 0.035 | 0.043 | 0.052 | 0.054 | 0.055 | 0.055 |

| CON MICROPILOTES | | Días | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Diferencia (m) | 0-5 | 0.000 | 0.013 | 0.015 | 0.015 | 0.015 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
| | 5-10 | 0.000 | 0.007 | 0.010 | 0.011 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| | 10-15 | 0.000 | 0.008 | 0.012 | 0.014 | 0.016 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
| | 15-20 | 0.000 | 0.015 | 0.015 | 0.014 | 0.011 | 0.010 | 0.010 | 0.010 |

Apéndice L. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base” vs “Modelo recalce No1”





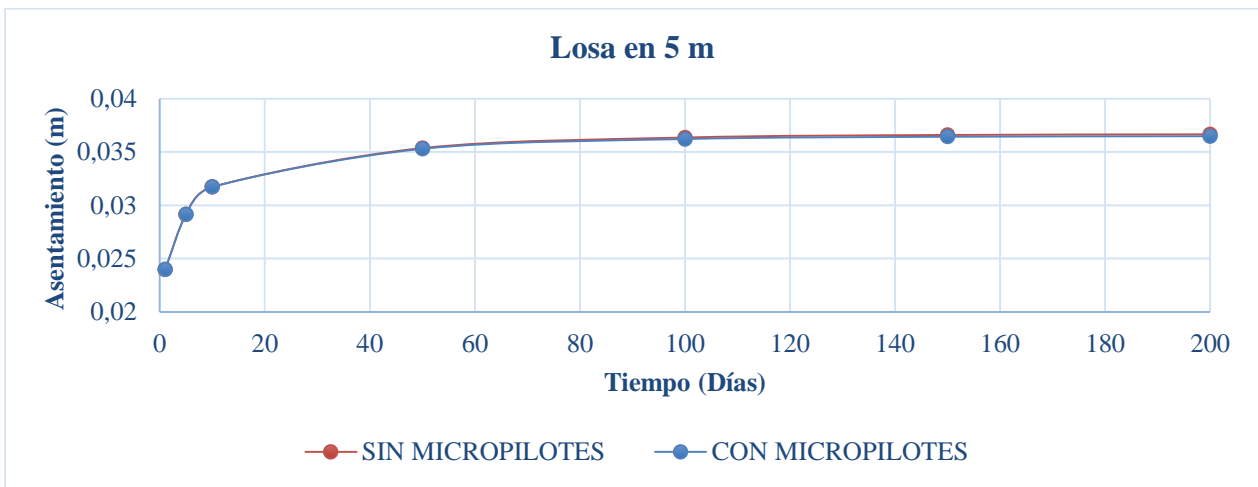
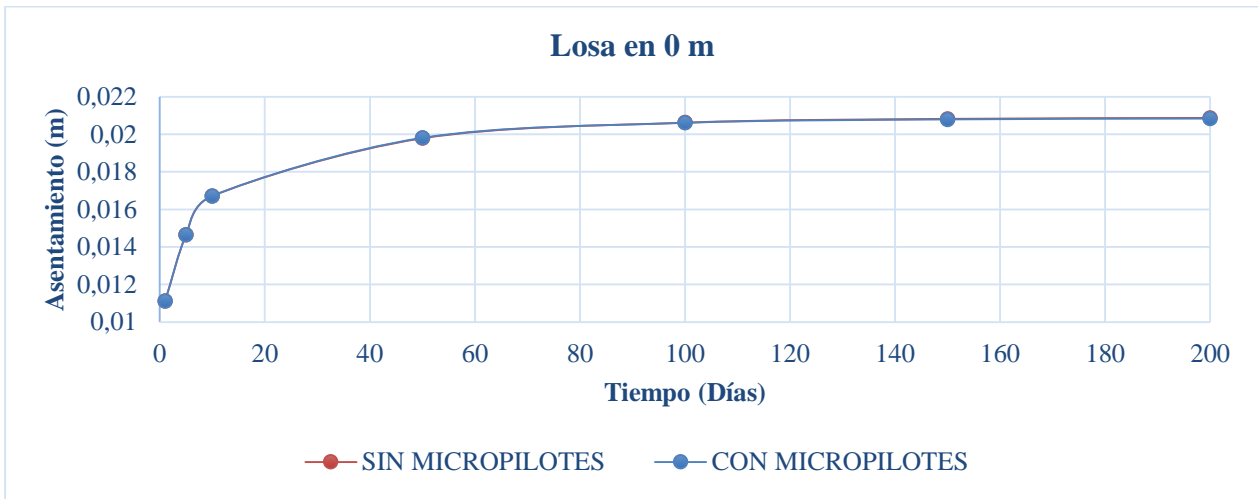


