

**ALTERNATIVA PARA REMEDIAR ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES CON
USO DE MICROPILOTES MODELADO MEDIANTE EL SOFTWARE RS3**

**CARLOS HERNÁN PÁEZ TORRES
HENRY LEONARDO SOLEDAD SIZA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

**ALTERNATIVA PARA REMEDIAR ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES CON
USO DE MICROPILOTES MODELADO MEDIANTE EL SOFTWARE RS3**

**CARLOS HERNÁN PÁEZ TORRES
HENRY LEONARDO SOLEDAD SIZA**

Trabajo de grado como requisito para optar el título de Ingeniero Civil

**Director
JORGE ALEJANDRO MENDOZA RIZO
PhD. en Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2018

DEDICATORIA

La terminación de esta etapa en mi vida es gracias inicialmente a Dios, pues me concedió la salud y conocimiento necesarios; luego a mis padres Luis Eduardo y Blanca Inés quienes, con su apoyo incondicional, valores inculcados y sentido de responsabilidad me permitieron crecer continuamente como persona y profesional integral. Quiero que ellos se sientan orgullosos de dar este paso junto a mí. A mis cuatro hermanos que serán siempre para mí un gran ejemplo de tenacidad y crecimiento continuo. También, a todas aquellas personas como lo son compañeros, docentes y conocidos quienes fueron parte de esta etapa en mi vida de diferentes maneras.

Con cariño

Henry Leonardo Soledad Siza

DEDICATORIA

A mi madre Esperanza Torres

Se quedan cortas las palabras para agradecerle todo lo que ella ah hecho, hace y seguirá haciendo por mí, fue mi motor en los momentos más difíciles, me a concejo de la mejor forma y lo mas importante nunca dudo de mis capacidades, la confianza que ella me dio fue lo mas importante gracias a eso nunca tuve temor de fallar como siempre ella me recalco de lo errores se aprende y en este proceso lo más importante es tener un buen aprendizaje.

A mi Padre Carlos Páez

Fue mi polo a tierra sin el no hubiese tenido las agallas de salir de los momentos en los que pase mas dificultad, gracias padre por enseñarme a tener fortaleza y coraje para enfrentar la vida tal y como es, a ir 20 cuabras adelante y lo mas importante de todo ser perseverante.

Gracias a mis padres por todo, este logro es tanto mío como de ellos los amo con todo mi corazón.

A Laura Blandón

Muchas gracias por su compañía, por estar conmigo en las buenas y en las malas, su apoyo moral fue muy importante en todo este recorrido, por sus buenos concejos y sobre todo por tener ahí a alguien en quien confiar muchas gracias por todo te amo mucho.

Y finalmente un agradecimiento especial a todos mis amigos y compañeros que participaron a lo largo de este proceso en donde cada uno aporto un grano de arena para lograr este objetivo.

Con cariño

Carlos Hernán Páez Torres.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 RS3.....	16
1.2 PROPIEDADES DEL SUELO	17
1.2.1 Módulo de Young.....	17
1.2.2. Suelos normalmente consolidados	18
1.3.1. Ángulo de fricción interno (ϕ).....	18
1.3.2. Cohesión en el suelo (C).....	19
1.3.3. El Nivel Freático.....	19
1.3.4. Presión de poros (u):	20
1.4. ASENTAMIENTO DIFERENCIAL	22
1.5. MICROPILOTES.....	23
1.5.1 Casos en que se usan Micropilotes	23
1.6 MÉTODO BIOT.....	24
1.7 ESFUERZOS EFECTIVOS.....	25
1.8 ECUACIÓN DE MOHR COULOMB PARA SUELOS SATURADOS.....	25
2. IDEALIZACION MODELO RS3 EN CONDICIONES INICIALES.	27
3. PROCESO CONSTRUCTIVO	33
3.1 PARÁMETROS.....	33
3.2 ETAPAS.....	33
3.3 TIPO DE ANÁLISIS	33
3.4 PROPIEDADES	33
3.5 DEFINICIÓN DE LAS CAPAS DEL SUELO MEDIANTE LOS 5 SONDEOS ...	33
3.6 NIVEL FREÁTICO	35
3.7 APLICACIÓN DE LAS CARGAS ESTRUCTURALES	36

3.8 MALLA.....	36
4. RESULTADOS RS3 PRIMER MODELO	37
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS RS3 PRIMER MODELO	42
6. MODELO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE MICROPILOTES.....	45
7. RESULTADOS CON MICROPILOTES.....	47
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO CON MICROPILOTES	49
9. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS.....	51
10. CONCLUSIONES.....	53
BIBLIOGRAFÍA.....	54

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Presión de poros en el suelo. (apoyo didáctico al aprendizaje de la asignatura mecánica de suelos i civ-219, 2005, p 108)	21
Figura 2. Sondeo1	27
Figura 3. Sondeo2	28
Figura 4. Sondeo3	29
Figura 5. Sondeo4	29
Figura 6. Sondeo5	30
Figura 7. Localización de Sondeos	30
Figura 8. Perfil del Suelo.....	31
Figura 9. Dimension zapata	31
Figura 10. Alturas de estratos sondeo 1	34
Figura 11. Alturas de estratos Sondeo 2.....	34
Figura 12. Alturas de estratos Sondeo 3.....	34
Figura 13. Alturas de estratos Sondeo 4.....	35
Figura 14. Alturas de estratos Sondeo 5.....	35
Figura 15. Condiciones de frontera del nivel freatico.	35
Figura 16. Cargas distribuidas zapatas.....	36
Figura 17. Enmallado de la región	36
Figura 18. Desplazamiento Total del suelo Etapa 1	37
Figura 19. Desplazamiento Total del suelo Etapa 2.....	37
Figura 20. Desplazamiento Total del suelo Etapa 3.....	37
Figura 21. Desplazamiento Total del suelo Etapa 4.....	38
Figura 22. Desplazamiento Total del suelo Etapa 5.....	38
Figura 23. Desplazamiento Total del suelo Etapa 6.....	38
Figura 24. Desplazamiento Total del suelo Etapa 7.....	39

Figura 25. Asentamiento Zapatas Etapa 1.....	39
Figura 26. Asentamiento Zapatas Etapa2.....	39
Figura 27. Asentamiento Zapatas Etapa3.....	39
Figura 28. Asentamiento Zapatas Etapa 4.....	40
Figura 29. Asentamiento Zapatas Etapa 5.....	40
Figura 30. Asentamiento Zapatas Etapa 6.....	40
Figura 31. Asentamiento Zapatas Etapa7.....	41
Figura 32. Ubicación zapatas 1, 2 y 3.....	42
Figura 33. Asentamientos en cada Etapa	43
Figura 34. Norma Sismo-resistente NSR-10 [H.4.9-1].....	43
Figura 35. Dimensiones y propiedades de los micropilotes	45
Figura 36. Coordenadas micropilotes	46
Figura 37. Desplazamiento del suelo corte eje X con micropilotes Etapa 5.....	47
Figura 38. Asentamiento Zapatas Etapa5.....	47
Figura 39. Asentamiento Zapatas Etapa6.....	48
Figura 40. Asentamiento Zapatas Etapa7.....	48
Figura 41. Asentamientos con micropilotes	49

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de los suelos.....	27
Tabla 2. Dimensiones Zapatas	32
Tabla 3. Propiedades de las zapatas	32
Tabla 4. Asentamientos Zapatas	42
Tabla 5. Asentamientos Diferenciales.....	44
Tabla 6. Asentamientos Zapatas con Micropilotes.....	49
Tabla 7. Asentamientos diferenciales con Micropilotes	50
Tabla 8. Comparación de asentamientos diferenciales zapatas 1 y 2	51
Tabla 9. Comparación de asentamientos diferenciales zapatas 2 y 3	51
Tabla 10. Comparación de asentamientos diferenciales zapatas 1 y 3	51

RESUMEN

Título: ALTERNATIVA PARA REMEDIAR ASENTAMIENTOS DIFERENCIALES CON USO DE MICROPILOTES MODELADO MEDIANTE EL SOFTWARE RS3*

Autores: CARLOS HERNÁN PÁEZ TORRES
HENRY LEONARDO SOLEDAD SIZA**

PALABRAS CLAVE: Asentamientos diferenciales, Rocscience Rs3, micropilotes, mitigación, zapatas..

