UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

IMPORTANCIA DE LOS ESFUERZOS DESVIADORES INDUCIDOS BAJO LAS FUNDACIONES SUPERFICIALES EN LA ESTIMACIÓN DE SUS ASENTAMIENTOS INMEDIATOS

TRABAJO DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR: GALVIS REY, KEVIN RICARDO

TRUJILLO BASTIDAS, MANUEL ALEJANDRO

TUTOR: ING. ECHEZURIA HERIBERTO

FECHA: CARACAS, JULIO,2023

Universidad Católica Andrés Bello
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

IMPORTANCIA DE LOS ESFUERZOS DESVIADORES INDUCIDOS BAJO LAS FUNDACIONES SUPERFICIALES EN LA ESTIMACIÓN DE SUS ASENTAMIENTOS INMEDIATOS

Este jurado, una vez realizado el examen del presente trabajo ha evaluado su contenido con el resultado: **19 (diecinueve) puntos**

JURADO EXAMINADOR

Álvaro Boiero Wagdi Naime

Trabajo especial de GradoPresentado

ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

TRABAJO DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATOLICA ANDRES BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

IMPORTANCIA DE LOS ESFUERZOS DESVIADORES INDUCIDOS BAJO LAS FUNDACIONES SUPERFICIALES EN LA ESTIMACION DE SUS ASENTAMIENTOS INMEDIATOS

Autores: Galvis R, Kevin R.

Trujillo B, Manuel A.

Tutor: Echezuría, Heriberto.

Fecha: Julio 2023

RESUMEN

Se comprueba que es importante considerar los esfuerzos desviadores bajo la fundación para la determinación de los módulos de Young a utilizar en los cálculos de asentamientos, tanto para arenas como para arcillas. Los asentamientos calculados con el método elástico convencional que supone un módulo promedio único para el área de influencia debajo de la fundación resultan mucho mayores que los calculados con otros métodos que emplean los esfuerzos desviadores, ya sea directa o indirectamente (Schmertman, ley edométrica continua de Naime e hiperbólico Echezuría). Las mediciones de asentamientos en obras existentes en la literatura corroboran la importancia de dichos esfuerzos desviadores al igual que la zonificación del área de influencia debajo de la fundación y de esta manera estimar los valores del módulo de Young en cada una de las partes de dicha zonificación.

DEDICATORIA

Familiares y Amigos…

A Kevin por demostrar que siempre hay que seguir luchando, por ser un gran compañero y amigo…

A Heriberto, nuestro tutor por confiar en nosotros y estar siempre disponible, por enseñarnos a ver más allá y ser un gran docente…

A mi padre, donde quieras que estés.

Trujillo B, Manuel A.

A mis padres por haberme forjado como la persona que soy en la actualidad, por estar siempre a mi lado y motivarme cada día para lograr cada una de mis metas, a ellos les debo todos mis logros incluyendo este trabajo de grado, a mis amigos de la carrera que se convirtieron en mi segunda familia y a mi gran amigo Gustavo, donde quiera que estés…

Galvis R, Kevin R.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi mamá y hermana, por apoyarme siempre.

A mi novia, que me dio siempre un aliento en momentos difíciles.

A mis amigos que siempre estuvimos apoyándonos.

Trujillo B, Manuel A.

A nuestro tutor Heriberto por darnos la oportunidad y enseñarnos cada día, este trabajo de grado fue posible gracias a usted.

A mis padres que nunca me dejaron solo y que me apoyaron en cada una de las decisiones que tome.

A mi compañero y amigo Manuel por la confianza que siempre tuvo en mí.

Galvis R, Kevin R.

INDICE

INTRODUCCIÓN 1
CAPITULO I 2
PROBLEMA 2
I.1. Planteamiento del Problema 2
I.2. Objetivos 3
I.2.1. Objetivo General 3
I.2.2. Objetivos Específicos 3
I.3. Alcance y Limitaciones 4
CAPITULO II 5
MARCO TEÓRICO 5
II.1. Antecedentes 5
II.2. Base Teórica 6
II.2.3. Método de asentamientos basado en el Modelo Hiperbólico doblemente normalizado. 9
II.2.4. Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad. 14
II.2.5. Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC). 16
II.2.6. Método de asentamiento basado en el método de Schmertmann (1978).. 17
CAPITULO III 19
Marco Metodológico 19
III.1 Investigación 19
III.2 Funcionamiento 19
III.2.1. Aplicación del Modelo Hiperbólico doblemente normalizado en arena y arcilla. ... 19

