

**Determinación de asentamientos inmediatos en un pilote aislado mediante un software de
elementos finitos**

Yurley Vanessa Pérez García 2140202

Johan Sebastián Rodríguez Sanguino 2140203

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director:

Jorge Alejandro Mendoza Rizo

Doctor en Ingeniería Civil

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2019

Agradecimientos

Infinitamente agradecida con Dios por haberme permitido avanzar un ciclo más en mi vida, por permitirme crecer como persona responsable y por brindarme sabiduría, salud y fortaleza para culminar este objetivo.

A mi familia agradecerles y amarles por ser el motor que cada día me da fuerzas para seguir adelante y me motiva a ser mejor. Por siempre apoyarme en cada decisión y acompañarme en los logros de mi vida.

A mis compañeros de clases por aportar a mi vida momentos y experiencias nuevas que nunca voy a olvidar.

A todos los profesores que brindaron su conocimiento y esfuerzo para educar a grandes profesionales íntegros y entregados a su labor. Gracias.

A la Universidad Industrial de Santander por generar en mí la satisfacción de ser partícipe de tan importante institución.

Yurley Vanessa Pérez García

Este proyecto de grado va dedicado primero que todo a la bendición del señor, que con su gloria ilumina mi camino todos los días, a mi padre que con su gran esfuerzo y dedicación le debo mis éxitos presentes y futuros, que bien sea con mucho o poco me sacó adelante todos mis años como estudiante, a mi querida madre que lo es todo para mí y por quien lo daría todo, por tantas noches en vela y tantas madrugadas difíciles, le deseo este primer éxito, a mis hermanos que son el complemento de mi diario vivir y la cimentación de mi educación, por los cuales he logrado varios de mis sueños, y por último y no menos importante a mis amigos y profesores que hicieron de mi paso por la UIS, una experiencia alegre e inolvidable tanto adentro como afuera del alma mater.

Johan Sebastián Rodríguez Sanguino

Contenido

	Pág.
Introducción	14
1. Objetivos.....	15
1.1 Objetivo general.....	15
1.2 Objetivos específicos	15
2. Fundamento teórico	16
2.1 Cimentaciones profundas.....	16
2.2 Pilotes en concreto	16
2.3 Asentamientos en pilotes.	17
2.4 Parámetros elásticos del suelo.	20
2.5 Software de elementos finitos.....	21
3. Metodología	22
4. Desarrollo de los modelos.....	24
4.1 Geometría.....	24
4.2 Datos del problema	26
4.3 Definición de materiales.	28
4.4 Condiciones de contorno.....	29
4.5 Intervalos de tiempo.....	30

4.6 Generación de la malla.....	31
4.7 Densidad de la malla	31
4.8 Proceso para el cálculo de post proceso y resultados.	32
5. Análisis de resultados	33
5.1 Pilote pre excavado en suelo homogéneo	34
5.1.1 Modelo de pilote pre excavado en suelo homogéneo con variación del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson constante.....	34
5.1.2 Modelo de pilote pre excavado en suelo homogéneo con variación del coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad constante.	39
5.2 Modelo de un pilote pre excavado en un suelo estratificado compuesto por un suelo rígido sobre un suelo blando.....	41
5.3 Modelo de un pilote pre excavado en un suelo estratificado compuesto por un suelo blando sobre un suelo rígido.	42
5.4 Modelos con datos suavizados.....	44
5.4.1 Modelo homogéneo con datos suavizados.....	45
5.4.2 Modelo estratificado (rígido/blando) con datos suavizados.	46
5.4.3 Modelo estratificado (blando/rígido) con datos suavizados.	47
6. Conclusiones.....	47
Referencias bibliográficas.....	49
Apéndices.....	51

Lista de tablas

Pág.

Tabla 1. <i>Valores de ángulos de fricción de acuerdo a su módulo de elasticidad.....</i>	35
Tabla 2. <i>Valores de ángulos de fricción y N_q de acuerdo a los módulos de elasticidad.</i>	36
Tabla 3. <i>Valores de asentamiento teóricos y Software GiD y Code_Bright.....</i>	37
Tabla 4. <i>Valores de asentamiento teóricos y software GiD y Code_Bright.</i>	40

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1. Modelo suelo homogéneo</i>	22
<i>Figura 2. Modelo suelo estratificado (rígido/blando).....</i>	23
<i>Figura 3. Modelo suelo estratificado (blando/rígido).....</i>	23
<i>Figura 4. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad.</i>	24
<i>Figura 5. Geometría del modelo.....</i>	25
<i>Figura 6. Ventana de datos.....</i>	26
<i>Figura 7. Ventana de datos.....</i>	27
<i>Figura 8. Ventana de datos.....</i>	27
<i>Figura 9. Propiedades mecánicas.</i>	28
<i>Figura 10. Condiciones de contorno mecánicas.....</i>	29
<i>Figura 11. Ventana de intervalo de tiempo 1.</i>	30
<i>Figura 12. Ventana de intervalo de tiempo 2</i>	31
<i>Figura 13. Malla del modelo</i>	32
<i>Figura 14. Desplazamientos verticales.....</i>	33
<i>Figura 15. Esfuerzos verticales.</i>	33
<i>Figura 16. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad en un suelo homogéneo.</i>	34
<i>Figura 17. Modelo suelo homogéneo</i>	35

<i>Figura 18. Regresión lineal</i>	37
<i>Figura 19. Modelo suelo homogéneo</i>	38
<i>Figura 20. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad en un suelo homogéneo.</i>	38
<i>Figura 21. Modelo suelo homogéneo.....</i>	39
<i>Figura 22. Asentamiento vs. Coeficiente de Poisson.</i>	40
<i>Figura 23. Modelo suelo estratificado.....</i>	41
<i>Figura 24. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad con carga aplicada en la parte superior del pilote.</i>	42
<i>Figura 25. Modelo de suelo estratificado con carga aplicada en la parte superior del pilote.</i>	43
<i>Figura 26. Asentamiento vs. Distancia del pilote en la parte inferior.....</i>	43
<i>Figura 27. Asentamiento vs Módulo de elasticidad.</i>	44
<i>Figura 28. Modelo de suelo homogéneo.</i>	45
<i>Figura 29. Asentamiento vs. Módulo elástico con datos suavizados.</i>	45
<i>Figura 30. Modelo suelo estratificado.....</i>	46
<i>Figura 31. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad con datos suavizados.</i>	46
<i>Figura 32. Asentamiento vs. Módulo elástico con datos suavizados.</i>	47

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Segundo y tercer caso	51
Apéndice B. Segundo caso	54
Apéndice C. Primer y segundo caso	57
Apéndice D. Suavizado primer y segundo caso.....	60
Apéndice E. Modelo suavizado primer y segundo caso	62
Apéndice F. Primer y segundo caso de modelo estratificado blando/rígido con datos suavizados.....	65

Resumen

Título: Determinación de asentamiento inmediatos en un pilote aislado mediante un software de elementos finitos.*

Autor(es): Yurley Vanessa Pérez García**
Johan Sebastián Rodríguez Sanguino

Palabras Clave: Pilote, parámetros elásticos, suelos, asentamiento, software de elementos finitos.

Descripción:

En esta investigación se analiza el asentamiento de un pilote pre excavado de concreto en diferentes tipos de suelo (blando y rígido) debido a la influencia de la variación de los parámetros elásticos en los modelos de suelos estratificados y a un modelo de suelo homogéneo a través de simulaciones utilizando la técnica de elementos finitos mediante el programa GiD y Code_Bright, comparado con la metodología utilizada teóricamente en el libro de Braja M. Das. Cabe resaltar que para la obtención de resultados en asentamiento las fuerzas fueron aplicadas hallando la carga correspondiente por punta y fricción y también la carga total del pilote.

Se demostró que al realizar la comparación respectiva entre el programa GiD y Code_Bright con las ecuaciones teóricas en un suelo homogéneo, a mayor módulo de elasticidad del suelo, menor es el desplazamiento en la punta del pilote y el porcentaje de error es menor; por el contrario, cuando el suelo es estratificado se observa que existe una mayor variación del error dado que el programa toma en cuenta los dos suelos a la hora del cálculo de los asentamientos, mientras que con las formulas teóricas el asentamiento más grande se obtiene con el módulo de elasticidad que se encuentra en la punta del pilote ya que la ecuación no toma en cuenta el módulo de elasticidad en la parte superior.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo, Doctor en Ingeniería Civil

Abstract

Title: Determination of immediate settlement in an isolated pilot through a software of finite elements.*

Author(S): Yurley Vanessa Pérez García**
Johan Sebastián Rodríguez Sanguino

Keyword: Pile, elastic parameters, soils, settlements, finite elements software.

Description:

In this research the settlement of a pre-excavated pile of concrete in different types of soil (soft and rigid) is analyzed due to the influence of the variation of the elastic parameters in the stratified floor models and a homogeneous soil model through simulations using the finite element technique using the GiD program and Bright code, compared to the methodology used theoretically in Braja Das book. It should be noted that for obtaining results in settlement the forces were applied finding the corresponding load for tip and friction and also the total load of the pile.

It was shown that when making the respective comparison between the GiD program and Code_Bright with the theoretical equations in a homogeneous soil, the higher the modulus of elasticity of the soil, the lower the displacement at the tip of the pile and the percentage of error is lower; On the contrary, when the soil is stratified, it is observed that there is a greater variation of the error since the program takes into account the two soils at the time of the calculation of the settlements, while with the theoretical formulas the largest settlement is obtained with the modulus of elasticity that is at the tip of the pile since the equation does not take into account the modulus of elasticity in the upper part.

* Degree work

** Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Jorge Alejandro Mendoza Rizo, Doctor in Civil Engineering

Introducción

En pilotes aislados se utilizan normalmente métodos empíricos para calcular los asentamientos inmediatos, dado que, no existe una fórmula única y generalizada para poder realizar estos cálculos (Braja, 1999). Teniendo en cuenta la incertidumbre asociada a estos métodos, se propone realizar en este proyecto un análisis numérico para un pilote aislado en condiciones de suelo homogéneo y en condiciones de suelo estratificado para estudiar cómo se desarrollan los asentamientos inmediatos, y a partir de esto, comparar las metodologías empíricas con los resultados numéricos estableciendo cuáles son las mejores aproximaciones para el cálculo de asentamientos.

Este proyecto de investigación establece el cálculo de asentamientos inmediatos de un pilote pre excavado de concreto por sus características físicas y parámetros elásticos. Este análisis es modelado mediante el software computacional GiD y Code_Bright que permite la evaluación de los asentamientos verticales en el tiempo a partir de las propiedades de diferentes tipos de suelo. (Hernández, 2010)

Cabe resaltar que se hizo uso de una herramienta computacional que permite obtener e identificar la estratificación que brinde el mayor factor de seguridad al momento de realizar el cálculo del asentamiento.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Estudiar los asentamientos inmediatos en pilotes aislados a partir de simulaciones numéricas con los programas GiD y Code_Bright.

1.2 Objetivos específicos

- Estimar la influencia de los parámetros elásticos de un suelo homogéneo y el pilote para determinar su comportamiento en términos de desplazamiento.
- Realizar un análisis comparativo entre la solución numérica y las ecuaciones disponibles para el cálculo de asentamientos inmediatos en pilotes aislados.
- Analizar la influencia de los módulos de elasticidad en suelos estratificados sobre el asentamiento inmediato.

2. Fundamento teórico

Para dar desarrollo al proyecto es necesario definir algunos conceptos fundamentales que permiten realizar una breve introducción teórica del tema. Así mismo se exponen investigaciones y antecedentes pertinentes para la contextualización de la investigación.

El cálculo que permite identificar el asentamiento de una cimentación profunda se asocia con la capacidad de carga y los parámetros elásticos del suelo.

2.1 Cimentaciones profundas

Generalmente se denomina cimentación a un elemento estructural de unión diseñado para dar soporte a una construcción (Bertin & Gasc, 1976). Su función es diferir la carga de las estructuras más pesadas cuando se hace necesaria a una mayor profundidad para el soporte de las mismas.

Cuando una cimentación está correctamente diseñada transfiere la carga a lo largo del suelo sin sobrecargarlo, ya sea por las características del subsuelo, por el orden en que sus diferentes estratos se presentan, la naturaleza de las cargas que se transmitirán al subsuelo, las características del lugar, el fin operativo de la superestructura (Braja, 1999).