Se propone el uso de micropilotes para mitigar asentamientos diferenciales, los cuales se presentan en cualquier estructura por diferentes causales, ya sea por las propiedades del suelo, discontinuidades o falencias en los estudios. En este caso se modela una situación en el software RS3, este software que se basa en el cálculo de las diferentes variables mediante elementos finitos y la implementación de los nuevos métodos de aproximación como lo es el biot, busca acercar más a la realidad de la interacción masa de suelo, agua, espacios, vacíos o poros. En donde se incorporan a criterio propio los estratos, propiedades del suelo, dimensiones y propiedades de las zapatas, de esta manera generar los asentamientos diferenciales que se requieren para que la serviciabilidad de la estructura no cumpla con las condiciones óptimas establecidas por la NRS-10. Dadas las condiciones iniciales en el modelo, se procede a incorporar los micropilotes en la zapata más afectada por los asentamientos diferenciales, creando un nuevo modelo semejante al anterior, con la idea de observar con el paso del tiempo por medio de unas etapas una comparación de la disminución de los asentamientos diferenciales adecuada para que la estructura sea lo suficientemente segura para el usuario y duradera.

* Proyecto de grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

ABSTRACT

Title: ALTERNATIVE TO REMEDY DIFFERENTIAL SETTLEMENTS WITH USE OF MODELED MICROPILOTS USING THE RS3 SOFTWARE*

Author: CARLOS HERNÁN PÁEZ TORRES
HENRY LEONARDO SOLEDAD SIZA**

KEYWORDS: Differential settlements, Rocscience Rs3, micropiles, mitigation, footings.

This Project consists of the use of micro-piles to mitigate differential settlement that can be presented in a structure for different reasons, either by the soil properties, discontinuities or flaws in the studies. In this particular case it was modeled to a situation in the RS3 software, this software is based in the calculation of the different variables through finite elements and the implementation of the new methods of approximation as it is the biot, it seeks to bring closer to reality of soil mass interaction, water, spaces, voids or pores. where they were incorporated to own criterion the strata, soil properties, dimensions and footing foundation properties, with the purpose of generating differential settlement that are required for that the serviceability of the structure don't comply with the conditions optimal established by NRS-10 . Given the initial conditions of the first model, it was proceeded to incorporate the micropiles in the footing foundation more affected for the differential settlement, creating a new model similar to the previous, with the idea to observe with in over time by means of some stages a comparison of the diminution of differential settlement adequate for the structure that will be enough safe for the user and durable.

* Project of grade

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering, School of Civil Engineering Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo

INTRODUCCIÓN

En el presente artículo de investigación se genera un modelo en el software RS3 con el propósito de mitigar una situación de asentamientos diferenciales en una estructura con zapatas céntricas, la estructura esta ubicada en un suelo donde su estratificación tiene unas propiedades asignadas a criterio propio con la idea de crear las condiciones iniciales ideales que provocan los asentamientos deseados para superar los establecidos por la norma NRS-10 título H, donde se especifica en la tabla H.4.9-1(figura 6.1) los asentamientos máximos diferenciales que pueden ocurrir en una estructura. de acuerdo con esta tabla se escoge el ítem C ahí se parte para generar el modelo con problemas de asentamientos diferenciales. Con el modelo inicial ya planteado se escoge la zapata más afectada por el asentamiento y se procede a la perforación e incorporación de los micropilotes en esta misma, con el propósito de que el software evidencie de forma visual y numérica la disminución a través del tiempo de los asentamientos diferenciales creados en el primer modelo.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 RS3

RS3 es un programa para el análisis Tridimensional (3D) de estructuras geotécnicas para aplicaciones civiles y mineras. Aplicable tanto para roca como para suelo (RS3 = programa de análisis tridimensional de rocas y suelos), RS3 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, aguas subterráneas filtración etc.

RS3 tiene modelos de materiales para suelos y rocas, incluidos los modelos de resistencia Mohr-Coulomb. Los modelos elásticos incluyen isótropos, transversalmente isotrópicos y ortotrópicos. Se puede definir cualquier cantidad de diferentes tipos de materiales.

Para el diseño de sistemas de soporte geotécnico, RS 3 ofrece una amplia variedad de elementos de soporte, incluidos pernos, revestimientos, vigas y pilotes. Estos pueden usarse en cualquier combinación para el soporte de excavaciones, pendientes, cimientos, muros de contención y terraplenes.

Además, RS3 ofrece análisis de tensión / presión de poro totalmente acoplados usando la teoría Biot¹ para la modelización más precisa del comportamiento del suelo donde la interacción del esfuerzo y la presión de poro son críticos, como la consolidación de terraplenes, excavaciones superficiales o túneles superficiales a través de materiales arcillosos.

¹ ANON, 2015. [En línea] Disponible: <http://ing.unne.edu.ar/mecap/Investigacion/Tesis/MgDiRado-Cap1.pdf> [Visita 6 May 2018].

Se pueden modelar diferentes tipos de carga, incluyendo el esfuerzo de campo in situ (constante o gravitacional), cargas distribuidas o recargas, cargas concentradas (línea o punto). Las restricciones y las condiciones de contorno se pueden aplicar fácilmente. La malla es automática y tridimensional con elementos tetraédricos de 4 o 10 nudos.

Después de calcular el análisis, RS3 ofrece numerosas opciones para ver y mostrar resultados en 2D y 3D (por ejemplo, tensiones, desplazamientos, vectores de flujo). Puede perfilar los resultados en superficies de excavación o planos de visualización definidos por el usuario, trazar fuerzas de desplazamiento detalladas y desplazamientos².

1.2 PROPIEDADES DEL SUELO

1.2.1 Módulo de Young: Es una característica del suelo que representa cuánto se puede comprimir o presionar y se debe tomar en cuenta, sobre todo en proyectos de construcción, ingeniería y actividades afines. Varios factores influyen en módulos de suelo y diferentes tipos de suelo presentan diferentes módulos.

Suelos con partículas estrechamente empaquetadas tienden a tener un módulo más alto. Esto puede determinarse mirando la densidad o porosidad seca del suelo. Sin embargo, dos muestras de suelo pueden tener la misma densidad en seco, pero diferentes estructuras, como suelta o densa, y por lo tanto tienen diferentes módulos.

El contenido de agua también afecta a los módulos. A bajos contenidos de agua, aumenta el esfuerzo y succión entre las partículas y da lugar a un alto módulo de

² ROCSCIENCE. RS3 Disponible: <https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs3> [Visita 13 Feb. 2018].

suelo. Esto es especialmente evidente cuando se considera la rigidez de arcilla seca. Sin embargo, esto no es cierto para los suelos de grano grueso. Si el contenido de agua se eleva demasiado, las partículas son empujadas aparte y el módulo se reduce.

Si el suelo ha sido sometido a un estiramiento en el pasado tendrá un impacto en el módulo. Un suelo consolidado tendrá generalmente un módulo más alto que en el mismo suelo normalmente consolidado³.

1.2.2. Suelos normalmente consolidados: Se dice que un suelo es normalmente consolidado, cuando los esfuerzos que recibió antes son menores a los esfuerzos que actualmente recibe; es decir el suelo experimentará por primera vez una deformación causada por una carga mayor a la que tuvo antes.

1.2.3. Coeficiente de Poisson: El coeficiente de Poisson (o ratio de Poisson) es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento. El nombre de dicho coeficiente se le dio en honor al físico francés Simeón Denis Poisson (1781-1840).⁴

1.3. PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL SUELO

1.3.1. Ángulo de fricción interno (ϕ): Es un valor que depende del tamaño, forma, densidad de las partículas o de los granos y de la presión normal. Como los suelos

³ RYCZKOWSKI, Angela. Módulo elástico en suelos. Geniolandia. 2018, February 01 Disponible : <http://www.geniolandia.com/13143201/modulo-elastico-en-suelos>

⁴ EDUCAPLUS Coeficiente de Poisson | 2018. Disponible: <http://www.educaplus.org/elementos-quimicos/propiedades/ratio-poisson.html> [Visita 3-5-2018].

gruesos tienen superficies de contacto y sus partículas son angulares, presentan una fricción entre ellas que se opone al movimiento⁵.