III.2.2. Aplicación del Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad en arena y arcilla..... 23

III.2.3. Método de asentamiento basado en el método de Schmertmann en arena. 23

III.2.4. Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC) en arcillas.24

CAPITULO IV..... 25

IV.1. Procedimiento para el cálculo de asentamiento en estratos de arena y arcilla 25

CAPITULO V..... 29

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 29

V.1 Aplicación de las metodologías para asentamientos en suelo arenoso 29

V.1.1. Suelo homegéneo de arena, extraído de Tochon y Torres (2018). 29

V.1.1.1. Modelo hiperbólico aplicado (Echezuría, 2020)..... 30

V.1.1.2. Método de la Teoría de elasticidad, (Braja Das, 2011)..... 34

V.1.1.3. Modelo de Schmertmann: Uso del Factor de Influencia. (Braja Das, 2011)..... 36

V.1.1.4. Comparación de las tres metodologías aplicadas en Caso I de suelo arenoso..... 39

V.1.2. Suelo homegéneo de arena, extraído del Braja Das (2011). 42

V.1.2.1. Método hiperbólico aplicado (Echezuría, 2020)..... 42

V.1.2.2. Método de la Teoría de elasticidad, (Braja Das, 2011)..... 45

V.1.2.3. Modelo de Schmertmann Uso del Factor de Influencia, (Braja Das, 2011). 47

V.1.2.4. Comparación de las tres metodologías aplicadas en Caso II de suelo arenoso..... 50

V.1.3. Suelo homegéneo de arena, extraído de metodología según el uso del factor de influencia de la deformación unitaria, Schmertmann (1978) del Braja Das 2011..... 51

V.1.3.1. Método hiperbólico aplicado (Echezuría, 2020)..... 52

V.1.3.2. Método de la Teoría de elasticidad, (Braja Das, 2011)..... 54

V.1.3.3. Modelo de Schmertmann Uso del Factor de Influencia, (Braja Das, 2011). 56

V.1.3.4. Comparación de las tres metodologías aplicadas en Caso III de suelo arenoso. 59

V.2.Aplicación de las metodologías para asentamientos en suelo arcilloso. 60

V.2.1. Suelo homogéneo de arcilla, Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres y cimentación rectangular.. 61

V.2.1.1. Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC) aplicado al Caso I. 61

V.2.1.2. Modelo hiperbólico aplicado en suelos arcillosos aplicado al Caso I. 61

V.2.1.3. Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad aplicado al Caso I. 61

V.2.2. Suelo homogéneo de arcilla, Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Chelsea, Bridge) y cimentación rectangular. 62

V.2.2.1 Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC) aplicado al Caso II. 62

V.2.2.2. Modelo hiperbólico aplicado en suelos arcillosos aplicado al Caso II. 63

V.2.2.3. Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad aplicado en arcilla aplicado al Caso II. 63

V.2.3. Suelo homogéneo de arcilla, Caso III Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular. 64

V.2.3.1 Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC) aplicado al Caso III. 64

V.2.3.2. Modelo hiperbólico aplicado en suelos arcillosos aplicado al Caso III. 64

V.2.3.3. Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad aplicado al Caso III. .. 65

V.3. Comparación de los asentamientos obtenidos en estratos de arcilla. 65

CAPITULO VI 70

Conclusiones y Recomendaciones 70

VI.1. Conclusiones 70

VI.2. Recomendaciones 71

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS 72

ANEXOS 73

INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1 Fundación superficial. 8

Figura N° 2 Fundación profunda. 8

Figura Nº3. Curvas doblemente normalizadas para cada uno de los índices plásticos (IP). Elaborada por Echezuría. 10

Figura 4. Curva para obtener el valor de β, en función al valor de IP. 12

Figura N° 5. Incremento de los esfuerzos verticales según la profundidad de la zona de estudio. 12

Figura Nª 6. Distribución del módulo de Young de acuerdo con el confinamiento por profundidad. 13

Figura N°7. Icono del programa utilizado para el cálculo de asentamiento. 25

Figura N°8. Presentación de los estratos estudiados. 25

Figura N°9. Representación del perfil de arena. 26

Figura N° 10. Representación del perfil de arcilla. 26

Figura N° 11. Representación de los resultados que se obtienen en suelo arenoso. 27

Figura N° 12. Representación de los resultados que se obtienen en suelo arcilloso. 28

Figura N° 13. Cimentación superficial utilizado para el cálculo de asentamiento. Elaborado por los autores. 29