2.2 Pilotes en concreto

En un proceso de cimentación se hace necesario el uso de instrumentos constructivos que permitan soportar las cargas de mayor magnitud, además de transmitir las cargas de la superestructura e

infraestructura a través de estratos flojos e inconsistentes cuando la cimentación no se encuentra en un suelo ideal, permitiendo así soportar la estructura con seguridad (Palacios & Rojas, 2012). A estos instrumentos se les denomina pilotes.

De acuerdo a las situaciones que serán presentadas en este estudio, se destacan situaciones en donde los pilotes cobran importancia, sin embargo, a continuación, se exponen algunos de los casos más relevantes:

Cuando las cargas transmitidas por el edificio no se pueden distribuir adecuadamente en una cimentación superficial excediendo la capacidad portante del suelo. (Velandia & Veloza, 2016)

Puede darse que los estratos inmediatos a los cimientos produzcan asentamientos imprevistos y que el suelo resistente esté a cierta profundidad.

2.3 Asentamientos en pilotes.

Si bien, la contextualización en tema de pilotes es fundamental para dar desarrollo a este proyecto, se dará mayor relevancia a los asentamientos en pilotes, los cuales son definidos por Braja M. Das como la deformación vertical de la superficie de un terreno proveniente de la aplicación de carga debido al peso propio. (Braja, 1999) El asentamiento de un pilote bajo una carga de trabajo virtual es causado por tres factores:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 \quad (1)$$

donde,

s_e : asentamiento total del pilote.

$s_{e(1)}$: asentamiento elástico del pilote.

$s_{e(2)}$: asentamiento del pilote causado por la carga en la punta del pilote.

$s_{e(3)}$: asentamiento del pilote causado por la carga transmitida a lo largo del fuste del pilote.

Si el material del pilote se supone elástico, la deformación del fuste se evalúa usando los principios fundamentales de la mecánica de materiales (Braja, 1999).

$$s_1 = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws}L)}{A_p E_p} \quad (2)$$

donde,

Q_{wp} : carga en la punta del pilote bajo condición de carga de trabajo.

Q_{ws} : carga por resistencia de fricción (superficial) bajo condición de carga de trabajo.

A_p : área de la sección transversal del pilote.

E_p : módulo de elasticidad del material del pilote.

L : longitud del pilote.

La magnitud de ξ depende de la distribución de la resistencia por fricción (superficial) unitaria a lo largo del fuste. Si la distribución de f es uniforme o parabólica, $\xi = 0,5$. Sin embargo, para una distribución triangular, la magnitud de ξ es aproximadamente de 0.67 (Braja, 1999).

El asentamiento de un pilote causado por carga en la punta se expresa de la siguiente forma:

$$s_2 = \frac{q_{wp} D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{wp} \quad (3)$$

donde,

D : ancho o diámetro del pilote

q_{wp} : carga puntual por área unitaria en la punta del pilote: Q_{wp}/A_p

E_s : módulo de elasticidad del suelo en o bajo la punta del pilote.

I_{wp} : factor de influencia: 0.85

μ_s : relación de Poisson del suelo

El asentamiento de un pilote causado por la carga soportada a lo largo del fuste está dado por:

$$s_3 = \left(\frac{Q_{ws}}{pL} \right) \frac{D}{E_s} (1 - \mu_s^2) I_{ws} \quad (4)$$

Donde,

p : perímetro del pilote

L : longitud empotrada del pilote

I_{ws} : factor de influencia

Es de aclarar que el termino (Q_{ws}/pL) expresado en la ecuación (4) es el valor promedio de f a lo largo del fuste del pilote y que el factor de influencia, I_{ws} tiene una relación empírica simple (Braja, 1999)

$$I_{ws}: 2 + 0.35 \sqrt{\frac{L}{D}} \quad (5)$$

L : longitud empotrada del pilote

D : ancho o diámetro del pilote

2.4 Parámetros elásticos del suelo.

Una de las principales características del suelo donde se realizó la cimentación del pilote corresponde al módulo de elasticidad, también llamado módulo de Young. El módulo de elasticidad como el parámetro característico de los materiales que indica la relación existente entre los incrementos de tensión aplicados en el ensayo de tracción y los incrementos de deformación longitudinal unitaria, esto además indica la rigidez de un material. Cuanto más rígido es un material mayor es su módulo de elasticidad (Pérez, 2014). El segundo parámetro analizado es el coeficiente Poisson que corresponde a la razón entre la elongación longitudinal y deformación transversal en un ensayo de tracción de un material. (Vélez, 2008)

2.5 Software de elementos finitos

GiD es un programa gráfico, destinado a la definición y preparación de los datos para realizar una simulación numérica. En cuanto al post-proceso consiste en la visualización de los resultados de modo que sean fácilmente interpretables por colores, curvas de nivel, etiquetas, vectores, gráficas, animaciones, etc. (International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) [GiD], s.f.)

La creación de los datos implica la definición de la geometría a estudiar, los materiales que la componen, las condiciones de contorno, fuerzas aplicadas, y otros parámetros como la creación de una malla (para elementos finitos, diferencias finitas u otros métodos). Por ende, se puede resaltar una característica esencial de GiD es que no está especializado en un tipo de análisis, a priori GiD no conoce ningún material o condición, hasta que no se carga un “tipo de problema” por ende cualquier usuario puede crear uno en particular, de modo que GiD conozca la sintaxis de su programa de simulación particular. (International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) [GiD], s.f.)

Code_Bright es un programa de Método de Elementos Finitos (FEM) capaz de realizar análisis acoplados termo-hidromecánicos (THM) en medios geológicos. Se ha desarrollado en el Departamento de Ingeniería Civil e Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), y funciona en combinación con el procesador pre/post-GiD, desarrollado por el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE). (International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE), sf)

3. Metodología

Se realizó una fundamentación teórica en la cual se contextualizaron los conceptos claves que dieron desarrollo al proyecto, mediante una búsqueda bibliográfica que anexa trabajos de grado y artículos de investigación en donde se analizaron los diferentes métodos propuestos para el cálculo de asentamientos.

Se desarrollaron las competencias exigidas para cumplir con el manejo de programa GiD y Code_Bright por medio de manuales y material audiovisual permitiendo dar inicio a la ejecución de los modelos establecidos para el análisis de asentamientos asumiendo un suelo en un medio continuo, homogéneo, isotrópico, lineal y elástico.

Inicialmente se realizó un análisis de un modelo con suelo homogéneo Figura 1. Posteriormente el análisis se efectuó en dos modelos de suelos estratificados los cuales fueron alternados. Figura 2 y 3.

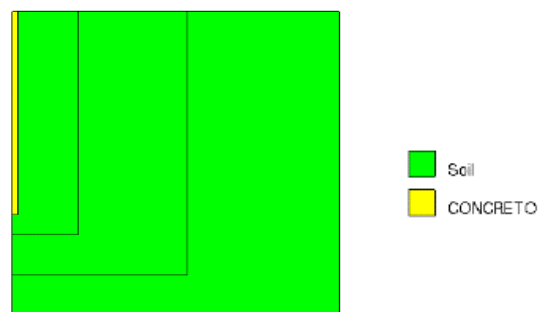


Figura 1. Modelo suelo homogéneo

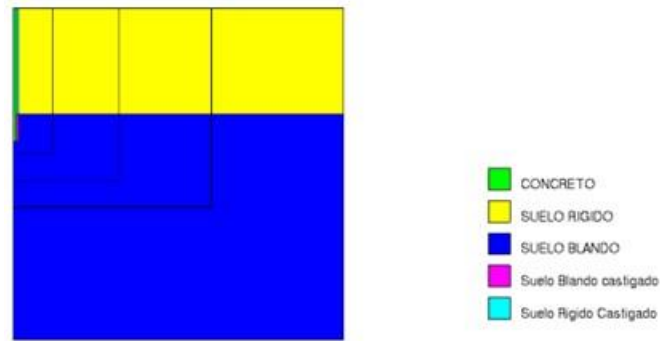


Figura 2. Modelo suelo estratificado (rígido/blando)

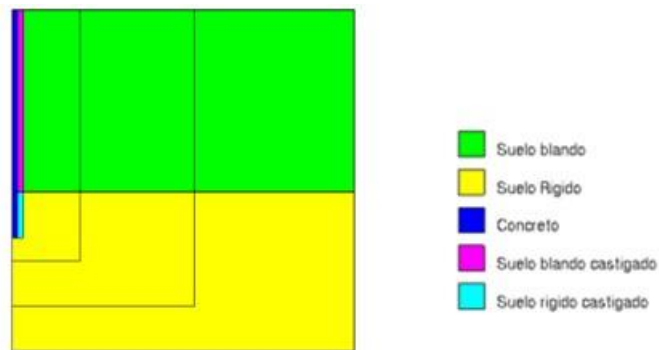


Figura 3. Modelo suelo estratificado (blando/rígido)

Se realizó un análisis de sensibilidad de los módulos elásticos teniendo en cuenta el escenario de un suelo homogéneo y un suelo estratificado variando no solo el modulo elástico sino también la relación de Poisson para determinando el efecto de las condiciones del suelo en el cálculo de asentamiento.

A partir de estos efectos se realizó la curva de asentamiento vs. Módulo elástico, Figura 4, en la cual se demostró que, a mayor módulo elástico, los asentamientos son menores, así como la comparación de las ecuaciones empíricas para el cálculo asentamientos y el programa GiD y Code_Bright.

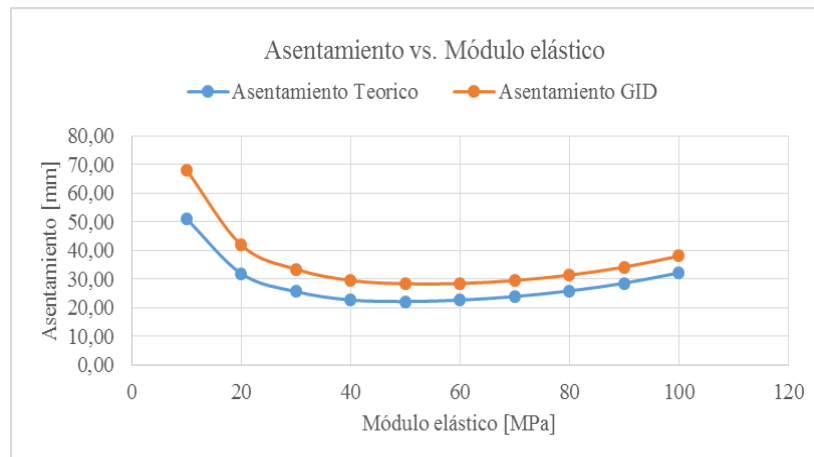


Figura 4. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad.

4. Desarrollo de los modelos

El planteamiento de la geometría de los modelos se realizó en el software para elementos finitos GiD.13.0.4. El cual permite generar datos de pre-proceso y post-proceso. Es decir, permite crear la geometría, asignar propiedades, condiciones de contorno y desde su plataforma conectar al programa de cálculo Code_Bright. Por otra parte, una vez finalizada esta fase, GiD permite visualizar los resultados y exportar datos como desplazamientos, esfuerzos, presión de agua entre otras variables, para el tipo de problema en modo Code_Bright versión 4.04. (Pérez, 2014)

4.1 Geometría

El programa GiD funciona creando una geometría consecutiva la cual comienza por un punto, continua con una línea pasando por una superficie hasta llegar a tener un volumen, ya que GiD es

un programa CAD (Computer Aided Design). En este proyecto se utilizó el programa hasta la creación de una superficie dado que el modelo será comparado con las ecuaciones teóricas en dos dimensiones.

Se utilizó una geometría de 15 m de alto y 15 m de largo para la creación del modelo, las dimensiones del pilote constan de 0,25 m de radio y 10 m de longitud y se secciono el suelo con el fin de poder observar los desplazamientos a lo largo de la distancia del pilote. Es importante reconocer que una de estas zonas fue denominada castigo del suelo que consta de dimensiones de 0,25 m de largo y 10 m de alto creada con el fin de que los nodos en contacto no afectaran los resultados de asentamientos, correspondiente a esto se tuvo en cuenta el no crear un modelo grande con el propósito de no perder espacio en las mallas ya que estas tienen un número de nodos limitado.

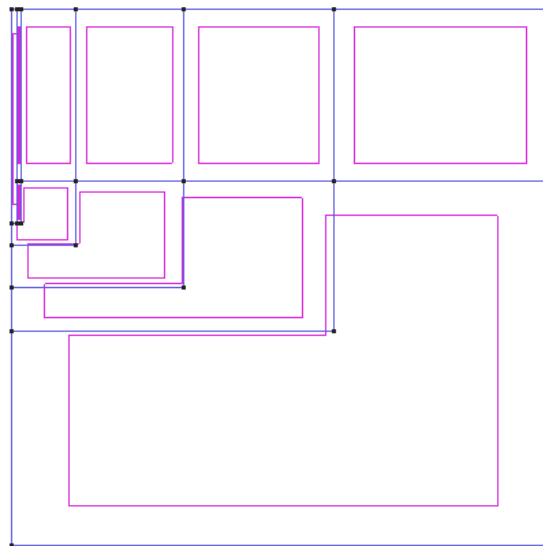


Figura 5. Geometría del modelo.