1.3.2. Cohesión en el suelo (C): La cohesión es la máxima resistencia del suelo a la tensión. Ésta resulta de la interacción de factores tales como la adherencia de la superficie de las partículas, la tensión capilar de las partículas de agua, las condiciones de drenaje y los esfuerzos del suelo.

En las arcillas, que tienen contacto entre las caras de sus partículas, se encuentra una cohesión real; en los suelos no plásticos de grano fino se puede dar una cohesión aparente cuando están en condiciones de saturación parcial. La cohesión en un suelo variará según su contenido de humedad, y se encuentra principalmente en los suelos finos (arcillas y limos), mientras que en los suelos granulares (arenas y gravas) esta propiedad es prácticamente nula⁶.

1.3.3. El Nivel Freático: El agua subterránea circula a través de las cavidades de las rocas permeables con una velocidad proporcional al tamaño de los conductos y a la presión a que se encuentre sometida, finalmente se almacena saturando todos los orificios y alcanzando un cierto nivel.

El nivel freático está sujeto a oscilaciones de acuerdo con la recarga del acuífero, descendiendo durante las épocas de sequía o de máximo estiaje, por efecto de la evaporación, mientras que cuando la pluviometría es abundante asciende llegando incluso hasta la superficie, originando localmente surgencias de agua que constituyen las fuentes o manantiales⁷.

⁵ ESCOBAR ZARRABE, D., & GIRALDO HOYOS, S. Análisis de las propiedades mecánicas del suelo a partir de la mezcla con residuos de la construcción. 2013 Recuperado 10 febrero, 2018, de <https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/315/1/CIVI0426.pdf>. p[22-23].

⁶ *Ibíd.*

⁷ GIL MONTES, J. Estudio Técnico Recursos Hidrogeológicos. [Blog] maquinaria y servicios la vera. 2013 [Visita 4 May 2018].

1.3.4. Presión de poros (u): Se conocerá como poro al espacio vacío formado entre partículas de suelo y la presión del agua dentro de estos espacios vacíos, es conocida como la presión de poros⁸.

La Figura 1 muestra el caso de un suelo saturado donde se ha instalado un piezómetro, la presión de poros originó que una cantidad apreciable de agua suba por el piezómetro hasta que el peso de esta

columna esté en equilibrio con la presión de poros. Si M_p es la masa del agua contenida en el piezómetro y A_p es el área de la sección transversal del piezómetro, la presión de poros será:

$$u = \frac{M_p}{A_p} \quad [1.1]$$

La masa del agua (M_p) puede escribirse en función a las dimensiones del piezómetro.

$$u = \frac{\gamma_w * h_p * A_p}{A_p} \quad [1.2]$$

Por lo que la expresión se reduce a:

$$u = \gamma_w * h_p \quad [1.3]$$

Donde:

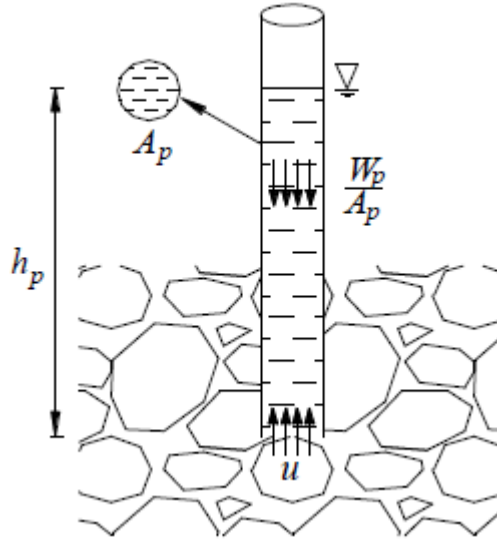
$h_p =$ *Altura piezométrica*

$\gamma_w =$ *Peso unitario del agua*

⁸ JUAREZ BADILLO, E. and RICO RODRIGUEZ, A. Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de suelos. 1st ed. Mexico: Editorial Limusa 1978, p.52.

$u =$ Presión de poros

Figura 1. Presión de poros en el suelo. (apoyo didáctico al aprendizaje de la asignatura mecánica de suelos i civ-219, 2005, p 108)



Con la ecuación [1.3], puede calcularse la presión de poros en un suelo saturado. La presión de poros, también puede ser media en suelos parcialmente saturados. En el caso de un suelo que tiene ascenso capilar, la presión de poros en la zona capilar será:

$$u = -\left(\frac{s}{100}\right) * \gamma_w * h \quad [1.4]$$

Donde:

$u =$ Presión de poros.

$s =$ Grado de saturación del suelo porcentaje.

$h =$ Elevación respecto al nivel freático.

$\gamma_w =$ Peso unitario del agua.

1.4. ASENTAMIENTO DIFERENCIAL

Si notamos en los muros y mampostería de una vivienda, grietas y fisuras de mayor o menor magnitud, lo más seguro es que estemos ante un problema de asentamiento del terreno y de la cimentación. Estas fallas en las fundaciones de una edificación pueden ser atribuidas a diversas causas.

Estas generalmente son causadas por el movimiento de suelos expansivos y altamente plásticos debajo de las zapatas de cimentación. Este movimiento puede ser en forma de contracción, que provoca asentamiento del terreno, o en forma de expansión, lo que provoca levantamiento del suelo.

Cuando prevalecen condiciones de sequía, los suelos pierden constantemente humedad y se encogen. Cuando los niveles de humedad son altos, los suelos se hinchan. Independientemente de la naturaleza del movimiento, lo más probable es que estos cambios se manifiesten en forma de grietas visibles en las paredes. Oficialmente, cualquier movimiento de la estructura de una edificación se conoce con el termino de asentamiento diferencial⁹.

1.4.1. Asentamientos en suelos arenosos finos y limosos: En la naturaleza es común encontrar depósitos eólicos cementados o no, de estructura generalmente panaloide o simple, bastante suelta, constituidos por arenas muy finas o limos no plásticos. En muchos casos el cementante que actúa es el carbonato de calcio, siendo frecuentes otros también solubles en agua; en otros casos la simple tensión capilar del agua intersticial efectúa el mismo papel.

⁹ ARQUIGRAFICO. Causas de las Fallas en Cimientos o Fundaciones de Edificaciones. 2018 [En línea] Disponible en: <https://arquigrafico.com/causas-de-las-fallas-en-fundaciones-de-edificaciones/#> [Visita 13 Feb. 2018].

Es característico de estos suelos, el hecho de que al saturarse o alcanzar un alto grado de saturación entre en verdadero colapso su estructura, sobre todo bajo carga, con la consecuencia práctica de producirse un fuerte asentamiento brusco del estrato. Este fenómeno ocurre cuando el agua de saturación disuelve el cementante existente. Es obvio que este hecho es grave para cualquier estructura sobreyacente¹⁰.

1.5. MICROPILOTES

Los micropilotes son elementos constructivos de tipo puntual usados para cimentación profunda en obras de construcción, los cuales permiten transmitir las cargas de la estructura hasta capas de suelo más profundas que tengan la capacidad de carga suficiente para soportarlas¹¹.

1.5.1 Casos en que se usan Micropilotes: Cuando las cargas transmitidas por el edificio no se pueden distribuir adecuadamente en una cimentación superficial excediendo la capacidad portante del suelo. Puede darse que los estratos inmediatos a los cimientos produzcan asentamientos imprevistos y que el suelo resistente esté a cierta profundidad; es el caso de edificios que apoyan en terrenos de baja calidad.

- Cuando el terreno está sometido a grandes variaciones de temperatura por hinchamientos y retracciones producidos con arcillas expansivas.
- Cuando la edificación está situada sobre agua o con la capa freática muy cerca del nivel de suelo.
- Cuando los cimientos están sometidos a esfuerzos de tracción.

¹⁰ JUAREZ BADILLO, E. and RICO RODRIGUEZ, A. Op. Cit.

¹¹ CIVILGEEKS Pilotes, casos en que se usan pilotes. 2018 Disponible en: <https://civilgeeks.com/2015/05/21/pilotes-casos-en-que-se-usan-pilotes/> [Visita 27 Jan. 2018].