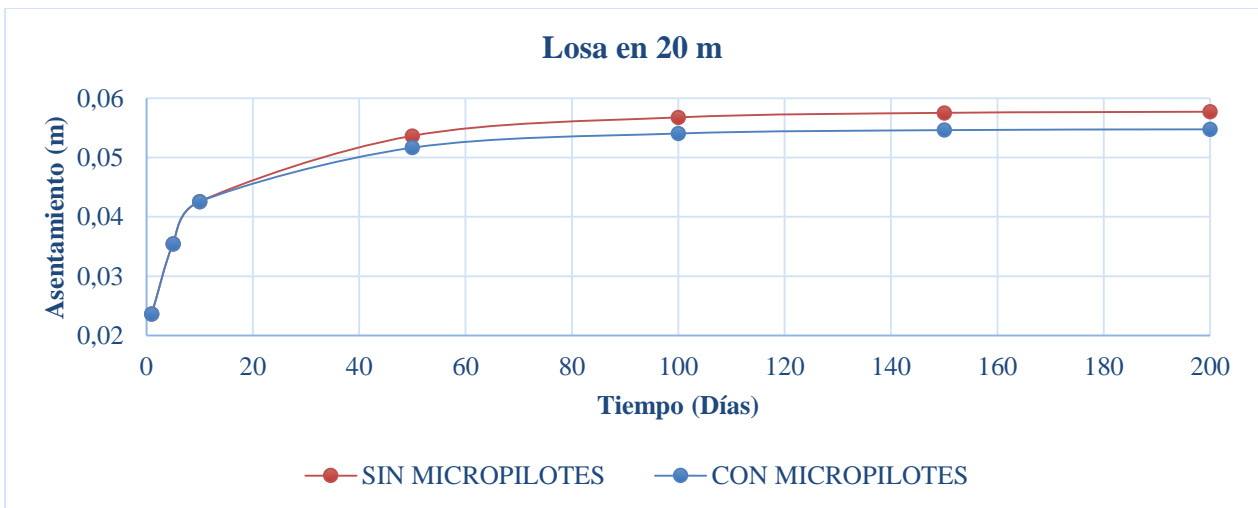
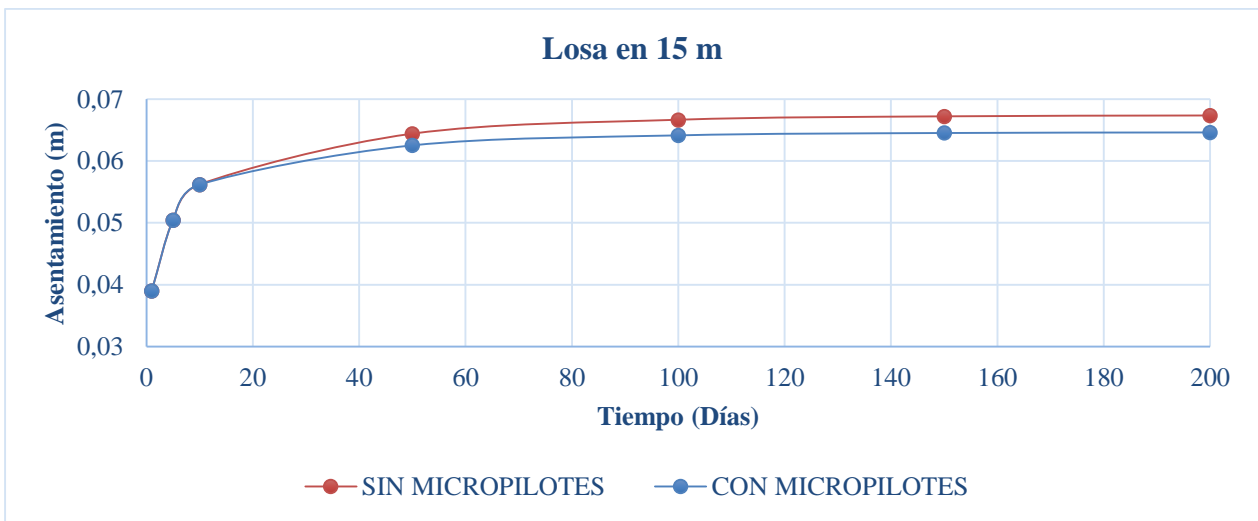
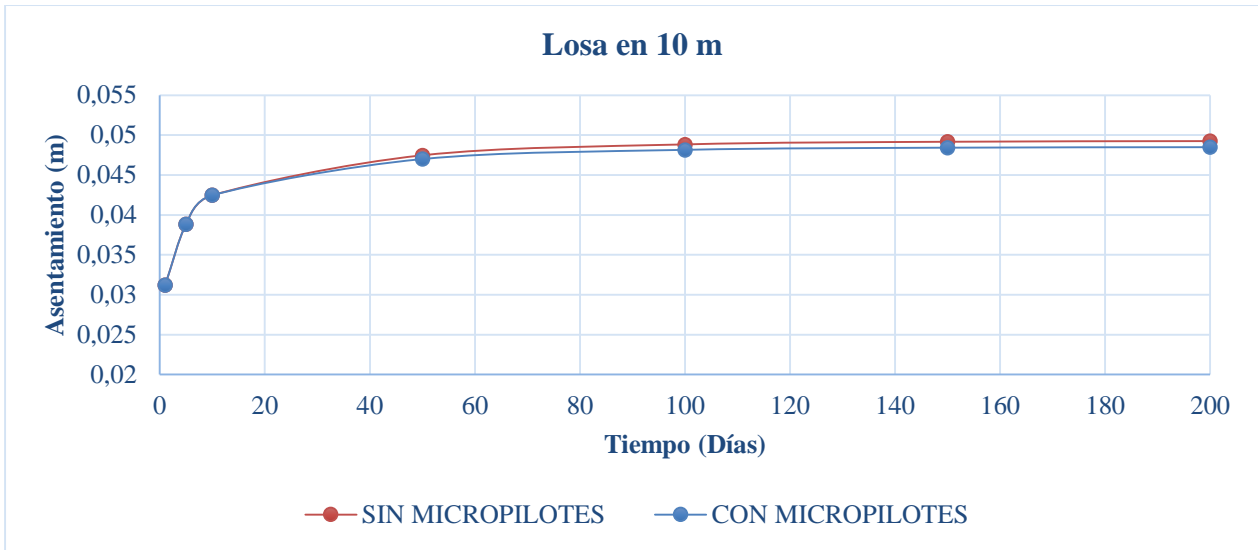
Apéndice M. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo recalce No2”