4.2 Datos del problema

El software Code_Bright requiere introducir los datos generales del problema para llevar a cabo la simulación. Estos datos influyen en todos los datos no relacionados con una entidad geométrica o en un intervalo de tiempo.

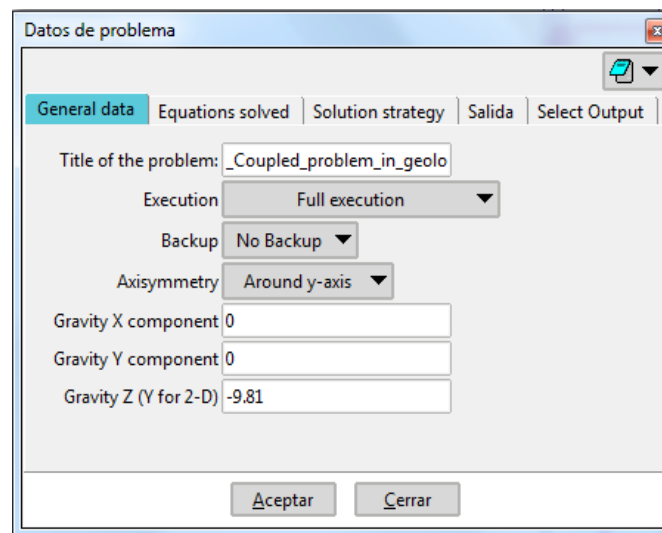


Figura 6. Ventana de datos.

En la pestaña “General data” se hizo uso de la herramienta axisimetría en el eje Y que facilitó el proceso de creación del modelo, dado que la geometría se llevó a cabo con la mitad cumpliendo con la función generar cálculos en un diseño completo.

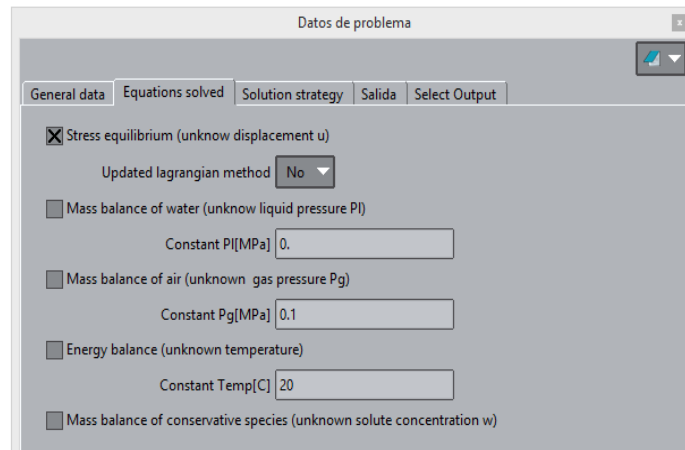


Figura 7. Ventana de datos

En la pestaña “Equations solved” se indica el tipo de problema a resolver, que en este caso se trata de un problema mecánico para el cálculo de asentamientos producidos por las diferentes cargas.

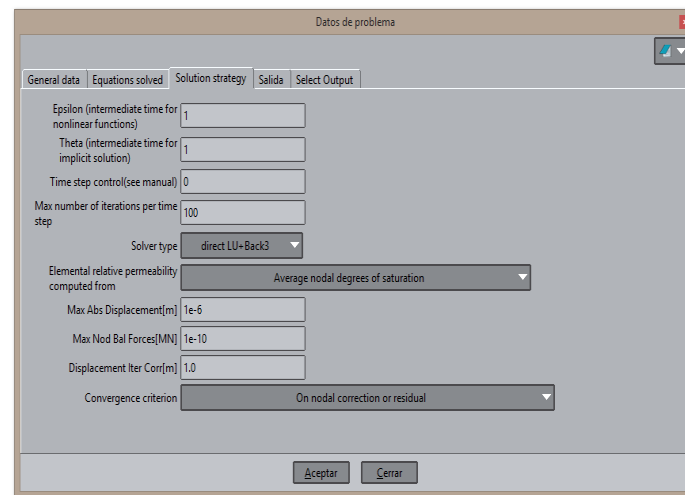


Figura 8. Ventana de datos.

La pestaña “Solution strategy” contiene la estrategia utilizada para la solución de las simulaciones, entre ellas es la cantidad de iteraciones que se utilizan en cada uno de los pasos. En este proyecto se tienen dos pasos, el primero consta de un modelo sin carga que se deforma por su propio peso y el segundo donde se aplica carga. Para cada uno de los pasos se tienen 100 iteraciones.

La pestaña “Salida” no es necesario para este tipo de simulación, por consiguiente, se deja por defecto.

4.3 Definición de materiales.

En esta etapa se definieron las propiedades de cada material a utilizar en la simulación, como lo es el tipo de suelo y concreto a utilizar. Estos materiales se asignan sobre las superficies creadas.

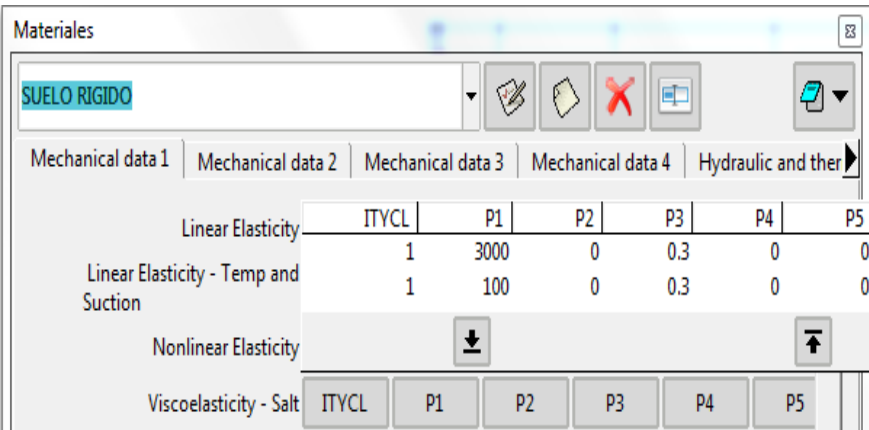


Figura 9. Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas de los materiales dependen de cual material se está usando, para este proyecto se cuenta con un mismo tipo de concreto para todos los ejemplos y dos tipos de suelo diferentes, donde en el valor de P1 establece el módulo de elasticidad y en el valor de P3 la relación de Poisson. Estos valores dependen del modelo que se esté analizando.

4.4 Condiciones de contorno.

El programa GiD permite incluir las condiciones de contorno alrededor de la entidad geométrica, Estas condiciones dependen del problema a solucionar, en este proyecto se dio uso a las fuerzas puntuales para representar la carga que se le aplica al pilote y condiciones de desplazamiento, las cuales restringen el movimiento hacia determinadas direcciones.

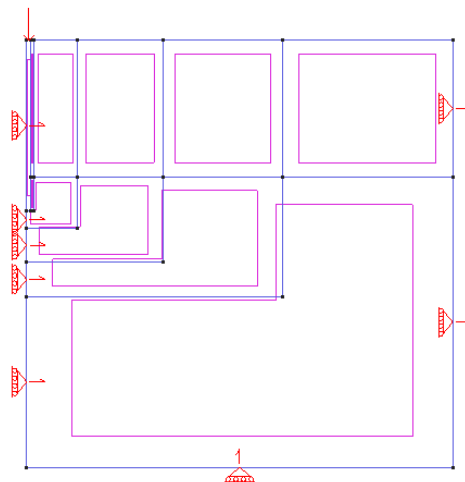


Figura 10. Condiciones de contorno mecánicas.

4.5 Intervalos de tiempo.

En las simulaciones pueden ocurrir problemas transitorios a lo largo del tiempo, debido a esto es necesario definir varios intervalos de tiempo y con la ayuda de la cantidad de iteraciones por paso poder así saber en qué momento exacto está ocurriendo un cambio representativo.

Como fue mencionado anteriormente, se cuenta con dos pasos en los cuales el primero se deja solo con el peso del suelo sin ningún tipo de carga externa con el fin de un equilibrio geo-estático del modelo y el segundo paso en el cual se aplica carga para observar el efecto de desplazamiento del suelo.

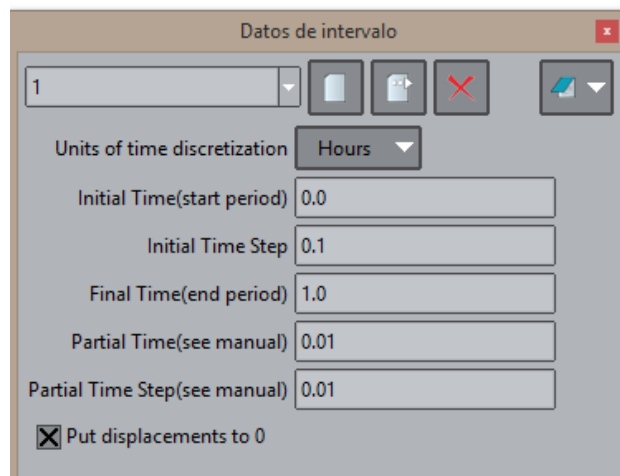


Figura 11. Ventana de intervalo de tiempo 1.

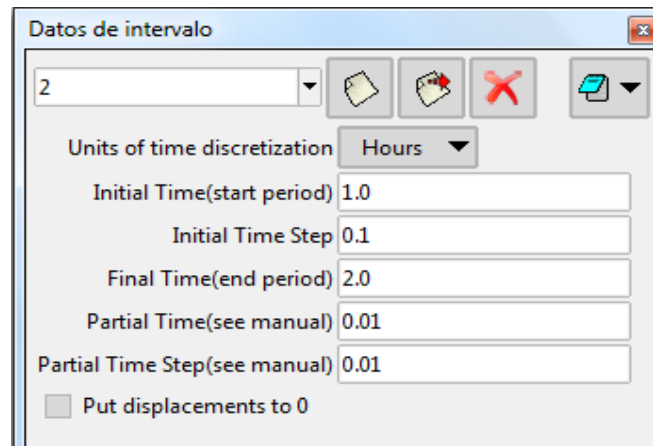


Figura 12. Ventana de intervalo de tiempo 2

4.6 Generación de la malla

La generación de la malla consiste en discretizar la geometría en nodos y elementos. En este proyecto se subdividió cada una de la superficie de un mismo material para poder tener un mallado más pequeño y detallado no estructural, el cual está compuesto por elementos lineales triangulares en el material que se encuentra más cercano al pilote, dado que, en este intervalo es donde se desea analizar detalladamente el asentamiento.

4.7 Densidad de la malla

La densidad de la malla en el caso estudiantil con el que se trabajó limita a tener una cantidad de nodos de 1010 que dependiendo de los nodos se tiene la cantidad de triángulos. El parámetro que controla el tamaño elementos triangulares es la longitud media de sus lados. Para los modelos analizados, se utilizaron diferentes tamaños de malla, desde 1 m para la parte más lejana del pilote hasta 0.2 m adentro del pilote.

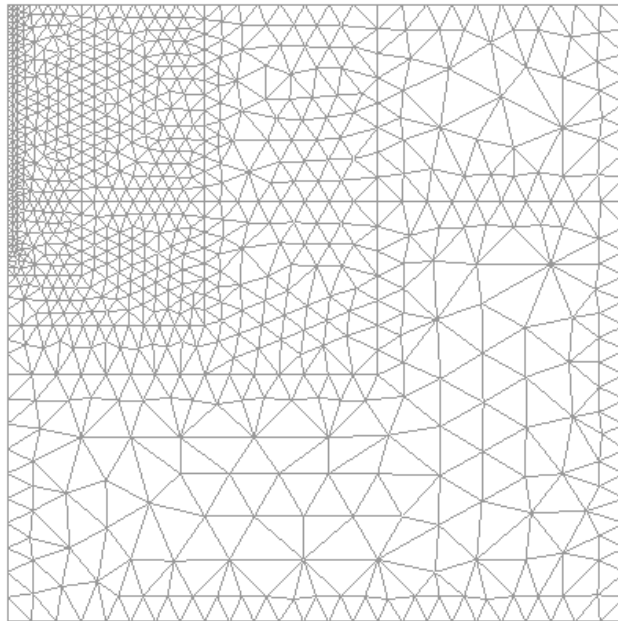


Figura 13. Malla del modelo

4.8 Proceso para el cálculo de post proceso y resultados.

La parte del post proceso se hizo con la ayuda del software Code_Bright, ya que este realiza los cálculos de los modelos. El programa GiD actúa como un pre procesador. El post proceso permite visualizar primordialmente el desplazamiento vertical que se tiene en el pilote y con la ayuda de las iteraciones observando cómo va cambiando a lo largo del tiempo y en diferentes puntos de la geometría ver Figura 14. Code_Bright permite observar esfuerzos calculados que fueron usados para comprobar que el asentamiento del modelo es el correcto ver Figura 15.