- Cuando se necesita resistir cargas inclinadas; como en los muros de contención de los muelles.¹²

1.6 MÉTODO BIOT

Existen problemas donde la naturaleza bifásica (suelo - agua) es insuficiente para describir el fenómeno, debido a las características multifásicas de los fluidos que pasan por los poros (y que pueden inclusive dar origen a reacciones químicas). El comportamiento de suelos no saturados, donde existe flujo de agua y gas (aire) en los poros es un ejemplo importante de problemas trifásicos.

Las presas de tierra, así como otros tipos estructurales, trajeron importantes desafíos en el análisis de las fundaciones y de las propias estructuras. Una de las cuestiones importantes es el asentamiento, tanto el inicial como el que se produce después de un cierto tiempo, que permite la disipación del exceso de presión en los poros.

Un asentamiento excesivo irregular, puede causar daños muy serios a la estructura, siendo que movimientos excesivos verticales y de volcamiento pueden también originar dificultades operacionales.

El método Biot considera un comportamiento acoplado sólido - fluido, considerando un esqueleto elástico lineal, resolviendo numéricamente el problema; usando el método de los elementos finitos y un modelo elasto-plástico para el suelo, con desplazamientos finitos o infinitesimales¹³.

¹² Ibíd.

¹³ ANON Op. Cit.

1.7 ESFUERZOS EFECTIVOS

Los esfuerzos al interior del suelo [2.7.1] se aplican por el peso propio del suelo (Geoestáticos) y el efecto de las cargas exteriores aplicadas al suelo. Los esfuerzos geoestáticos (verticales) son los debidos al peso propio del suelo y varían con la profundidad, cuando varía el peso unitario del suelo.

$$\sigma = \gamma z \quad [2.7.1]$$

En una masa de suelo existen esfuerzos dentro del esqueleto mineral σ' (esfuerzo efectivo), que actúan interpartícula y esfuerzos U (esfuerzo neutro) entre el fluido intersticial que ocupa los poros.

Entonces el Esfuerzo Efectivo [2.7.2] es la diferencia entre el esfuerzo total en una dirección y la presión de poros en los vacíos del suelo.

$$\sigma' = \sigma - U \quad [2.7.2]$$

El suelo es una estructura de esqueleto de partículas sólidas en contacto, formando vacíos intercomunicados. Los vacíos están total o parcialmente llenos de agua. el comportamiento de un suelo depende de la interacción entre la estructura del suelo y el fluido¹⁴.

1.8 ECUACIÓN DE MOHR COULOMB PARA SUELOS SATURADOS

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere conocer los parámetros del ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del

¹⁴ RONDON, J. and TORRADO, L. Docencia / Cimentación y fundaciones / Esfuerzos en masas de suelos. [en línea] INGEAS S.A.S. 2015 Disponible en: <http://ingeassas.com/docencia.php>

suelo. La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo que depende de las presiones internas o de poros de acuerdo con la ecuación de Coulomb [2.8.1], en la cual el factor u está restando al valor de la presión normal total.

A la presión resultante, se le conoce con el nombre de presión efectiva σ' .

$$\sigma'(\text{Esfuerzo efectiva}) = \sigma - u$$

ϕ' = *Angulo de fricción p. efectivas*

c' = *Cohesión para presiones efectivas.*

$$\tau = c' + [(\sigma - u) * \text{Tan}(\phi')] \quad [2.8.1]$$

Dónde:

τ = *Esfuerzo de resistencia al corte*

c' = *Cohesión o cementación efectiva*

σ = *Esfuerzo normal total*

u = *Presión del agua intersticial o de poros*

El valor de c para la arena y el limo es 0. Para arcillas normalmente consolidadas, c se considera igual a 0 (cero). Las arcillas sobreconsolidadas tienen valores de $c > 0$. El ángulo de fricción ϕ se denomina ángulo de fricción drenado¹⁵.

¹⁵ *Ibíd.*

2. IDEALIZACION MODELO RS3 EN CONDICIONES INICIALES.

En el primer paso para la idealización del modelo se procedió a buscar las propiedades indicadas del suelo con el fin de encontrar un asentamiento diferencial que supere lo permitido por la NRS-10. En ese primer paso se tuvieron en cuenta cuatro tipos de estratos para el suelo, de los cuales solo se requirieron las siguientes propiedades.

Tabla 1. Parámetros de los suelos

Suelo	Relleno	Arena densa	Arcilla media	Manto de roca
Módulo de Young (kPa)	60000	80000	6000	1×10^6
Ratio Poisson	0.2	0.2	0.2	0.25
Ángulo de fricción	28	33	25	35
Cohesión (kPa)	0	0	15	0
Peso unitario (kN/m³)	18	18	18	28

Se simularon cinco sondeos con los cuales se puede ilustrar en el software la estratificación y el perfil del suelo, como se muestra en las siguientes imágenes:

Figura 2. Sondeo1

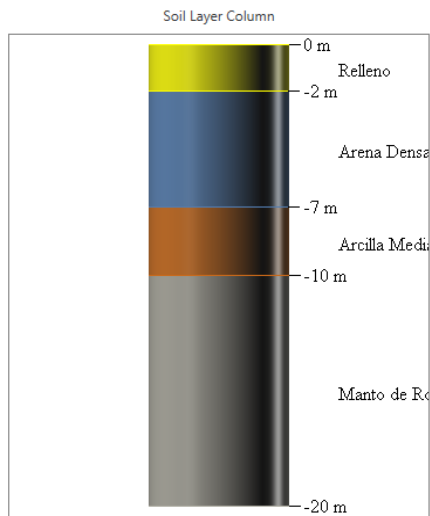


Figura 3. Sondeo2

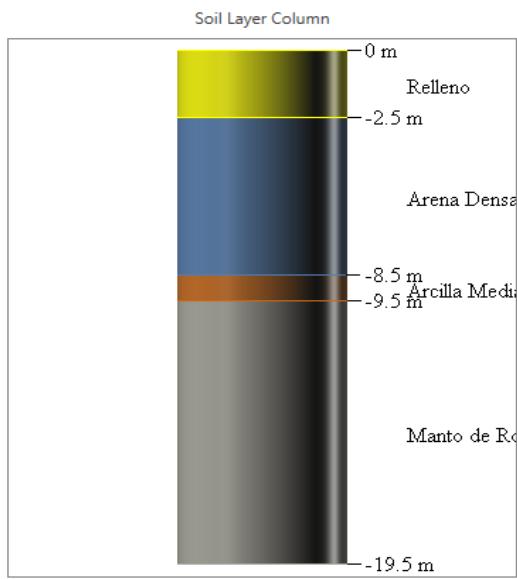


Figura 4. Sondeo3

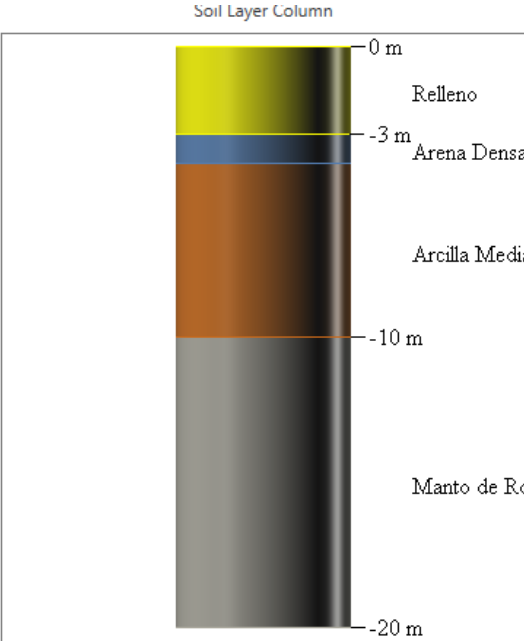


Figura 5. Sondeo4

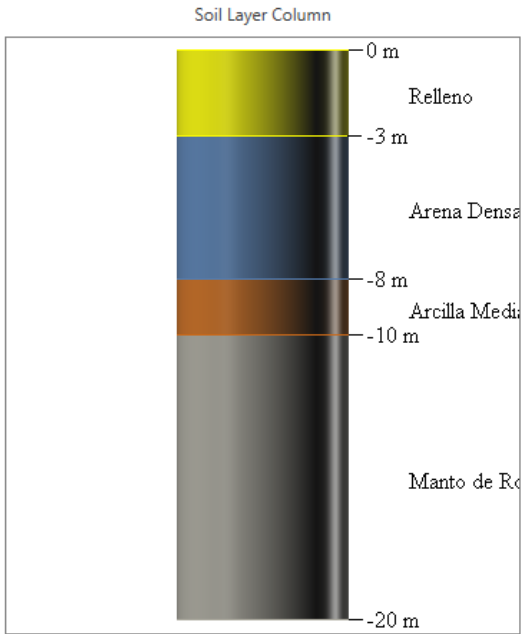


Figura 6. Sondeo5

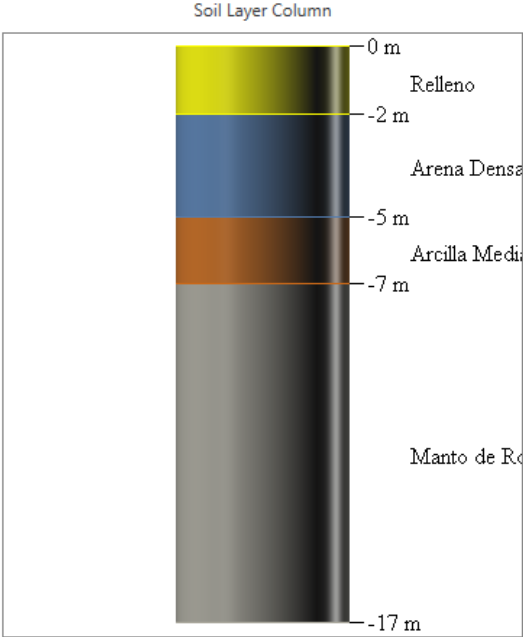


Figura 7. Localización de Sondeos

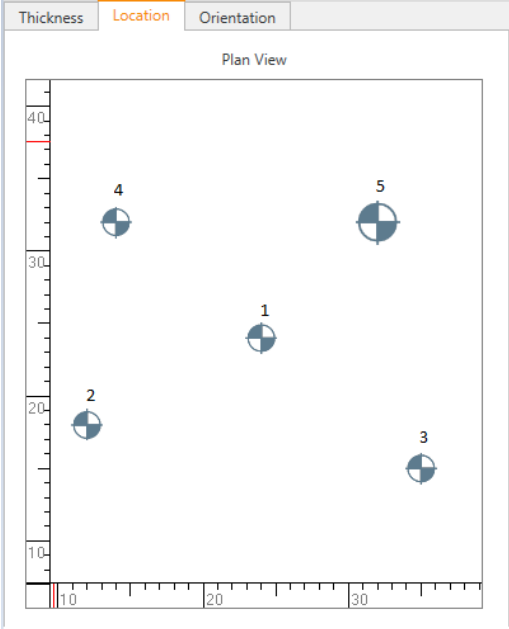
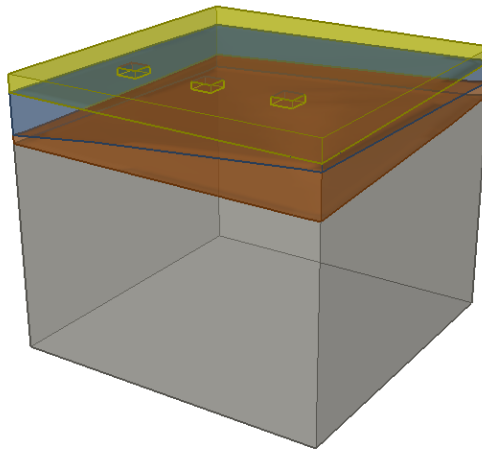


Figura 8. Perfil del Suelo



Luego de estratificar el suelo, se inserta la línea de zapatas que presenta el mayor asentamiento diferencial de la estructura que en este caso son tres, cada una de las zapatas concéntricas reciben de su respectiva columna una carga puntal de 400kN. las dimensiones de todas las zapatas son las presentadas en la tabla [3.2].

Figura 9. Dimension zapata

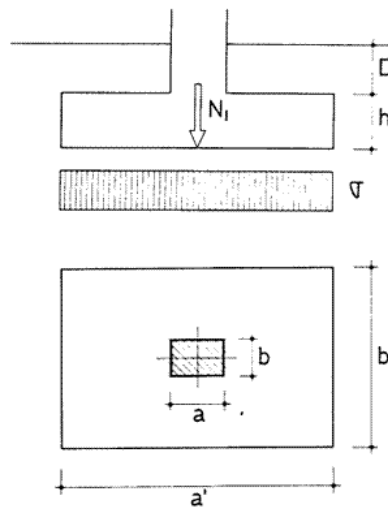


Tabla 2. Dimensiones Zapatas

Dimensiones	Valores
D	1.00 m
h	1.00 m
a'	2.00 m
b'	2.00 m

Tabla 3. Propiedades de las zapatas

Propiedades de las zapatas	
Módulo de Young (kPa)	3x10 ⁷
Ratio Poisson	0.2
Angulo de fricción	35
Cohesión (kPa)	0
Peso unitario (kN/m³)	24

El area de contacto de cada zapata es el equivalente del producto entre a*b' que es igual a cuatro metros cuadrados por tanto la carga distribuida que se genera en cada zapata es de 100 kN/m².

Ya con todos los parámetros iniciales establecidos se dio inicio al cálculo de los asentamientos diferenciales mediante el uso del software RS3.

3. PROCESO CONSTRUCTIVO

3.1 PARÁMETROS

Unidades [metros], esfuerzo (kPa), unidades de tiempo (Días).

3.2 ETAPAS

Colocar el número de etapas y los días.

3.3 TIPO DE ANÁLISIS

El tipo de análisis que desarrolla el programa es Coupled (Biot).

3.4 PROPIEDADES

Se definieron las propiedades de los cuatro estratos del suelo, según la tabla (3.1).

3.5 DEFINICIÓN DE LAS CAPAS DEL SUELO MEDIANTE LOS 5 SONDEOS

En nuestro modelo se eligieron cuatro capas de materiales que se distribuyeron en un volumen de terreno (47m*47m*40m) de la siguiente manera.

Figura 10. Alturas de estratos sondeo 1

Name: Borehole 1

Location: X: 24, Y: 24, Z: 0

Orientation: Defined by: Trend/Plunge, Trend (degree): 0, Plunge (degree): 90

Generate Top Surface
 Generate Bottom Surface

Materials	Thickness	Top Elevation	Bottom Elevation
1 Relleno	2	0	-2
2 Arena Densa	5	-2	-7
3 Arcilla Media	3	-7	-10
4 Manto de Roca	10	-10	-20

Figura 11. Alturas de estratos Sondeo 2

Name: Borehole 2

Location: X: 6, Y: 10, Z: 0

Orientation: Defined by: Trend/Plunge, Trend (degree): 0, Plunge (degree): 90

Generate Top Surface
 Generate Bottom Surface

Materials	Thickness	Top Elevation	Bottom Elevation
1 Relleno	2.5	0	-2.5
2 Arena Densa	6	-2.5	-8.5
3 Arcilla Media	1	-8.5	-9.5
4 Manto de Roca	10	-9.5	-19.5

Figura 12. Alturas de estratos Sondeo 3

Name: Borehole 3

Location: X: 42, Y: 7, Z: 0

Orientation: Defined by: Trend/Plunge, Trend (degree): 0, Plunge (degree): 90

Generate Top Surface
 Generate Bottom Surface

Materials	Thickness	Top Elevation	Bottom Elevation
1 Relleno	3	0	-3
2 Arena Densa	1	-3	-4
3 Arcilla Media	6	-4	-10
4 Manto de Roca	10	-10	-20

Figura 13. Alturas de estratos Sondeo 4

Name		Borehole 4			
Location		Orientation			
X	14	Y	32	Z	0
<input type="checkbox"/> Generate Top Surface		Defined by: Trend/Plunge			
<input type="checkbox"/> Generate Bottom Surface		Trend (degree): 0			
		Plunge (degree): 90			
Materials	Thickness	Top Elevation	Bottom Elevation		
1 Relleno	3	0	-3		
2 Arena Densa	5	-3	-8		
3 Arcilla Media	2	-8	-10		
4 Manto de Roca	10	-10	-20		

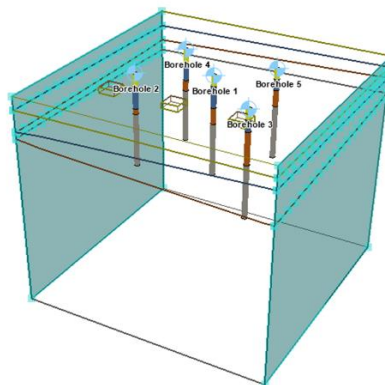
Figura 14. Alturas de estratos Sondeo 5

Name		Borehole 5			
Location		Orientation			
X	32	Y	32	Z	0
<input type="checkbox"/> Generate Top Surface		Defined by: Trend/Plunge			
<input type="checkbox"/> Generate Bottom Surface		Trend (degree): 0			
		Plunge (degree): 90			
Materials	Thickness	Top Elevation	Bottom Elevation		
1 Relleno	2	0	-2		
2 Arena Densa	3	-2	-5		
3 Arcilla Media	2	-5	-7		
4 Manto de Roca	10	-7	-17		

3.6 NIVEL FREÁTICO

Se definió el nivel freatico para cada etapa.