| CON MICROPILOTES | | Días | | | | | | | |
|------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Distancia (m) | 0 | 0.000 | 0.011 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.021 | 0.021 | 0.021 |
| | 5 | 0.000 | 0.024 | 0.029 | 0.032 | 0.035 | 0.036 | 0.036 | 0.036 |
| | 10 | 0.000 | 0.031 | 0.039 | 0.042 | 0.047 | 0.048 | 0.048 | 0.048 |
| | 15 | 0.000 | 0.039 | 0.050 | 0.056 | 0.061 | 0.062 | 0.063 | 0.063 |
| | 20 | 0.000 | 0.024 | 0.035 | 0.043 | 0.051 | 0.053 | 0.054 | 0.054 |

| CON MICROPILOTES | | Días | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Diferencia (m) | 0-5 | 0.000 | 0.013 | 0.015 | 0.015 | 0.015 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
| | 5-10 | 0.000 | 0.007 | 0.010 | 0.011 | 0.011 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| | 10-15 | 0.000 | 0.008 | 0.012 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |
| | 15-20 | 0.000 | 0.015 | 0.015 | 0.014 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |

Apéndice N. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base” vs “Modelo recalce No2”



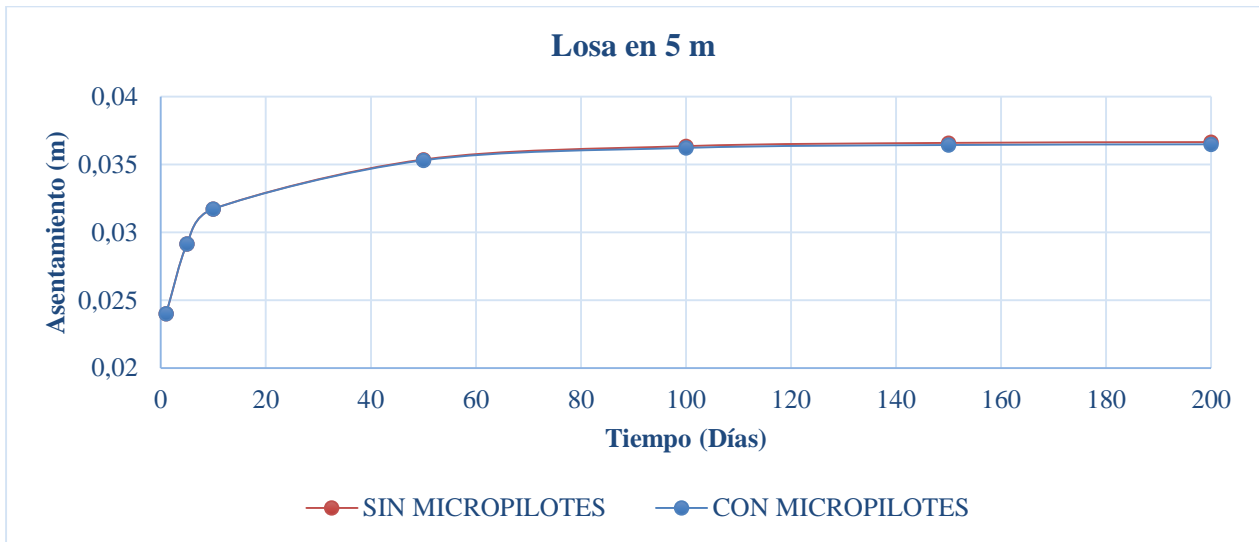
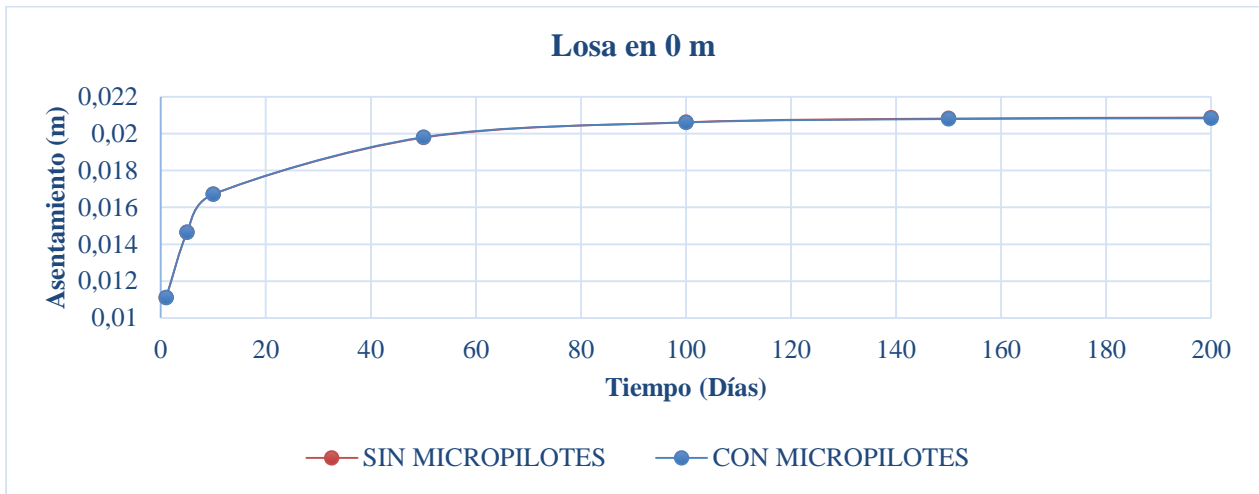