Figura N°14. Obtención de los ángulos de fricción para el estudio de los Casos I, II y III, con la gráfica de la “Correlación entre el ángulo de fricción con el índice de plasticidad. 68

INDICE DE TABLAS

Tabla Nº0.Valores de IP con los parámetros que se ajustan a la curvatura de la hipérbola (β).... 12

Tabla N° 1. Valores de Cargas admisibles teniendo en cuenta el Factor de seguridad con valor de 3. Aplicando el modelo hiperbólico de Echezuría (2020) de fundación de B=3,5m, L=4m, Df=8,4m. 30

Tabla Nª 2. Valores obtenidos aplicando el modelo Hiperbólico en arenas de la fundación de B=3,5m, L=4m, Df=8,4m. 31

Tabla Nª 3. Valores de asentamiento aplicando el modelo hiperbólico de Echezuría (2020) de fundación de B=3,5m, L=4m, Df=8,4m. 32

Tabla Nª 5. Valores obtenidos del factor de forma y profundidad, aplicando el método de la teoría de elasticidad para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m. 34

Tabla Nª 6. Valores de asentamientos obtenidos aplicando el método de la teoría de elasticidad para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m. 35

Tabla Nº7. Valores obtenidos factor de influencia para el modelo de Schmertmann. 37

Tabla Nº8. Valores obtenidos de asentamientos aplicando el modelo de Schmertmann. para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m..... 37

Tabla Nª 9. Valores de asentamientos aplicando el modelo de Schmertmann. para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m. 38

Tabla Nª 10. Valores de Asentamiento de las metodologías aplicas en una cimentación superficial, para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m. 40

Tabla Nª 11. Valores de Cargas admisibles teniendo en cuenta el Factor de seguridad con valor de 3, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 42

Tabla Nª 12. Valores obtenidos aplicando el modelo Hiperbólico en arenas, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 43

Tabla Nª 13. Valores de asentamiento aplicando el modelo Hiperbólico, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m..... 44

Tabla N° 14. Valores obtenidos para una cimentación superficial cuadrada en suelo arenoso, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 45

Tabla Nª 15. Valores obtenidos del factor de forma y profundidad, aplicando la teoría de elasticidad, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 46

Tabla Nª 16. Valores de asentamientos obtenidos aplicando la teoría de elasticidad, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 46

Tabla Nº17. Valores obtenidos factor de influencia para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 48

Tabla Nº18. Valores obtenidos del Modelo de Schmertmann, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 48

Tabla Nª 19. Valores de asentamientos, el para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 49

Tabla Nª 20. Valores de Asentamiento de las metodologías aplicas en una cimentación superficial, en suelo arenoso para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m. 50

..... 51

Tabla Nª 21. Valores de Cargas admisibles teniendo en cuenta el Factor de seguridad con valor de 3, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m. 52

Tabla Nª 22. Valores de asentamiento aplicando el modelo Hiperbólico, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m. 53

Tabla N° 23. Valores obteniedos para el método de la teoría de elasticidad, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m. 54

Tabla Nª 24. Valores obtenidos del factor de forma y profundidad, aplicando la teoría de elasticidad, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m. 55

Tabla Nª 25. Valores de asentamientos obtenidos aplicando la teoría de elasticidad, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m. 56

Tabla Nº26. Valores obtenidos factor de influencia para Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, H= 5 m. 57

Tabla Nº27. Valores obtenidos del Modelo de Schmertmann, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 57

Tabla Nª 28. Valores de asentamientos obtenidos del Modelo de Schmertmann, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 58

Tabla Nª 29. Valores de Asentamiento de las metodologías aplicadas para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 59

..... 59

Tabla Nº30. Valor de asentamiento aplicando la metodología de la Ley Edométrica Continua, para el Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres y cimentación rectangular B= 1,52 m, L = 3,05m, Df = 2,13m. 61

Tabla Nº31. Valor de asentamiento aplicando el modelo hiperbólico, para el Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres y cimentación rectangular B= 1,52 m, L = 3,05m, Df = 2,13m. 61

Tabla N° 32. Valores obtenidos para una cimentación rectangular B= 1,52 m, L = 3,05m, Df = 2,13m, para el Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres. 62

Tabla N° 33. Valor de asentamiento aplicando el método de la teoría de elasticidad, para el Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres y cimentación rectangular B= 1,52 m, L = 3,05m, Df = 2,13m. 62

Tabla Nº34. Valor de asentamiento aplicando la metodología de la Ley Edométrica Continua, para el Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres y cimentación rectangular B = 8,53 m, L = 32,31m, Df = 9,45m. 62