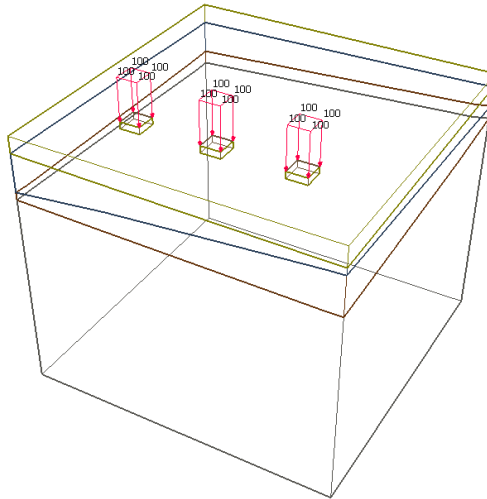
Figura 15. Condiciones de frontera del nivel freatico.



3.7 APLICACIÓN DE LAS CARGAS ESTRUCTURALES

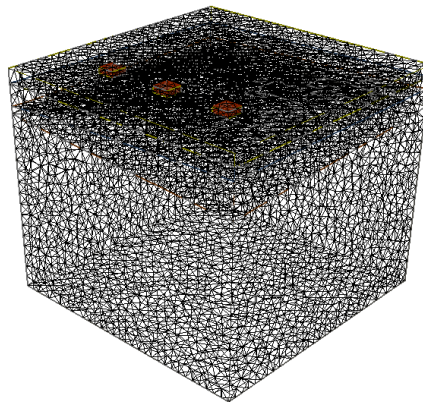
Con una carga distribuida de Magnitud (100 kN/m²) y no se.

Figura 16. Cargas distribuidas zapatas.



3.8 MALLA.

Figura 17. Enmallado de la región



4. RESULTADOS RS3 PRIMER MODELO

Con el modelo ya terminado se procedió a correr el programa.

Figura 18. Desplazamiento Total del suelo Etapa 1

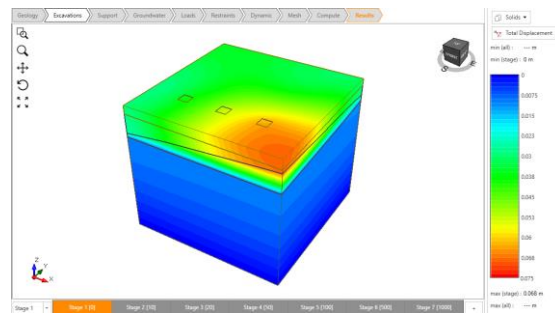


Figura 19. Desplazamiento Total del suelo Etapa 2

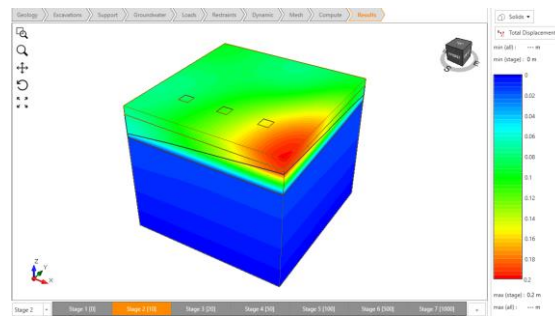


Figura 20. Desplazamiento Total del suelo Etapa 3

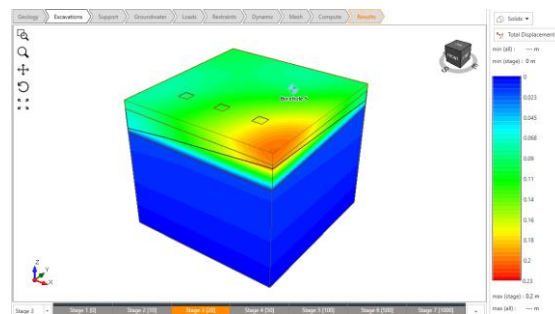


Figura 21. Desplazamiento Total del suelo Etapa 4

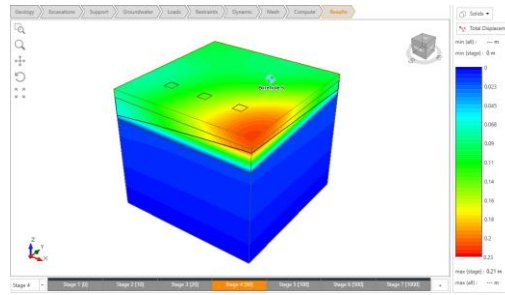


Figura 22. Desplazamiento Total del suelo Etapa 5

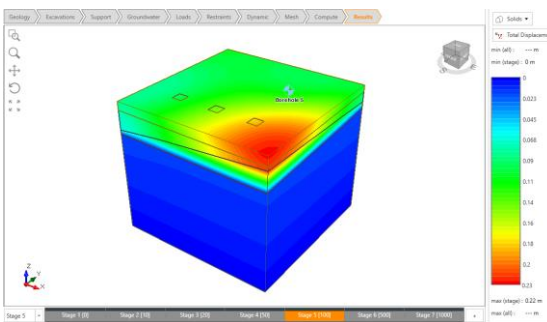


Figura 23. Desplazamiento Total del suelo Etapa 6

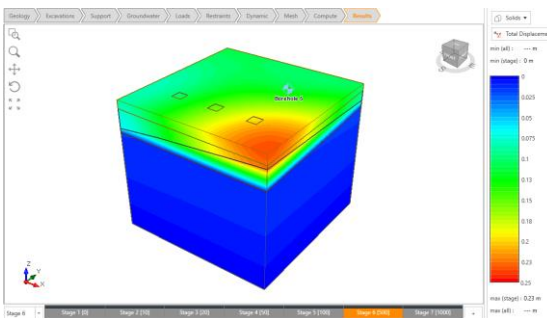


Figura 24. Desplazamiento Total del suelo Etapa 7

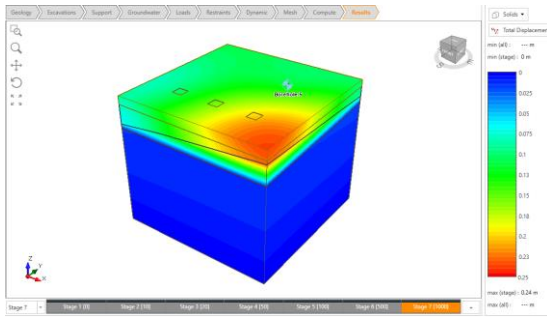


Figura 25. Asentamiento Zapatas Etapa 1



Figura 26. Asentamiento Zapatas Etapa2



Figura 27. Asentamiento Zapatas Etapa3



Figura 28. Asentamiento Zapatas Etapa 4



Figura 29. Asentamiento Zapatas Etapa 5



Figura 30. Asentamiento Zapatas Etapa 6



Figura 31. Asentamiento Zapatas Etapa7



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS RS3 PRIMER MODELO

Los resultados obtenidos en cada etapa son los mostrados en la siguiente tabla.