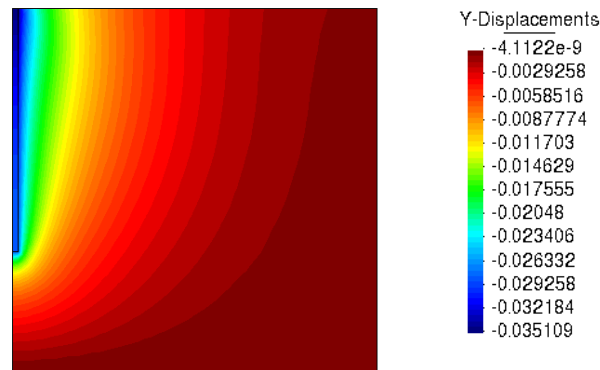


Figura 14. Desplazamientos verticales.

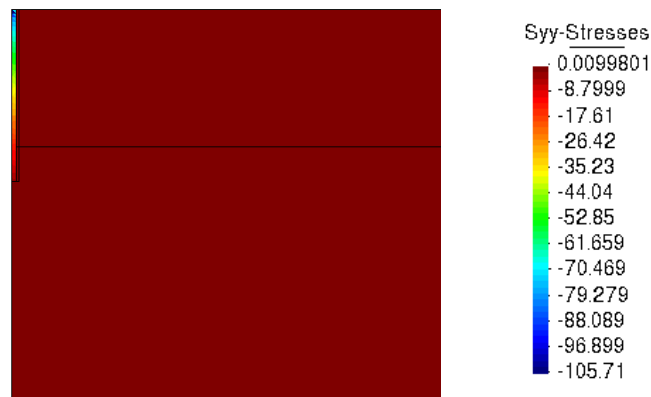


Figura 15. Esfuerzos verticales.

5. Análisis de resultados

Basados en la información emitida al software GiD y Code_Bright y haciendo uso de las ecuaciones para el cálculo de asentamientos en un pilote pre excavado se realizaron los modelos en un suelo homogéneo y en suelos estratificados procediendo a realizar la respectiva comparación teórica (1) y del software GiD Y Code_Bright.

5.1 Pilote pre excavado en suelo homogéneo

5.1.1 Modelo de pilote pre excavado en suelo homogéneo con variación del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson constante. Para el desarrollo de la Figura 16 se procede a variar el módulo de elasticidad desde 10 MPa hasta 100 MPa y el coeficiente de Poisson se dejó constante con un valor de 0,3 obteniendo valores de asentamiento de 50,97 mm a 32,15 mm teóricamente y asentamientos en el Software GiD y Code_Bright de 67,99 mm a 38,03 mm, lo que permite analizar que se encuentran valores con un mejor asentamiento calculados por medio de las fórmulas empíricas debido a que en estas se tienen en cuenta más propiedades del suelo, ver tabla 3. En la Figura 17 se observa el desplazamiento vertical obtenido de 41,80 mm en el post-proceso del modelo del pilote pre excavado en suelo homogéneo con un módulo de elasticidad de 20 MPa.

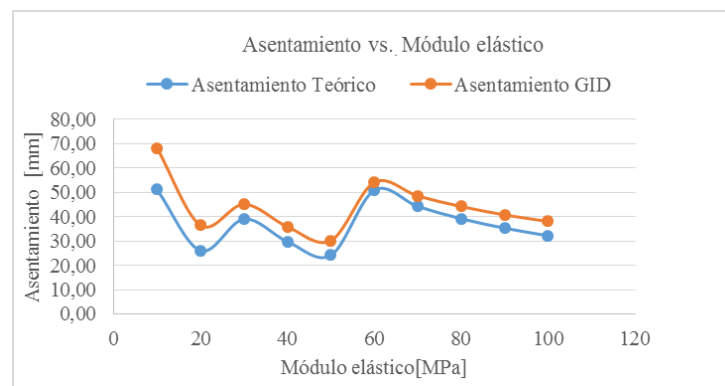


Figura 16. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad en un suelo homogéneo.

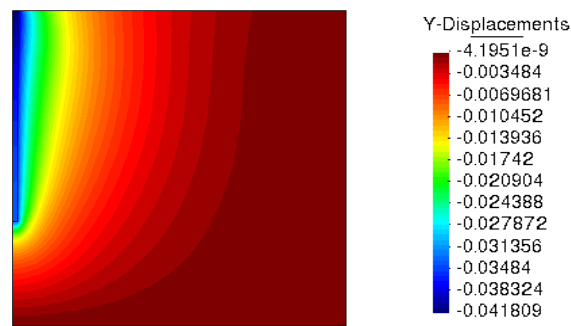


Figura 17. Modelo suelo homogéneo

Se puede observar en la Figura 16 tres zonas muy significativas en las cuales la carga aplicada es la misma en cada una de ellas, con el fin de encontrar una gráfica donde se puede observar una parábola cóncava hacia arriba se procede a encontrar los valores respectivos de N_q y ángulo de fricción más aproximados para cada uno de los módulos y a la vez tener fuerzas diferentes en cada uno de los casos, ver tabla 1.

Para dicho cálculo se realizó una regresión lineal, ver Figura 18, utilizando como puntos de referencia los módulos límites de 10 MPa y 100 MPa, encontrando así un ángulo de fricción adecuado y realizando una interpolación entre los valores para hallar los N_q correspondientes en cada caso, ver tabla 2.

Tabla 1. Valores de ángulos de fricción de acuerdo a su módulo de elasticidad.

E [MPa]	Φ°
10	20,00
20	21,78
30	23,56
40	25,33

Tabla 1. *Continuación*

E [MPa]	Φ°
50	27,11
60	28,89
70	30,67
80	32,45
90	34,22
100	36,00

Tabla 2. *Valores de ángulos de fricción y N_q de acuerdo a los módulos de elasticidad.*

Φ°	N_q	E [MPa]
20	6,4	10
21,78	7,93	20
23,56	9,46	30
25,33	11,07	40
27,11	13,41	50
28,89	16,35	60
30,67	20,00	70
32,45	24,58	80
34,22	30,33	90
36,00	37,7	100

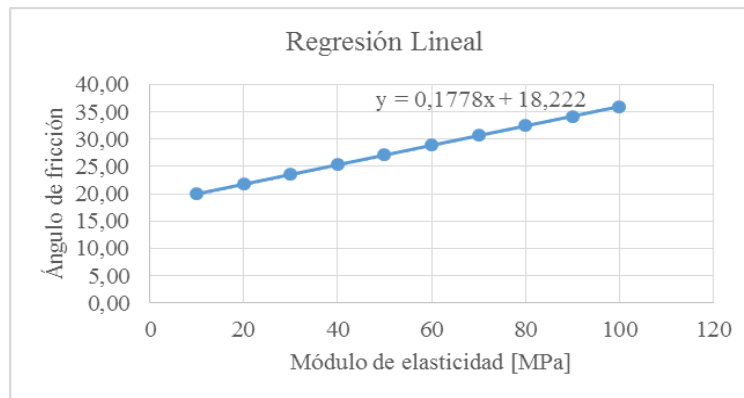


Figura 18. Regresión lineal

Se suavizó la Figura 16 con el fin obtener un valor más exacto de N_q y un ángulo de fricción de acuerdo a cada uno de los módulos y así no tener grandes diferencias de suelos, ver Figura 20.

Cabe resaltar que en esta parte como se tienen datos diferentes e independientes cada uno de ellos consta de cargas diferentes. Dando un total de diez (10) cargas.

Tabla 3. Valores de asentamiento teóricos y Software GiD y Code_Bright.

E [MPa]	S_t [mm]	S_{GiD} [mm]	% Diferencia
10	50,97	67,99	33,38
20	31,86	41,80	31,22
30	25,58	33,38	30,47
40	22,68	29,49	30,04
50	22,15	28,32	27,88
60	22,64	28,43	25,57
70	23,89	29,48	23,40
80	25,86	31,39	21,38
90	28,55	34,17	19,69
100	32,15	38,03	18,29

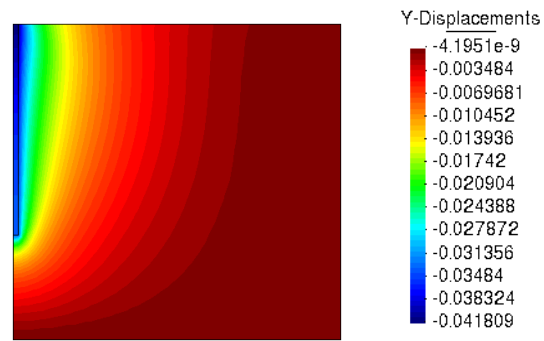


Figura 19. Modelo suelo homogéneo

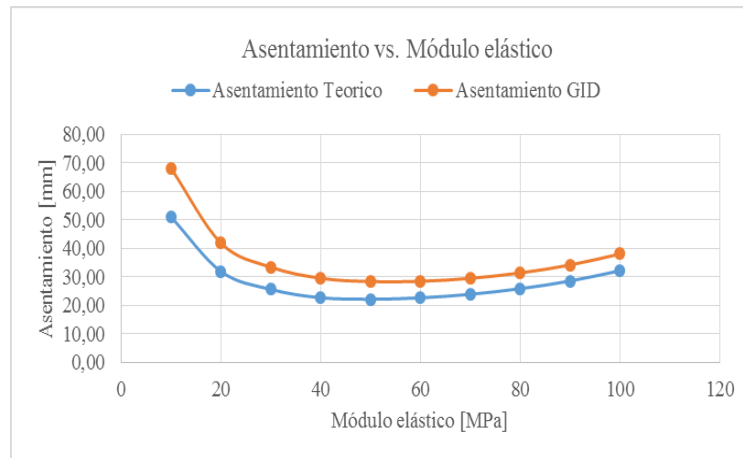


Figura 20. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad en un suelo homogéneo.

5.1.2 Modelo de pilote pre excavado en suelo homogéneo con variación del coeficiente de Poisson y módulo de elasticidad constante. Se plasmaron tres casos con valores diferentes de módulos de elasticidad variando en cada uno de ellos el coeficiente de Poisson de 0,1 a 0,45 con el fin de calcular el asentamiento correspondiente por teoría y por el Software de elementos finitos GiD y Code_Bright.

Haciendo uso de los resultados arrojados por cada uno de los procedimientos se realizó la Figura 22 que representa el comportamiento de asentamiento en un suelo homogéneo con un módulo de elasticidad de 20 MPa y la comparación de asentamientos que disminuyen teóricamente de 50,97 mm a 32,15 mm y por software de 67,99 mm a 38,03 mm, ver tabla 4. Es importante reconocer que al aumentar del coeficiente de Poisson los asentamientos presentan una disminución. Segundo y tercer caso, ver Apéndice A.

En la Figura 21 se observa el comportamiento del suelo en un post proceso arrojando un valor de asentamiento del software de elementos finitos de 35,11 mm.

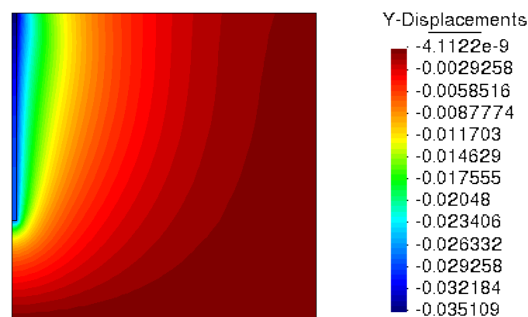


Figura 21. Modelo suelo homogéneo.

Tabla 4. Valores de asentamiento teóricos y software GiD y Code_Bright.