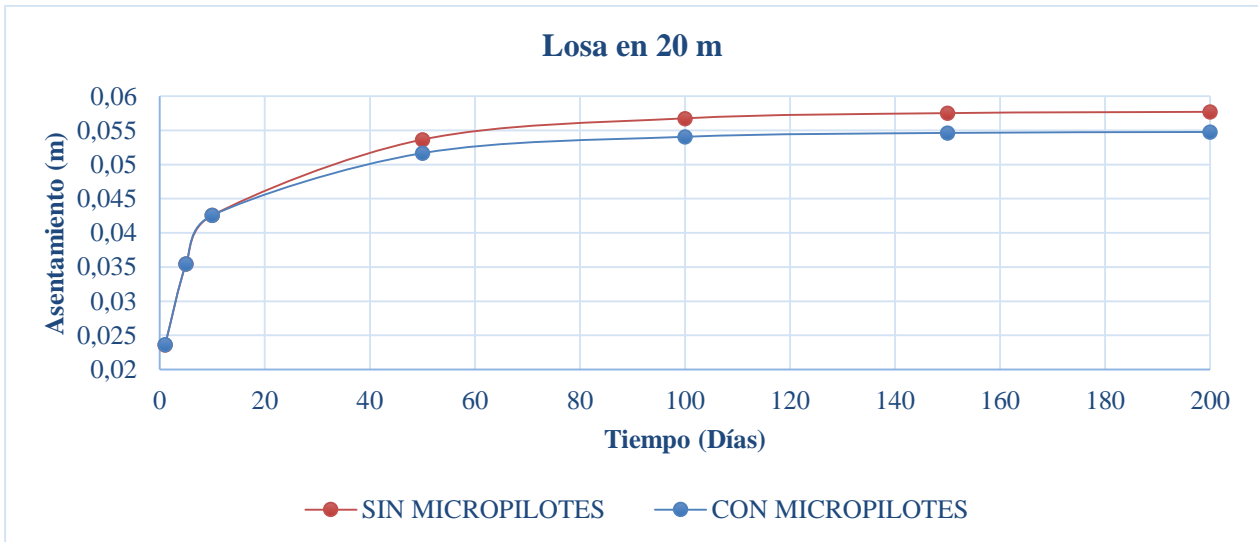
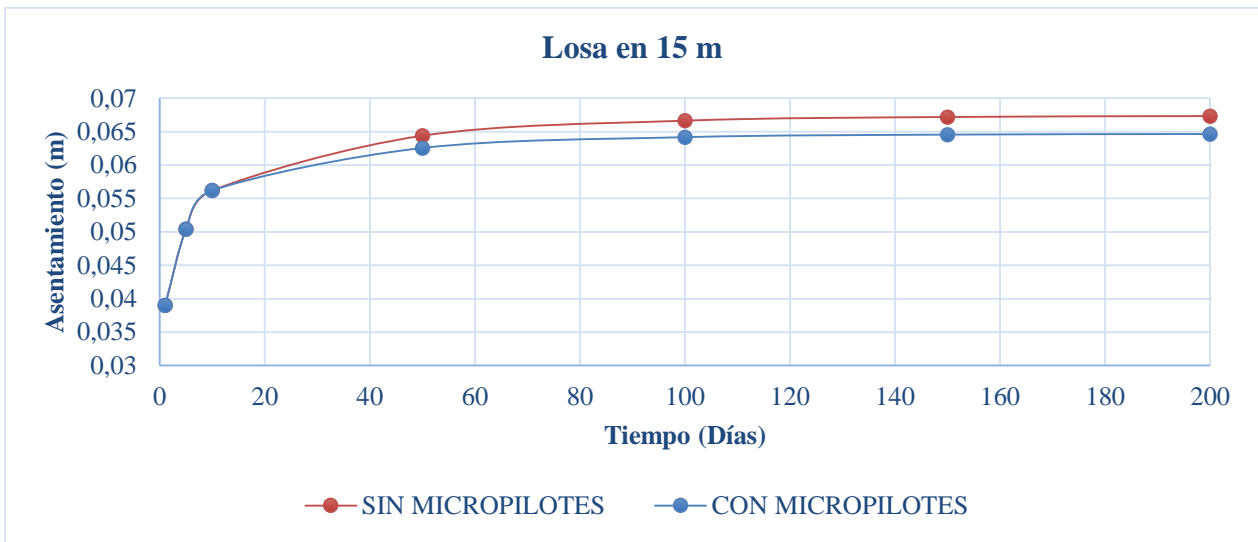