Figura 32. Ubicación zapatas 1, 2 y 3

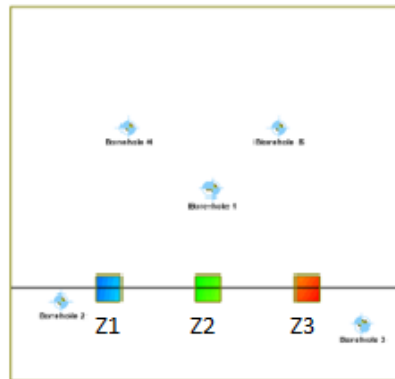
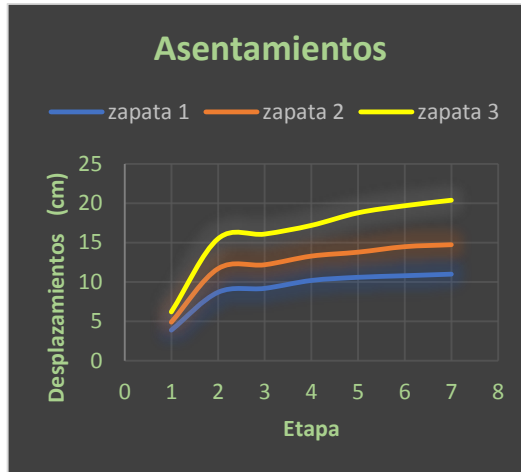


Tabla 4. Asentamientos Zapatas

Días	zapata 1	zapata 2	zapata 3
	Asentamientos (cm)		
Etapa 1 (0)	3.91	4.9	6.21
Etapa 2 (10)	8.7	11.7	15.5
Etapa 3 (20)	9.2	12.2	16.1
Etapa 4 (50)	10.2	13.3	17.2
Etapa 5 (100)	10.6	13.8	18.8
Etapa 6 (500)	10.8	14.5	19.7
Etapa 7 (1000)	11	14.75	20.4

Figura 33. Asentamientos en cada Etapa



Con los resultados obtenidos en cada Etapa, es posible analizar de acuerdo con la NRS-10 si cumplen con lo establecido.

Figura 34. Norma Sismo-resistente NSR-10 [H.4.9-1]

Tabla H.4.9-1
Valores máximos de asentamientos diferenciales calculados, expresados en función de la distancia entre apoyos o columnas, l

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

De la Figura (6.3) en el ítem c de la Tabla (H,4,9-1) se calcularon los asentamientos diferenciales máximos permitidos para la estructura.

$$\frac{l}{300} = \frac{1200cm}{300} = 4cm$$

Tabla 5. Asentamientos Diferenciales

Asentamientos diferenciales			
Etapas	z1 y z2 (cm)	z2 y z3 (cm)	z1 y z3 (cm)
Etapa 1 (0)	0.99	1.31	2.3
Etapa 2 (10)	3	3.8	6.8
Etapa 3 (20)	3	3.9	6.9
Etapa 4 (50)	3.1	3.9	7
Etapa 5 (100)	3.2	5	8.2
Etapa 6 (500)	3.7	5.2	8.9
Etapa 7 (1000)	3.75	5.65	9.4

6. MODELO CON LA IMPLEMENTACIÓN DE MICROPILOTES.

Para crear el modelo con micropilotes se siguieron los pasos mencionados en el modelo anterior y continuamos con los siguientes.

Se crearon las dimensiones y propiedades de los micropilotes, los cuales actúan como vigas en el programa. Las dimensiones y propiedades fueron:

Figura 35. Dimensiones y propiedades de los micropilotes

The image shows a software interface with two main sections. The top section is for 'Pile 1' and the bottom section is for 'Beam 1'. Each section has a 'Name' field, a color selection box, and several property fields.

Property	Value
Name	Pile 1
Connection Type	Rigid
Shear Stiffness (kPa/m)	5000
Normal Stiffness (kPa/m)	50000
Skin Resistance	C and phi
Perimeter (m)	1.1
Cohesion (kN/m)	3.2
Residual Cohesion (kN/m)	3.2
Friction Angle (deg)	35
Name	Beam 1
Young's Modulus (%u)	3.5e+07
Poisson's Ratio	0.2
Beam Type	Standard
Area (%u)	0.076
I-min (%u)	0.00048
I-max (%u)	0.00048

Dado que en el modelo anterior el mayor asentamiento se produjo en la Etapa 4, se continuó con la ubicación de los micropilotes en la zapata afectada a partir del Etapa 3 dándole las siguientes coordenadas:

Figura 36. Coordenadas micropilotes

Pile Pattern

Primary Path (Required)

Start: 34.50, 10.50, 0.00 End: 36.50, 10.50, 0.00

Secondary Path (Optional)

Start: 34.50, 10.50, 0.00 End: 34.50, 12.50, 0.00

Primary Spacing (m): 2

Primary Rows: 10

Primary Offset (m): 0

Secondary Spacing (m): 2

Secondary Rows: 10

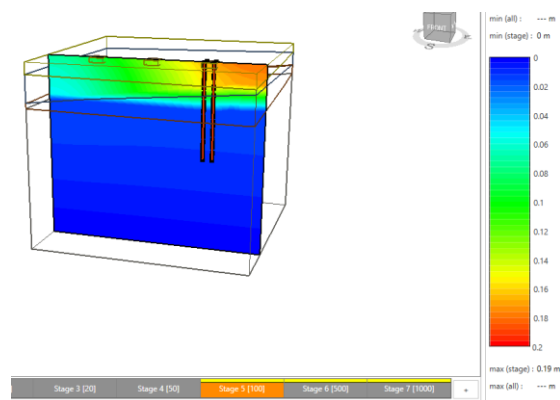
Secondary Offset (m): 0

Preview Pattern

7. RESULTADOS CON MICROPILOTES

Se escogieron los resultados arrojados por el software, en el ítem que se refiere a los desplazamientos en el eje Z.

Figura 37. Desplazamiento del suelo corte eje X con micropilotes Etapa 5



Para los Etapa 6 y 7 fueron los mismos resultados mostrados en la imagen (8.1)

Figura 38. Asentamiento Zapatas Etapa5

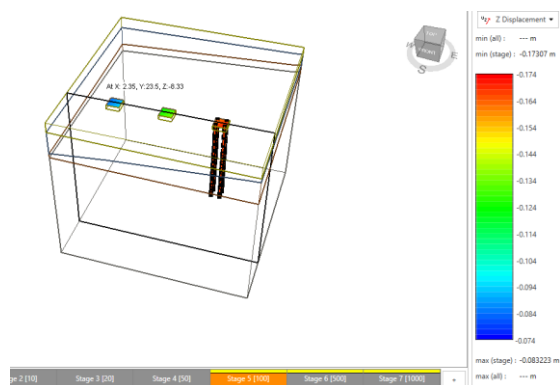


Figura 39. Asentamiento Zapatas Etapa6

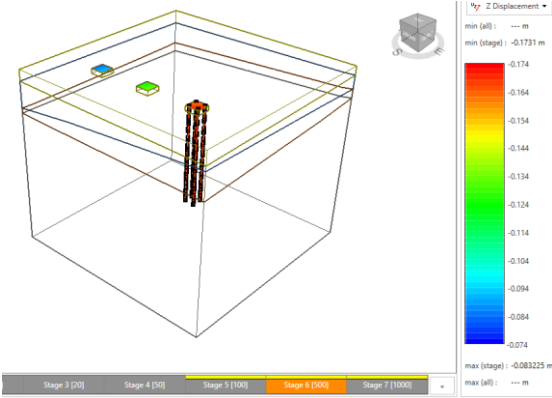
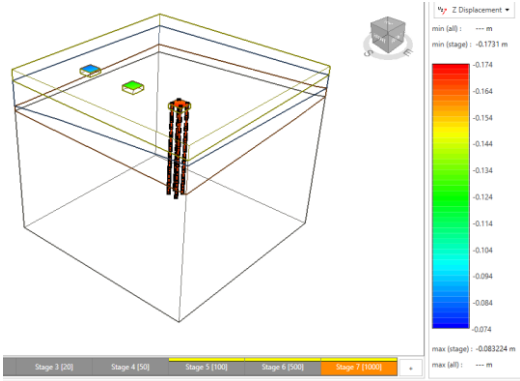


Figura 40. Asentamiento Zapatas Etapa7



8. ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO CON MICROPILOTES

Con los resultados obtenidos a partir de Etapa 3 se puede analizar de acuerdo con la NRS-10 si cumplen con lo establecido.