E [MPa]	20	Gráfica suavizada
Φ°	20	
Nq	6,4	

Poisson	S _t [mm]	S _{GiD} [mm]	% Diferencia
0,10	28,20	33,34	18,22
0,15	27,85	34,31	23,20
0,20	27,37	35,10	28,24
0,25	26,76	35,81	33,82
0,30	26,00	36,41	40,04
0,35	25,11	36,86	46,79
0,40	24,08	37,12	54,15
0,45	22,91	37,03	61,63

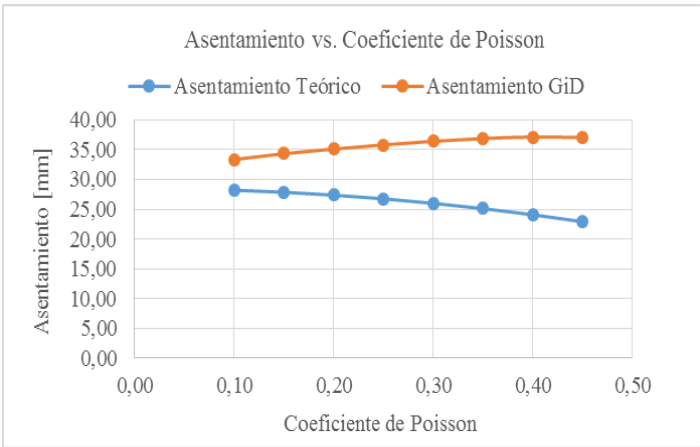


Figura 22. Asentamiento vs. Coeficiente de Poisson.

5.2 Modelo de un pilote pre excavado en un suelo estratificado compuesto por un suelo rígido sobre un suelo blando.

En busca de realizar el respectivo análisis del asentamiento en suelos estratificados compuesto por un suelo blando sobre un suelo rígido se establecieron dos casos. Uno de ellos será expuesto a continuación y el segundo caso, ver Apéndice B.

En el primer caso se dejó constante el módulo del suelo rígido y se varió el módulo del suelo blando hasta hacerlo llegar a una igualdad de módulos de suelo rígido, estos módulos se relacionaron con el fin de encontrar los asentamientos en el software de elementos finitos donde la carga última de 2515 kN/m² fue situada en la parte superior del pilote arrojando un asentamiento calculados en el post-proceso del software de 21,53 mm ubicado en la segunda sección del suelo, comparando este resultado con el asentamiento de 50,78 mm calculado por la ecuación 1 se analiza una gran diferencia.

Se puede observar en la Figura 24 la disminución de los asentamientos en cada una de las tres zonas representadas a medida que la relación de módulos es mayor.

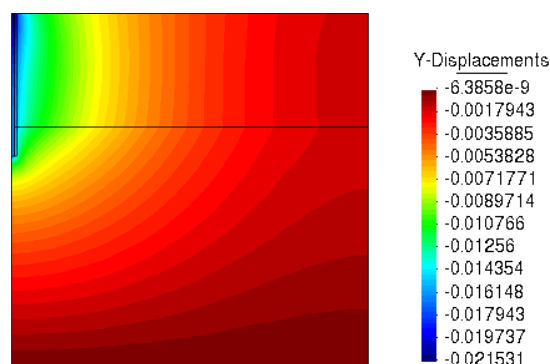


Figura 23. Modelo suelo estratificado.

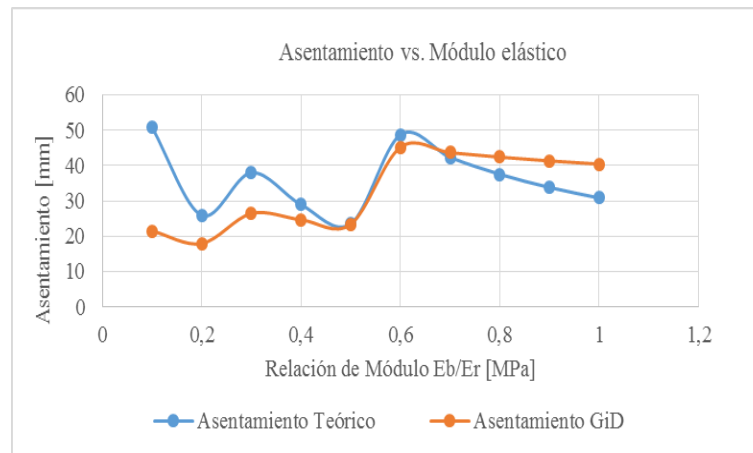


Figura 24. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad con carga aplicada en la parte superior del pilote.

5.3 Modelo de un pilote pre excavado en un suelo estratificado compuesto por un suelo blando sobre un suelo rígido.

Es importante conocer cómo se afectan los asentamientos de un pilote pre excavado en suelos estratificados, por lo cual se realizó un análisis en un modelo de un suelo blando sobre un suelo rígido donde el módulo del suelo rígido se varió haciéndolo llegar a una igualdad de módulo de suelo blando manteniendo este constante en 10 MPa, calculando así asentamientos teóricos y de post-proceso del software. Se establecieron dos casos de los cuales el primero será explicado a continuación y el segundo, ver Apéndice C.

En el primer caso para el cálculo de asentamientos mediante el software de elementos finitos GiD y Code_Bright se aplicó la carga ultima de 6565 kN/m² en la parte superior del pilote generando un asentamiento medido en la parte superior del suelo de 80,02 mm y en la parte inferior de 53,55 mm comparando estos con el asentamiento de 32,67 mm obtenido con la ecuación 1 se demuestra que a mayor módulo de elasticidad en cada uno de los suelos es asentamiento es menor.

En la Figura 27 se puede observar lo anteriormente dicho en cada una de las secciones representadas del suelo.

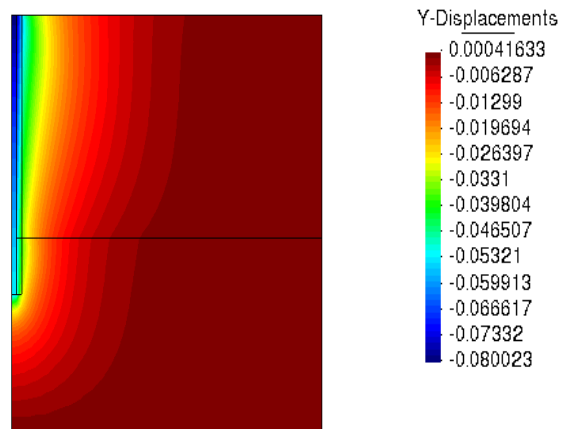


Figura 25. Modelo de suelo estratificado con carga aplicada en la parte superior del pilote.

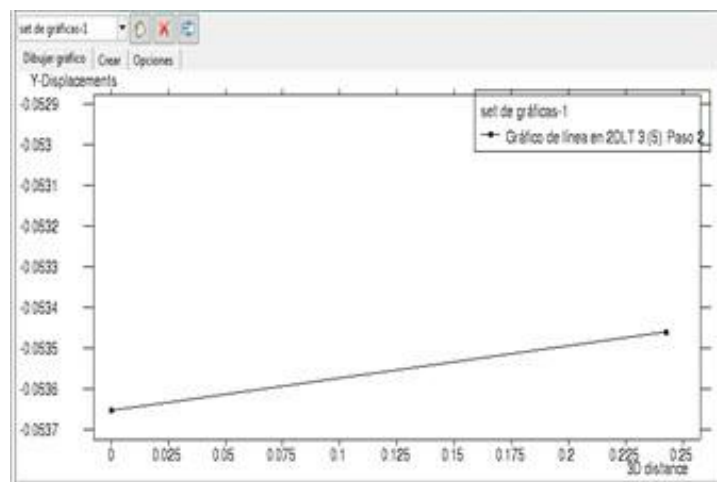


Figura 26. Asentamiento vs. Distancia del pilote en la parte inferior.

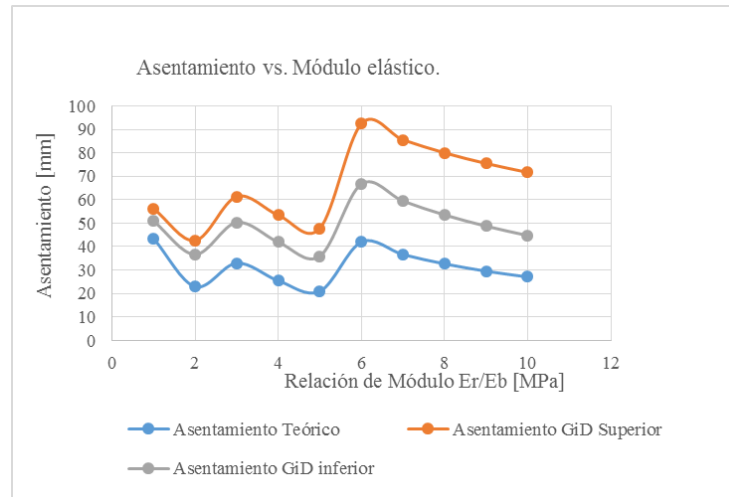


Figura 27. Asentamiento vs Módulo de elasticidad.

5.4 Modelos con datos suavizados.

Con el fin de encontrar una gráfica suavizada en la cual se muestre el efecto teórico del desplazamiento vs. Módulo de elasticidad, se procede a hacer un cálculo de asentamientos en los diferentes tipos de módulo de elasticidad, pero con una misma carga. Los datos de esta fuerza puntual fueron calculados para un tipo de suelo determinado y con este valor se extendió hasta el modulo más pequeño y más grande, cabe resaltar que la carga aplicada puede pertenecer a un suelo rígido o blando dependiendo de cuál modulo se utilice.

5.4.1 Modelo homogéneo con datos suavizados. En el primer caso el modelo realizado se aplicó una carga de 827 kN y un esfuerzo de 4214 kN/m², tomada de un suelo blando con un módulo de elasticidad de 40 MPa, arrojando un valor de asentamiento de 35,84 mm ver Figura 28. En la figura 29 se observa el comportamiento del asentamiento al generar un aumento del módulo de elasticidad. Segundo caso, ver Apéndice D.

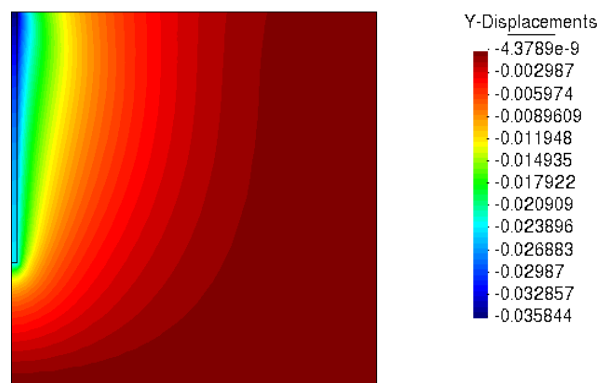


Figura 28. Modelo de suelo homogéneo.

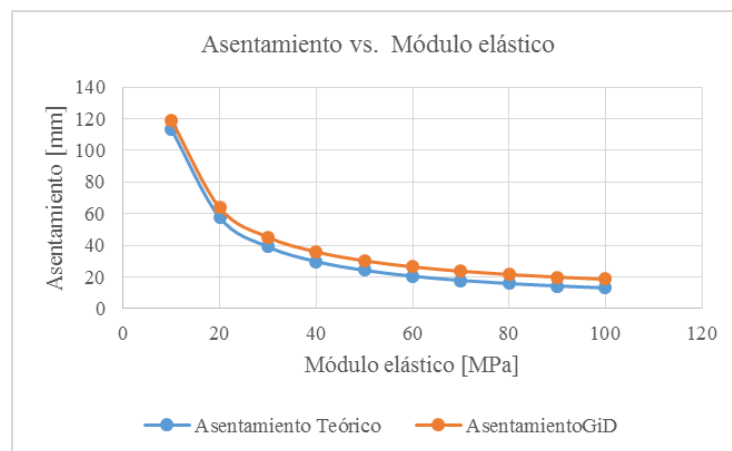


Figura 29. Asentamiento vs. Módulo elástico con datos suavizados.

5.4.2 Modelo estratificado (rígido/blando) con datos suavizados. En el primer caso se aplicó una carga de 4098 kN, tomada de un suelo rígido en la parte superior del pilote con un módulo de elasticidad de 100 MPa y un suelo blando en la parte inferior del pilote con módulos de elasticidad entre 30 y 50 Mpa. Segundo caso, ver Apéndice E.