Tabla Nº35. Valor de asentamiento aplicando el modelo hiperbólico, para el Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres y cimentación rectangular B = 8,53 m, L = 32,31m, Df = 9,45m. 63

Tabla Nº36. Valores obtenidos para el Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres y cimentación rectangular B = 8,53 m, L = 32,31m, Df = 9,45m. 63

Tabla Nº37. Valor de asentamiento aplicando el método de la teoría de elasticidad, para el Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres y cimentación rectangular B = 8,53 m, L = 32,31m, Df = 9,45m. 63

Tabla Nº38. Valor de asentamiento aplicando la metodología de la Ley Edométrica Continua, para el Caso III. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular B = 8,23 m, L = 35,66m, Df = 6,71m. 64

Tabla Nº39. Valor de asentamiento aplicando el modelo hiperbólico, para el Caso III. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular B = 8,23 m, L = 35,66m, Df = 6,71m. 64

Tabla Nº40. Valores obtenidos para el Caso III. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular B = 8,23 m, L = 35,66m, Df = 6,71m. 65

Tabla Nº41. Valor de asentamiento aplicando el método de la teoría de elasticidad, para el Caso III. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular B = 8,23 m, L = 35,66m, Df = 6,71m. 65

Tabla Nº42. Valores de Asentamientos para cada uno de los distintos casos aplicados en arcilla. 65

Tabla N°43. Resultados de asentamientos en arcilla para los Casos I, II y II, aplicando el modelo hiperbólico y valores medidos en sitios. 68

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico N° 1. Valores de Asentamientos según carga aplicada para el Método Hiperbólico para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m. 33

Tabla N° 4. Valores obtenidos para una cimentación superficial en suelo arenoso, aplicando el método de la teoría de elasticidad para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.. 34

Gráfico N°2. Valores de Asentamientos según carga aplicada calculado por la Teoría de elasticidad, para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m. 36

Gráfico N°3. Valores de Asentamientos según carga aplicada calculado por la metodología de Schmertmann, para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m. 39

Gráfico Nº4. Valores de asentamientos calculados con la Teoría de elasticidad, Método Hiperbólico y metodología de Schmertmann, para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m. 41

Gráfico Nº5. Valores de asentamientos calculados con el modelo hiperbólico, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 45

Gráfico Nº6. Valores de asentamientos calculados con el método de la teoría de elasticidad, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 47

Gráfico Nº7. Valores de asentamientos calculados con el método de Schmertmann, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 50

Gráfico Nº8. Valores de asentamientos calculados con el método Hiperbólico, el modelo de elasticidad y método de Schmertmann, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m. 51

Gráfico Nº9. Valores de asentamientos calculados con el modelo hiperbólico, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m. 54

Gráfico Nº10. Valores de asentamientos calculados con el método de la teoría de elasticidad, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m. 56

Gráfico Nº11. Valores de asentamientos calculados con el método de Schmertmann, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 58

Gráfico Nº12. Valores de asentamientos calculados con la Teoría de elasticidad, Método Hiperbólico y metodología de Schmertmann, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5. 60

Gráfico Nº13. Valores de asentamientos calculados con el Método Hiperbólico, Ley Edométrica Continua y método realizado con la Teoría de elasticidad, para los tres tipos de arcillas de Londres, extraído del Trabajo de profesor Naime Wagdi..... 67

Gráfico Nº14. Comparación de las curvas según asentamientos obtenidos para los diferentes ángulos de fricción de estudio (18°, 22° y 28°) aplicando el modelo hiperbólico y asentamientos medido en sitio..... 68

INTRODUCCIÓN

Para el cálculo del asentamiento inmediato o elástico de fundaciones superficiales es importante obtener las cargas inducidas por las mismas en el perfil geotécnico, además de tener disponibles los parámetros propios del suelo. De la misma manera en el cálculo de esos asentamientos también influyen la geometría de la fundación, así como la carga sobre dicha fundación. Para el cálculo de los asentamientos uno de los parámetros más importantes es el módulo de Young.

Varias investigaciones hechas sobre este tema realizada por diversos autores han desarrollado diferentes metodologías (Schmertman, Braja Das, Echezuria) para estimar el módulo de Young de acuerdo con el tipo de suelo que se presente en el perfil debajo de la fundación, muchos de esos métodos utilizan un único valor de módulo de Young promediándolo de forma lineal para todo el rango en el cual ocurren los incrementos de esfuerzos debajo de las fundaciones.