Tabla 6. Asentamientos Zapatas con Micropilotes

Días	zapata 1	zapata 2	zapata 3
	Asentamiento (cm)		
Etapa 1 (0)	3.91	4.9	6.21
Etapa 2 (10)	8.7	11.7	15.5
Etapa 3 (20)	9.2	12.2	16.1
Etapa 4 (50)	10.2	13.3	17.2
Etapa 5 (100)	10.4	13.4	17.3
Etapa 6 (500)	10.4	13.4	17.3
Etapa 7 (1000)	10.4	13.4	17.3

Figura 41. Asentamientos con micropilotes

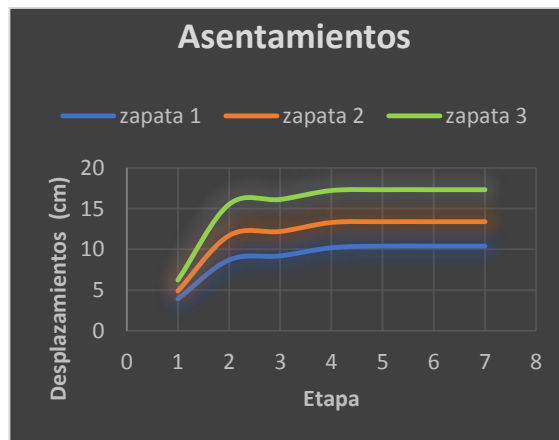


Tabla 7. Asentamientos diferenciales con Micropilotes

Asentamientos diferenciales con micropilotes			
Días	z1 y z2	z2 y z3	z1 y z3
	Asentamientos (cm)		
Etapa 1 (0)	0.99	1.31	2.3
Etapa 2 (10)	3	3.8	6.8
Etapa 3 (20)	3	3.9	6.9
Etapa 4 (50)	3.1	3.9	7
Etapa 5 (100)	3	3.9	6.9
Etapa 6 (500)	3	3.9	6.9
Etapa 7 (1000)	3	3.9	6.9

9. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LOS MODELOS.

Tabla 8. Comparación de asentamientos diferenciales zapatas 1 y 2

Asentamientos diferenciales zapata 1 y 2				
Etapas	sin micropilotes (cm)		con micropilotes (cm)	
	Etapa 1 (0)	0.99	cumple	0.99
Etapa 2 (10)	3	cumple	3	Cumple
Etapa 3 (20)	3	cumple	3	Cumple
Etapa 4 (50)	3.1	cumple	3.1	Cumple
Etapa 5 (100)	3.2	cumple	3	Cumple
Etapa 6 (500)	3.7	cumple	3	Cumple
Etapa 7 (1000)	3.75	cumple	3	Cumple

Tabla 9. Comparación de asentamientos diferenciales zapatas 2 y 3

Asentamientos diferenciales zapata 2 y 3				
Etapas	sin micropilotes (cm)		con micropilotes (cm)	
	Etapa 1 (0)	1.3	cumple	1.3
Etapa 2 (10)	3.8	cumple	3.8	Cumple
Etapa 3 (20)	3.9	cumple	3.9	Cumple
Etapa 4 (50)	3.9	cumple	3.9	Cumple
Etapa 5 (100)	5	no cumple	3.9	Cumple
Etapa 6 (500)	5.2	no cumple	3.9	Cumple
Etapa 7 (1000)	5.65	no cumple	3.9	Cumple

Tabla 10. Comparación de asentamientos diferenciales zapatas 1 y 3

Asentamientos diferenciales zapata 1 y 3				
Etapas	sin micropilotes (cm)		con micropilotes (cm)	
	Etapa 1 (0)	2.3	cumple	2.3
Etapa 2 (10)	6.8	cumple	6.8	Cumple
Etapa 3 (20)	6.9	cumple	6.9	Cumple

Asentamientos diferenciales zapata 1 y 3				
Etapas	sin micropilotes (cm)		con micropilotes (cm)	
Etapa 4 (50)	7	cumple	7	Cumple
Etapa 5 (100)	8.2	no cumple	6.9	Cumple
Etapa 6 (500)	8.9	no cumple	6.9	Cumple
Etapa 7 (1000)	9.4	no cumple	6.9	Cumple

10. CONCLUSIONES.

Con el estudio previo al desarrollo del proyecto, se aprendió a utilizar las herramientas de RS3 para crear un modelo en 3D que sea aplicado en diferentes situaciones y retos de la ingeniería. En el transcurso de la investigación se pudo apreciar la *magnitud* del programa ya que tiene la capacidad de desarrollar modelos en los casos referidos al área de Geotecnia. Para este proyecto se hizo énfasis en mitigar los asentamientos diferenciales en una estructura con la incorporación de micropilotes, en donde el software utiliza la teoría Biot.

Con los conocimientos adquiridos de la investigación del Software, se establecieron los parámetros apropiados para el desarrollo de los modelos. Con lo cual se alcanzó las condiciones ideales para que se produjeran los asentamientos diferenciales superiores a los aceptados por la NSR-10. Alcanzado esto, se pudo crear un nuevo modelo con las mismas condiciones del anterior, pero adicionando micropilotes para la mitigación de los asentamientos diferenciales producidos en el primer modelo, alcanzando el rango de aceptación de la NSR-10.

Con los resultados obtenidos se pudo comparar el cambio de los asentamientos diferenciales entre el modelo inicial y el modelo con micropilotes, en donde se logró el objetivo principal que era reducir los asentamientos diferenciales lo suficiente para que estuvieran dentro de lo permitido por la Norma Sismo Resistente NSR-10 que en este caso no podían superar cuatro centímetros (4cm). Con lo visto en el modelo final (con micropilotes), es posible aplicar el método utilizado en la zapata 3 para la zapata 2, disminuyendo aún más los asentamientos diferenciales alcanzados.

BIBLIOGRAFÍA

ANON, 2015. [En línea] Disponible: <http://ing.unne.edu.ar/mecap/Investigacion/Tesis/MgDiRado-Cap1.pdf> [Visita 6 May 2018].

ARQUIGRAFICO. Causas de las Fallas en Cimientos o Fundaciones de Edificaciones. 2018 [En línea] Disponible en: <https://arquigrafico.com/causas-de-las-fallas-en-fundaciones-de-edificaciones/#> [Visita 13 Feb. 2018].

CIVILGEEKS Pilotes, casos en que se usan pilotes. 2018 Disponible en: <https://civilgeeks.com/2015/05/21/pilotes-casos-en-que-se-usan-pilotes/> [Visita 27 Jan. 2018].

EDUCAPLUS Coeficiente de Poisson | 2018. Disponible: <http://www.educaplus.org/elementos-quimicos/propiedades/ratio-poisson.html> [Visita 3-5-2018].

ESCOBAR ZARRABE, D., & GIRALDO HOYOS, S. Análisis de las propiedades mecánicas del suelo a partir de la mezcla con residuos de la construcción. 2013 Recuperado 10 febrero, 2018, de <https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/315/1/CIVI0426.pdf>. p[22-23].

GIL MONTES, J. Estudio Técnico Recursos Hidrogeológicos. [Blog] maquinaria y servicios la vera. 2013 [Visita 4 May 2018].

JUAREZ BADILLO, E. and RICO RODRIGUEZ, A. Teoría y Aplicaciones de la Mecánica de suelos. 1st ed. Mexico: Editorial Limusa 1978, p.52.

NORMA SISMO RESISTENTE Título H, Estudios Geotécnicos. pág. H-18. Bogotá D.C, Colombia: AIS. 2012

ROCSCIENCE. RS3 Disponible:
<https://www.rocscience.com/rocscience/products/rs3> [Visita 13 Feb. 2018].

RONDON, J. and TORRADO, L. Docencia / Cimentación y fundaciones / Esfuerzos en masas de suelos. [en línea] INGEAS S.A.S. 2015 Disponible en:
<http://ingeassas.com/docencia.php>

RYCZKOWSKI, Angela. Módulo elástico en suelos. Geniolandia. 2018, February 01
Disponible : <http://www.geniolandia.com/13143201/modulo-elastico-en-suelos>