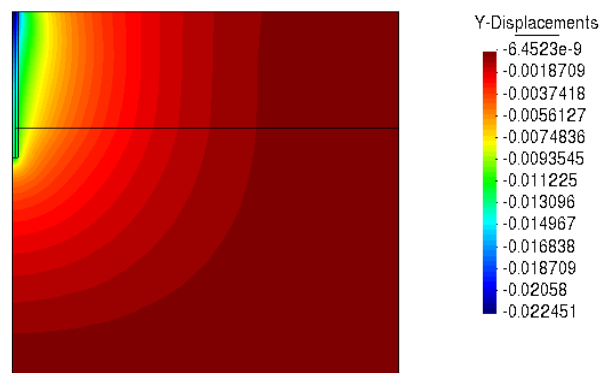


Figura 30. Modelo suelo estratificado

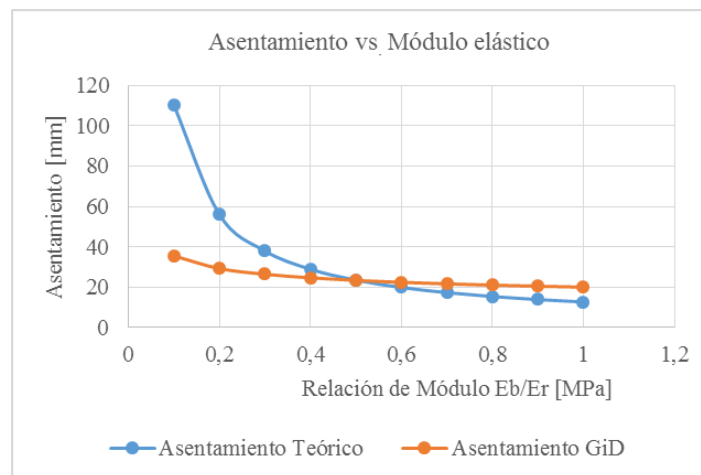


Figura 31. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad con datos suavizados.

5.4.3 Modelo estratificado (blando/rígido) con datos suavizados. En el primer caso se aplicó una carga de 3099 kN, tomada de un suelo blando en la parte superior con un módulo de elasticidad de 10 MPa y un suelo blando en la parte inferior con módulos de elasticidad entre 30 y 50 MPa. En la figura 32 se observa el comportamiento de los valores de asentamiento vs. Módulo elástico del modelo estratificado analizado teóricamente y mediante el software GiD Y Code_Bright. Segundo caso ver Apéndice F.

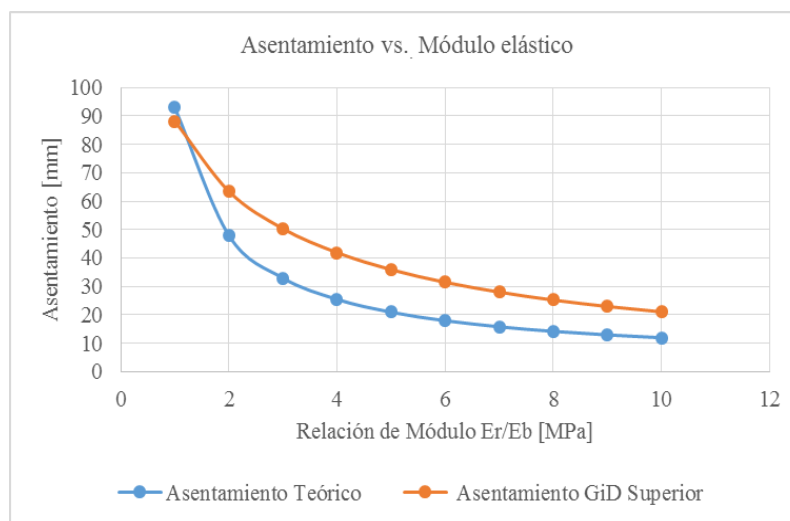


Figura 32. Asentamiento vs. Módulo elástico con datos suavizados.

6. Conclusiones

- Se comprueba que la gráfica de asentamiento vs. Módulo elástico coincide con la teoría expuesta y el software utilizado en cada uno de los modelos homogéneos y estratificados analizados en un medio constitutivo elástico lineal, los cuales al ser sometidos a una carga

presentan un asentamiento dependiendo del módulo de elasticidad, es decir que a mayor módulo elástico menor será el asentamiento en el pilote.

- Se pudo constatar que en las ecuaciones empíricas se hace mayor uso de las propiedades mecánicas del suelo para hallar el asentamiento, mientras que en el software no se ingresan los datos suficientes que brinden una mayor confiabilidad. Cabe aclarar que resulta más factible hacer esta comparación en un suelo homogéneo dado que en un suelo estratificado las ecuaciones numéricas utilizadas no diferencian cuando el suelo trabaja por fuste o por punta, lo que genera que el porcentaje de diferencia aumente.

- Se identificó que para el cálculo del asentamiento en el software GiD y Code_Bright es mejor hacer uso de una carga distribuida en la parte superior del pilote, a que este sea cargado por fricción y punta dado que el punto de concentración del asentamiento se evidencia en la parte inferior del pilote y no uniformemente como con la carga distribuida.

- Se observó que la creación de la sección denominada “suelo castigado” en los modelos cumplió la función esperada al no permitir un desgarre de nodos en la malla ya que el análisis no se llevó a cabo en interacción suelo – estructura.

Referencias bibliográficas

- Bertín, R., & Gasc, C. (1976). *Cimentaciones y obras de realce*. Obtenido de https://books.google.com.co/books/about/Cimentaciones_y_obras_en_recalces.html?id=oL8JPn0xtPMC&redir_esc=y
- Bowles, Joshep E. (1997). *Foundation and analysis and design*. 5 th edición. Obtenido de http://civilcafe.weebly.com/uploads/2/8/9/8/28985467/foundation_analysis_and_design-_bowles_5ed_.pdf
- Braja, D. (1999). *Principio de ingeniera de cimentaciones*. Internacional Thompson Editores. University State California.
- Hernández, J. (2010). *Asentamientos en pilotes individuales por consolidación*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE) [GiD]. (s.f.). *Introducción a GiD, el pre-post procesador personal*. Obtenido de <https://www.gidhome.com/about-us/>
- International Center for Numerical Methods in Engineering (CIMNE). (sf). *Polytechnic University of Catalonia (UPC). Code_Bright. Program for thermo-hydro-mechanical analysis in geological media*. Obtenido de https://deca.upc.edu/en/projects/code_bright
- Palacios, D., & Rojas, M. (2012). *Evaluación del comportamiento de pilotes mediante la técnica de elementos finos*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Pérez, A. (2014). *Módulo de elasticidad*. Obtenido de Enciclopedia virtual de Ingeniería Mecánica. Castellón, España. Universidad de Juane: Obtenido de http://www.mecapedia.uji.es/modulo_de_elasticidad.htm

Velandia, A., & Veloza, P. (2016). *Análisis del comportamiento del suelo de cimentación de edificaciones pequeñas, sometidas a incrementos de esfuerzos generados por construcciones vecinas de mayor tamaño*. Bogotá D.C.: Universidad Santo Tomás.

Vélez, L. (2008). *Materiales industriales teorías y aplicaciones*. Obtenido de https://books.google.com.co/books?id=oL8JPn0xtPMC&printsec=frontcover&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Apéndices

Apéndice A. Segundo y tercer caso

- Segundo caso



Figura 33. Modelo de suelo homogéneo.

Tabla 5. Valores de asentamiento teorico y del software en post proceso.

E [MPa]	40	Gráfica suavizada
Φ°	28	
Nq	14,7	

Poisson	S _t [mm]	S _{GID} [mm]	% Diferencia
0,1	32,19	33,29	3,42
0,15	31,80	34,05	7,08
0,2	31,27	34,74	11,10
0,25	30,58	35,34	15,57
0,3	29,74	35,84	20,51
0,35	28,74	36,22	26,03
0,4	27,60	36,42	31,96

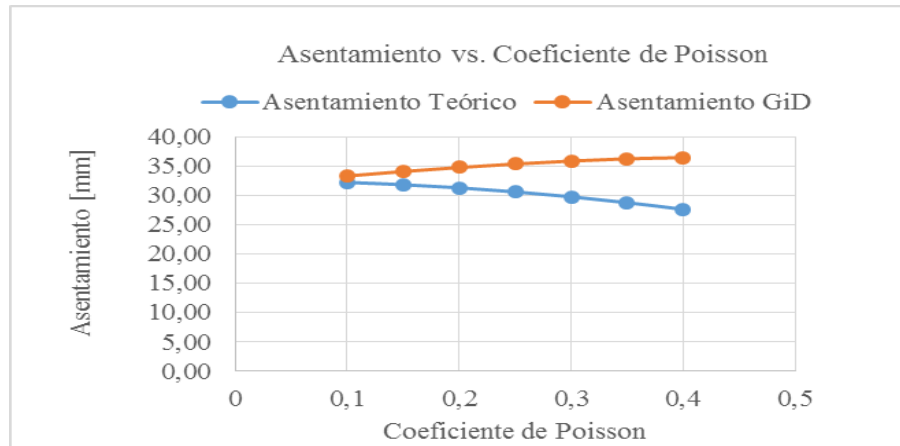


Figura 34. Asentamiento vs. Coeficiente de Poisson modelo homogéneo.

- Tercer caso

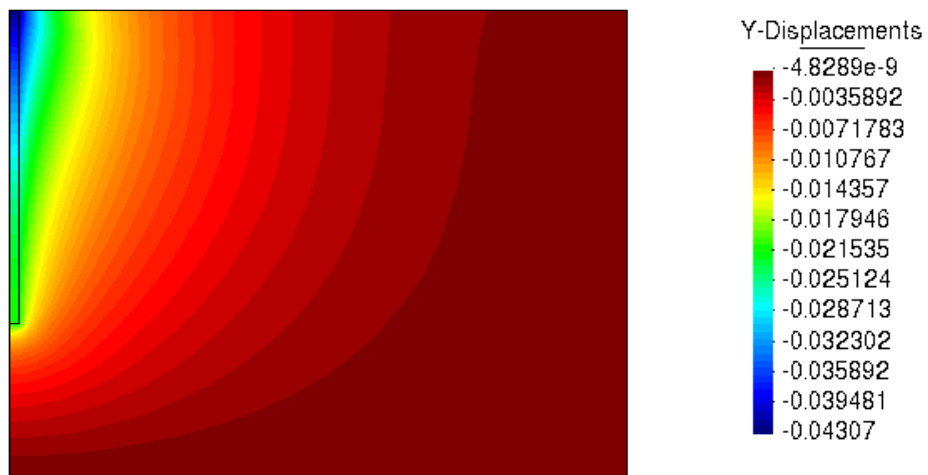


Figura 35. Modelo de suelo homogéneo

Tabla 6. Valores de asentamiento teorico y del software en post proceso.

E [MPa]	80	Gráfica suavizada
Φ°	36	
Nq	37,7	

Poisson	S _t [mm]	S _{GiD} [mm]	% Diferencia
0,1	42,24	41,59	1,54
0,15	41,76	42,37	1,46
0,2	41,09	43,07	4,82
0,25	40,22	43,68	8,60
0,3	39,16	44,17	12,79
0,35	37,91	44,52	17,44
0,4	36,46	44,69	22,57

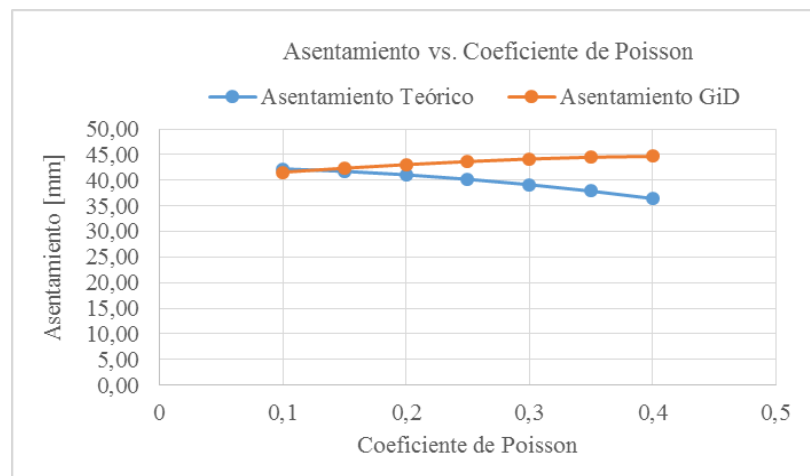


Figura 36. Asentamiento vs. Coeficiente de Poisson modelo homogéneo.

Apéndice B. Segundo caso

Tabla 7. Valores de asentamiento teórico y del post proceso.