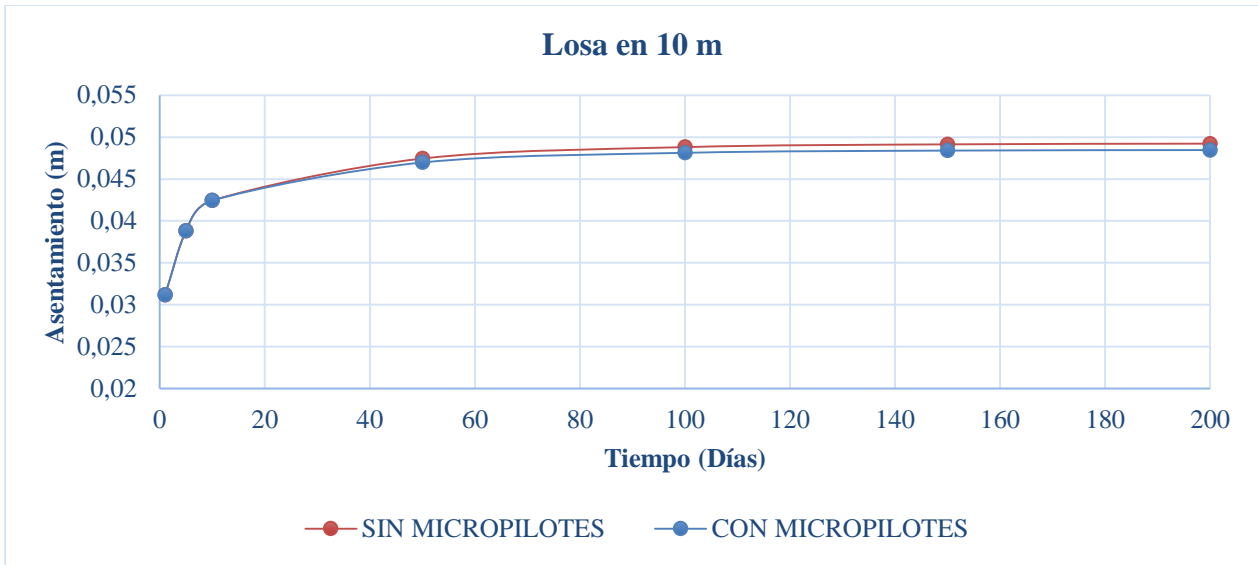
Apéndice O. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo recalce No3”