Condiciones	Carga	Erigido	Eblando	Eb/Er	St [mm]	SGiD [mm]	%Diferencia
	[kN/m²]	[MPa]	[MPa]				
Φº: 20	2515	100	10	0,1	50,78	21,53	57,60
Nq: 6,4		100	20	0,2	25,96	17,96	30,82
Φº: 28 Nq: 14,7	4098	100	30	0,3	37,97	26,46	30,31
		100	40	0,4	28,95	24,68	14,75
		100	50	0,5	23,54	23,41	0,55
Φº: 36 Nq: 37,7	8250	100	60	0,6	48,73	45,19	7,26
		100	70	0,7	42,33	43,65	3,12
		100	80	0,8	37,54	42,39	12,92
		100	90	0,9	33,81	41,32	22,21
		100	100	1	30,83	40,42	31,11

- Segundo caso

La carga del modelo se encuentra aplicada en el fuste y punta del pilote, tomando datos de asentamientos en la parte superior e inferior del mismo.

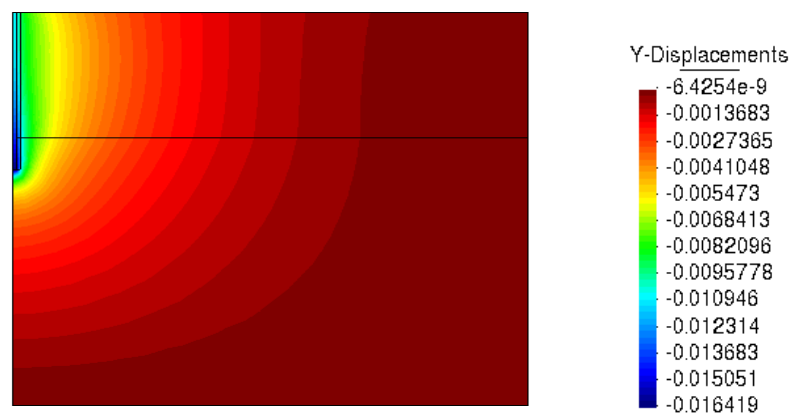


Figura 37. Modelo estratificado suelo rígido sobre suelo blando.

Tabla 8. Valores de asentamiento teórico y de post proceso del software de un modelo estratificado de suelo rígido sobre blando.

Condiciones	Carga [kN/m²]	Erigido	E_blando	E_b/E_r	S_t	S_GiD superior	S_GiD inferior	%Difere	%Diferenci
		[MPa]	[MPa]	r	[mm]	[mm]	[mm]	ncia superior	a inferior
Φº: 20	2515	100	10	0,1	50,78	10,1	13,37	80,11	73,67
Nq: 6,4		100	20	0,2	25,96	7,82	10,88	69,88	58,09
Φº: 28 Nq: 14,7	4098	100	30	0,3	37,97	13,2	19,62	65,24	48,33
		100	40	0,4	28,95	11,7	17,8	59,59	38,51
		100	50	0,5	23,54	10,6	16,41	54,97	30,29
Φº: 36 Nq: 37,7	8250	100	60	0,6	48,73	22,8	36,93	53,21	24,22
		100	70	0,7	42,33	21,2	34,74	49,92	17,93
		100	80	0,8	37,54	19,8	32,87	47,26	12,44
		100	90	0,9	33,81	18,7	31,25	44,69	7,57
		100	100	1	30,83	17,6	29,83	42,91	3,24

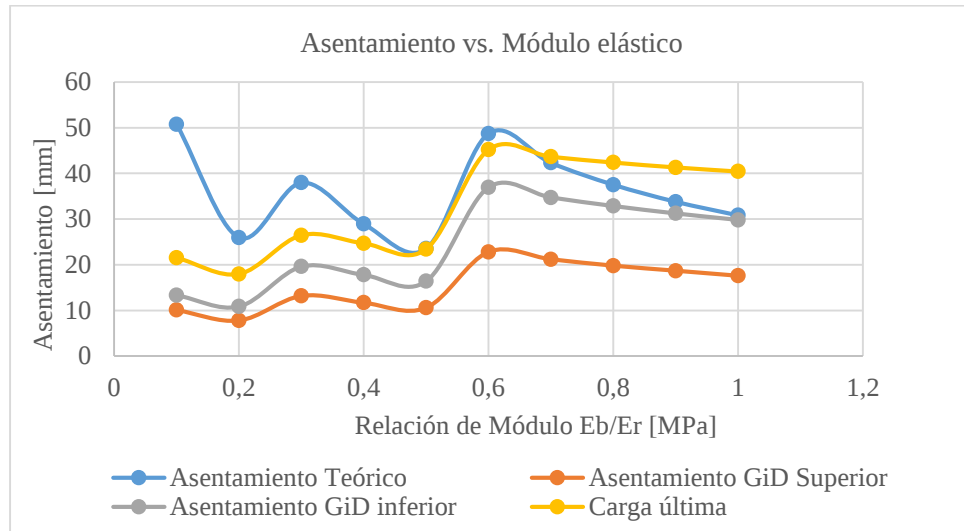


Figura 38. Gráfica de asentamiento vs. Relación de Poisson.

Apéndice C. Primer y segundo caso

- Primer caso

Tabla 9. Valores de asentamiento teórico y de post proceso de un modelo estratificado suelo blando sobre rígido.

Condiciones	Carga [kN/m ²]	E blando [MPa]	E rígido [MPa]	E _r /E _b	S _t [mm]	S _{GID} superior [mm]	S _{GID} inferior [mm]	%Diferencia [mm]	%Diferencia inferior [mm]
Φ°: 36 Nq: 37,7	6565	10	100	10	27,08	71,68	44,75	164,70	65,25
		10	90	9	29,56	75,48	48,75	155,35	64,92
		10	80	8	32,67	80,02	53,55	144,93	63,91
		10	70	7	36,66	85,56	59,45	133,39	62,17
		10	60	6	41,98	92,46	66,75	120,25	59,00
Φ°: 28 Nq: 14,7	3099	10	50	5	20,99	47,83	35,95	127,87	71,27
		10	40	4	25,49	53,44	41,95	109,65	64,57
		10	30	3	32,98	61,39	50,35	86,14	52,67
Φ°: 20 Nq: 6,4	1791	10	20	2	22,94	42,63	36,7	85,83	59,98
		10	10	1	43,52	56,25	50,9	29,25	16,96

- Segundo caso

La carga del modelo se encuentra aplicada en el fuste y punta del pilote, tomando datos de asentamientos en la parte superior e inferior del mismo.

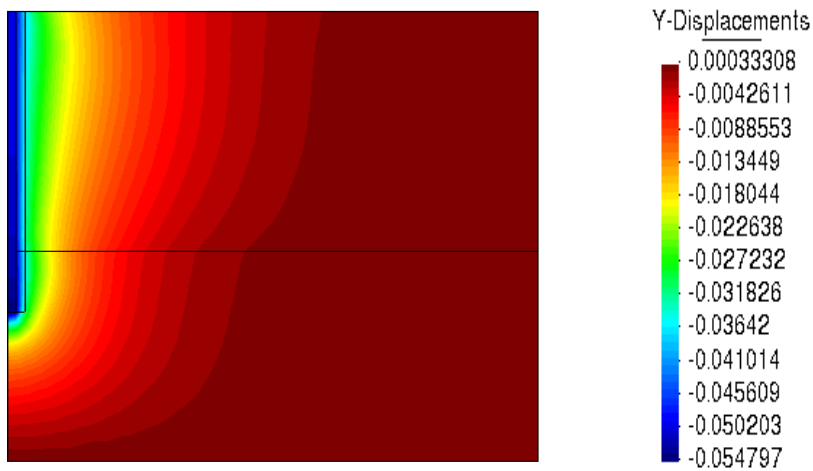


Figura 39. Modelo de suelo estratificado suelo blando sobre rígido.

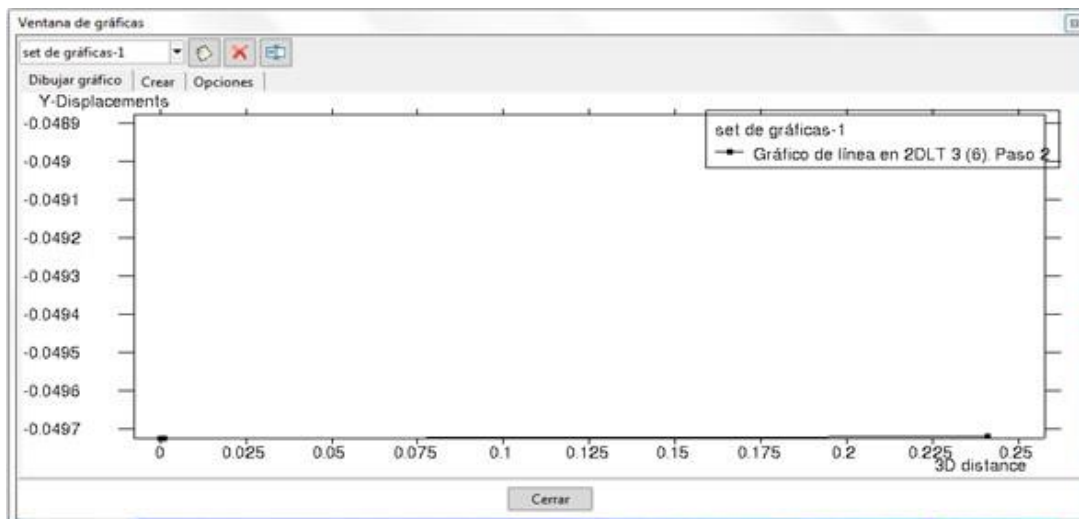


Figura 40. Asentamiento vs. Distancia del pilote.

Tabla 10. Valores de asentamiento teórico y post proceso de un modelo estratificado.

Condiciones	Carga [kN/m²]	E	E _{rigido}	E _r /E _b	S _t	SGiD	SGiD	%Diferencia	%Diferencia
		blando				superior	inferior	superior	inferior
		[MPa]	[Mpa]		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
Φ°: 36 Nq°: 37,7	f1:10,56	10	100	10	27,08	41,5	46,09	53,25	70,20
		10	90	9	29,56	45,2	50,05	52,91	69,32
	f2:29,68	10	80	8	32,67	49,7	54,78	52,13	67,68
	q: 5655	10	70	7	36,66	55,1	60,55	50,30	65,17
		10	60	6	41,98	61,85	67,74	47,33	61,36
Φ°: 28 Nq: 14,7	f1:10,56	10	50	5	20,99	30,4	32,72	44,83	55,88
	f2:28,64	10	40	4	25,49	35,3	37,97	38,49	48,96
	q: 2205	10	30	3	32,98	42,3	45,38	28,26	37,60
Φ°: 20	f2:24,72	10	20	2	22,94	27,2	28,75	18,57	25,33
Nq: 6,4	q: 960	10	10	1	43,52	37,6	39,66	13,60	8,87

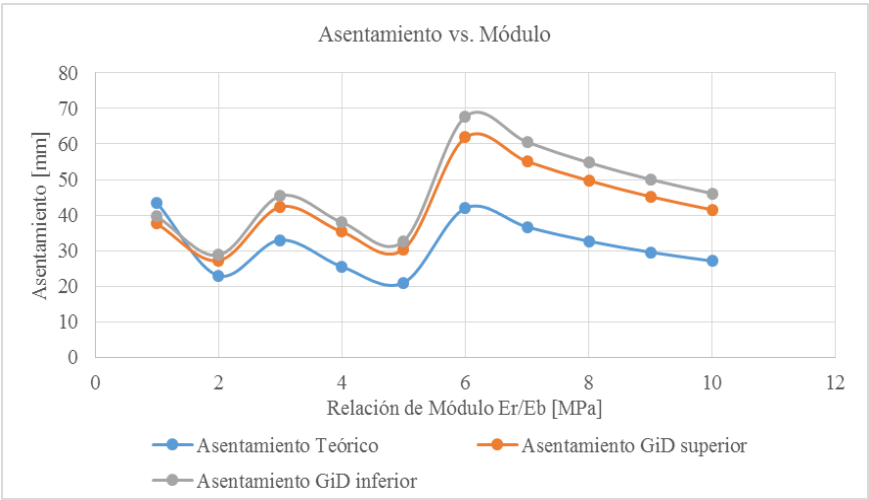


Figura 41. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad

Apéndice D. Suavizado primer y segundo caso

- Suavizado primer caso

Tabla 11. Valores de asentamiento teórico y post proceso de un modelo homogéneo suavizado.

E [MPa]	S _t [mm]	S _{GiD} [mm]	% Diferencia
10	113,28	118,94	5,00
20	57,58	63,69	10,61
30	39,02	45,1	15,58
40	29,74	35,84	20,51
50	24,17	30,19	24,91
60	20,46	26,38	28,93
70	17,8	23,62	32,70
80	15,81	21,53	36,18
90	14,27	19,87	39,24
100	13,03	18,53	42,21

- Suavizado segundo caso



Figura 42. Modelo de suelo homogéneo con datos suavizados

Tabla 12. Valores de asentamiento y post proceso del software de un modelo homogéneo.

E [MPa]	S _t [mm]	S _{GiD} [mm]	% Diferencia
10	284,62	244	14,27
20	144,35	130,67	9,48
30	97,6	92,67	5,05
40	74,22	73,53	0,93
50	60,2	61,93	2,87
60	50,85	54,11	6,41
70	44,172	48,46	9,71
80	39,163	44,16	12,76
90	35,27	40,72	15,46
100	32,15	38,03	18,29

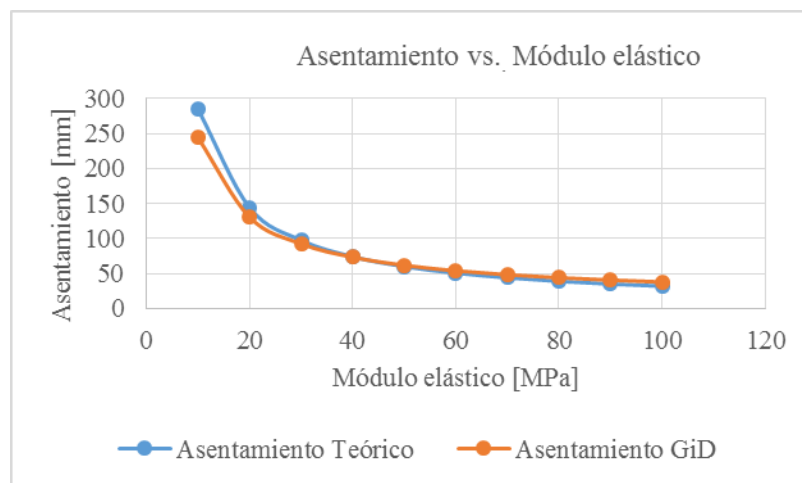


Figura 43. Asentamiento vs. Modulo elástico modelo homogéneo.

Apéndice E. Modelo suavizado primer y segundo caso

- Modelo suavizado primer caso.

Tabla 13. Valores de asentamiento teórico y post proceso del software de un suelo estratificado rígido sobre blando.

Condiciones	Carga [kN/m ²]	Erigido [MPa]	Eblando [MPa]	E _b /E _r	S _t [mm]	S _{GID} [mm]	% Diferencia
Φ°: 28 Nq: 14,7	4098	100	10	0,1	110,12	35,58	67,69
		100	20	0,2	56,01	29,27	47,74
		100	30	0,3	37,97	26,46	30,31
		100	40	0,4	28,95	24,68	14,75
		100	50	0,5	23,54	23,41	0,55
		100	60	0,6	19,93	22,45	12,64
		100	70	0,7	17,36	21,68	24,88
		100	80	0,8	15,42	21,05	36,51
		100	90	0,9	13,92	20,53	47,49
		100	100	1	12,72	20,07	57,78

- Modelo suavizado segundo caso

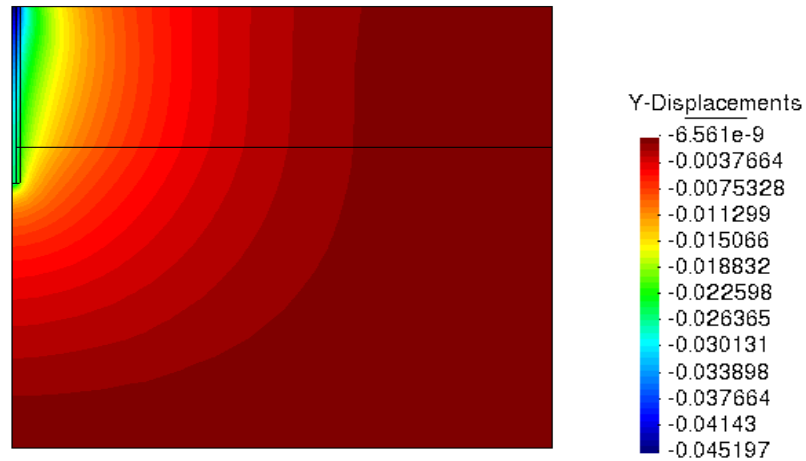


Figura 44. Modelo de suelo estratificado de suelo rígido sobre blando con datos suavizados.

Tabla 14. Valores de asentamiento teórico y post proceso del software de un suelo estratificado rígido sobre blando.

Condiciones	Carga [kN/m ²]	Erigido [MPa]	Eblando [MPa]	E _b /E _r	S _t [mm]	S _{GID} [mm]	% Diferencia
Φ°: 36 Nq: 37,7	8250	100	10	0,1	272,52	70,62	74,09
		100	20	0,2	138,24	58,93	57,37
		100	30	0,3	93,49	53,27	43,02
		100	40	0,4	71,11	49,68	30,14
		100	50	0,5	57,68	47,13	18,29
		100	60	0,6	48,73	45,19	7,26
		100	70	0,7	42,33	43,65	3,12
		100	80	0,8	37,54	42,39	12,92
		100	90	0,9	33,81	41,32	22,21
		100	100	1	30,82	40,42	31,15

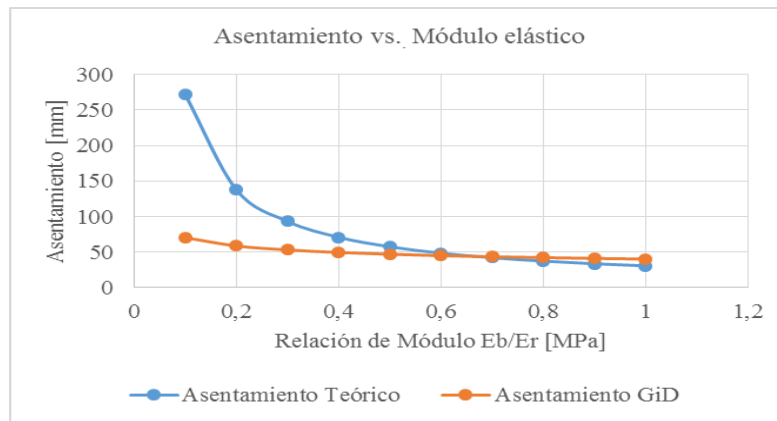


Figura 45. Asentamiento vs. Módulo elástico suelo estratificado rígido sobre blando.

Apéndice F. Primer y segundo caso de modelo estratificado blando/rígido con datos suavizados

- Primer caso de modelo estratificado blando/rígido con datos suavizados.

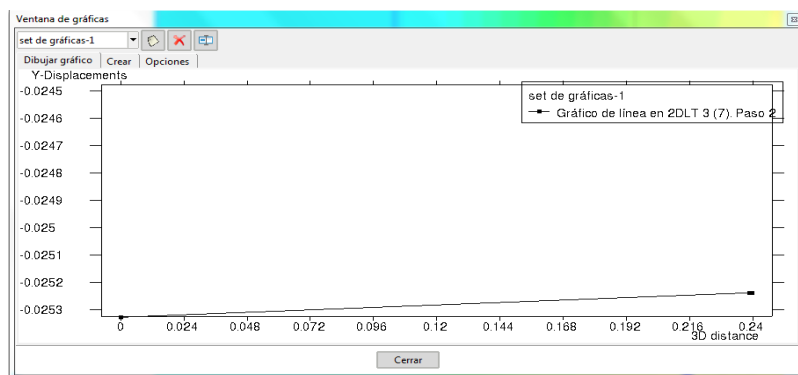


Figura 46. Asentamiento vs. Distancia del pilote en la parte inferior.

Tabla 15. Valores de asentamiento teórico y post proceso del software modelo estratificado de suelo blando sobre rígido.

Condiciones	Carga [kN/m ²]	E _{blando} [MPa]	E _{rígido} [MPa]	E _r /E _b	S _t [mm]	S _{GiD superior} [mm]	%Diferencia superior
Φ°: 28 Nq: 14,7	3099	10	100	10	11,99	21,1	75,98
		10	90	9	12,99	23	77,06
		10	80	8	14,24	25,25	77,32
		10	70	7	15,85	28,05	76,97
		10	60	6	17,99	31,5	75,10
		10	50	5	20,99	35,95	71,27
		10	40	4	25,49	41,95	64,57
		10	30	3	32,98	50,35	52,67
		10	20	2	47,97	63,5	32,37
		10	10	1	92,93	88,2	5,09

- Segundo caso de modelo estratificado blando/rígido con datos suavizados.

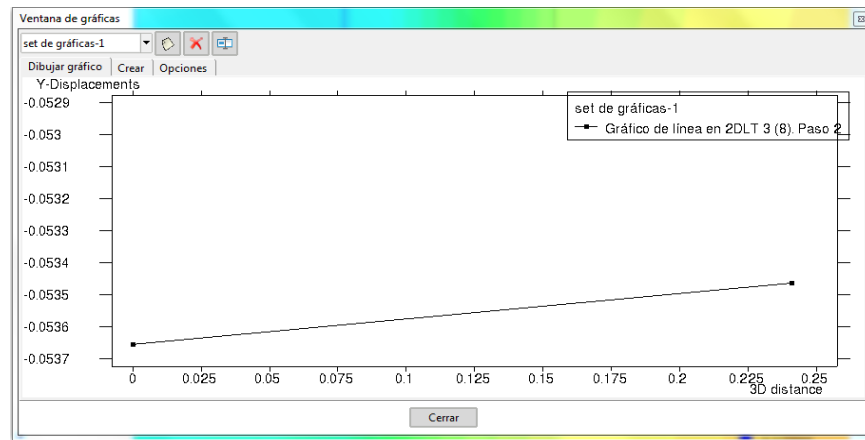


Figura 47. Asentamiento vs. Distancia del pilote.

Tabla 16. Valores de asentamiento y del post proceso del software de un modelo estratificado de suelo blando sobre rígido.

Condiciones	Carga [kN/m ²]	Eblando [MPa]	Erigido [MPa]	E _r /E _b	S _t [mm]	S _{GID inferior} [mm]	%Diferencia inferior
Φ°: 36 Nq: 37,7	6565	10	100	10	27,08	44,75	65,25
		10	90	9	29,56	48,75	64,92
		10	80	8	32,67	53,55	63,91
		10	70	7	36,66	59,45	62,17
		10	60	6	41,98	66,75	59,00
		10	50	5	49,43	64,7	30,89
		10	40	4	60,61	75,7	24,90
		10	30	3	79,24	91,2	15,09
		10	20	2	116,49	116	0,42
		10	10	1	228,25	163	28,59

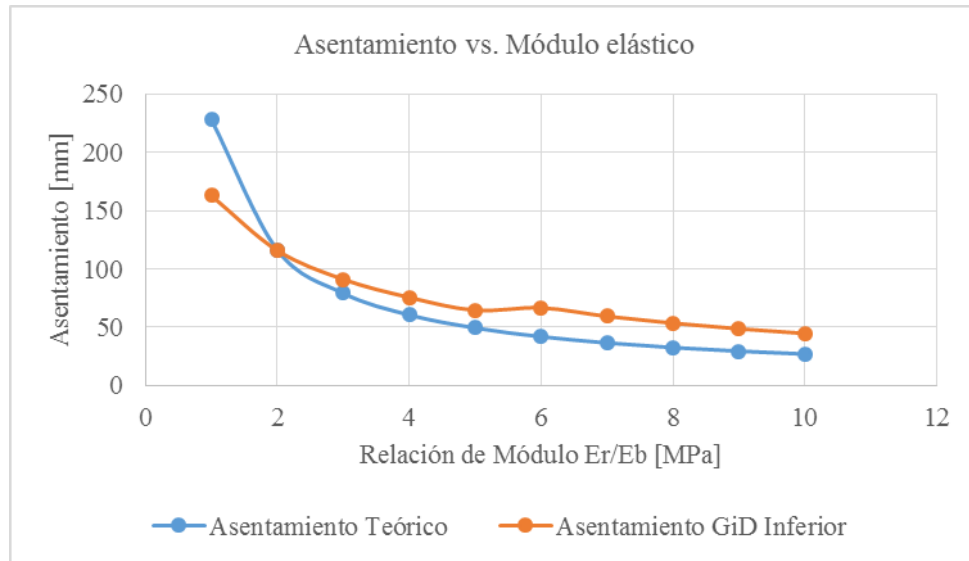


Figura 48. Asentamiento vs. Módulo de elasticidad de suelo estratificado blando sobre rígido.