| CON MICROPILOTES | | Días | | | | | | | |
|------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Distancia (m) | 0 | 0.000 | 0.011 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.021 | 0.021 | 0.021 |
| | 5 | 0.000 | 0.024 | 0.029 | 0.032 | 0.035 | 0.036 | 0.036 | 0.037 |
| | 10 | 0.000 | 0.031 | 0.039 | 0.042 | 0.047 | 0.048 | 0.048 | 0.048 |
| | 15 | 0.000 | 0.039 | 0.050 | 0.056 | 0.061 | 0.063 | 0.063 | 0.063 |
| | 20 | 0.000 | 0.024 | 0.035 | 0.043 | 0.051 | 0.054 | 0.054 | 0.055 |

| | | | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Diferencia (m) | 0-5 | 0.000 | 0.013 | 0.015 | 0.015 | 0.015 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
| | 5-10 | 0.000 | 0.007 | 0.010 | 0.011 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| | 10-15 | 0.000 | 0.008 | 0.012 | 0.014 | 0.014 | 0.015 | 0.015 | 0.015 |
| | 15-20 | 0.000 | 0.015 | 0.015 | 0.014 | 0.010 | 0.009 | 0.009 | 0.009 |

Apéndice P. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base” vs “Modelo recalce No3”





Apéndice Q. Tablas asentamientos y diferencias de asentamientos “Modelo micropilotaje”

| CON MICROPILOTES | | Días | | | | | | | |
|------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Distancia (m) | 0 | 0.000 | 0.011 | 0.015 | 0.017 | 0.020 | 0.021 | 0.021 | 0.021 |
| | 5 | 0.000 | 0.024 | 0.029 | 0.032 | 0.035 | 0.036 | 0.036 | 0.036 |
| | 10 | 0.000 | 0.031 | 0.038 | 0.042 | 0.046 | 0.047 | 0.048 | 0.048 |
| | 15 | 0.000 | 0.039 | 0.047 | 0.051 | 0.058 | 0.060 | 0.060 | 0.060 |
| | 20 | 0.000 | 0.024 | 0.033 | 0.039 | 0.049 | 0.051 | 0.052 | 0.052 |

| CON MICROPILOTES | | Días | | | | | | | |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0 | 1 | 5 | 10 | 50 | 100 | 150 | 200 |
| Diferencia (m) | 0-5 | 0.000 | 0.013 | 0.014 | 0.015 | 0.015 | 0.016 | 0.016 | 0.016 |
| | 5-10 | 0.000 | 0.007 | 0.009 | 0.010 | 0.011 | 0.011 | 0.011 | 0.011 |
| | 10-15 | 0.000 | 0.008 | 0.008 | 0.009 | 0.012 | 0.012 | 0.012 | 0.012 |
| | 15-20 | 0.000 | 0.015 | 0.014 | 0.012 | 0.009 | 0.008 | 0.008 | 0.008 |

Apéndice R. Gráficas comparación asentamientos “Modelo base” vs “Modelo micropilotaje”