En este TG se presenta una metodología distinta para realizar el cálculo del módulo de Young considerando los niveles de esfuerzo desviador inducidos debajo de la fundación por la carga aplicada. En efecto, la selección del módulo de Young se realizó tomando en cuenta cuatro (4) zonas debajo de la fundación las cuales dependen del nivel de esfuerzo inducido por la carga.

Asimismo, en este TG se observarán por medio de los resultados obtenidos para varios depósitos de suelos en casos de estudio documentados donde se obtuvieron los asentamientos para diferentes cargas sobre fundaciones. Los asentamientos se calcularon con diferentes metodologías, algunas de reciente propuesta y otras usualmente utilizadas en la práctica de la ingeniería.

CAPITULO I

PROBLEMA

I.1. Planteamiento del Problema

El adecuado funcionamiento de una estructura requiere el control de los asentamientos de sus fundaciones, ya que si el mismo es excesivo estos pueden generar fisuras o agrietamientos u otro tipo de patologías. Hasta ahora existen varias metodologías basadas en la Teoría de la Elasticidad que utilizan los parámetros del suelo interpretándolos para condiciones elásticas sin considerar los esfuerzos desviadores inducidos a distintas profundidades.

No obstante, esas interpretaciones tienen limitaciones con respecto al fundamento físico, ya que no existe compatibilidad entre los niveles de esfuerzos inducidos debajo de la fundación a diferentes profundidades con los Módulos de Young seleccionados para el cálculo de dichos asentamientos. De hecho, la práctica común es utilizar un Módulo de Young denominado Es, el cual se estima promediando los módulos a diferentes profundidades tomando en consideración solamente el confinamiento.

Esa constituye la primera limitación física en la interpretación del módulo, ya que de esa manera se estima el módulo a pequeñas deformaciones, Según (Echezuría, H. 2020), la estimación del Módulo de Young en el cual se tomará en cuenta los esfuerzos desviadores que induce la carga bajo la fundación, puesto que el movimiento de la masa de suelos no es necesariamente correspondiente a una carga edométrica. En efecto, la distribución de esfuerzos bajo la fundación, aunque usualmente se estima con la Teoría de Elasticidad, induce esfuerzos cuya distribución en profundidad es altamente no lineal, lo cual limita seriamente la aplicación de módulos obtenidos con base en el promedio simple, antes mencionado.

En relación con este aspecto, Wagdi Naime (2020) y Echezuría Heriberto (2020), han realizado metodologías las cuales toman en consideración esas desviaciones antes mencionadas en la selección del módulo. Ambas metodologías son congruentes en su planteamiento teórico fundamental, sin embargo, toman distintas vías para su aplicación. Wagdi Naime (2020), utiliza modelos matemáticos de diferencia finita para incluir la no linealidad de los esfuerzos desviadores inducidos por la fundación y modifica la ley edométrica tradicional mientras que Echezuría Heriberto (2020), modifica el método convencional basado en la teoría de la Elasticidad y cambia la forma de seleccionar el módulo de Young en la práctica convencional, considerando los esfuerzos desviadores por encima de la condición geostática para definir dicho módulo.

El método de Schmertmann, aplicable en arenas, utiliza un concepto parecido al del Echezuría, pero los aplica con modificaciones en otros parámetros y no necesariamente en el Módulo de Young. En este TG se discutirán los resultados de aplicar los métodos antes referidos tanto en arenas y arcillas para distintas fundaciones en distintos perfiles geotécnicos.

I.2. Objetivos

I.2.1. Objetivo General

- Establecer la importancia de los esfuerzos desviadores inducidos bajo las fundaciones superficiales en la estimación de sus asentamientos inmediatos

I.2.2. Objetivos Específicos

- Determinar la importancia de la forma de seleccionar los Módulos de Young y otros parámetros necesarios para el cálculo de asentamientos inmediatos de fundaciones

superficiales, considerando la linealización de parámetros no lineales para aplicar la Ley de Hook.

- Analizar la diferencia entre el método convencional basado en la teoría de Elasticidad sin considerar los esfuerzos desviadores con los nuevos propuestos considerando los esfuerzos desviadores.

I.3. Alcance y Limitaciones

El presente Trabajo de Grado tiene como finalidad:

- Utilizar solamente datos de suelos existentes en la literatura, por lo que no se realizarán ensayos de laboratorio.
- Emplear los métodos de Naime, Echezuría y Schmertman además del utilizado en la práctica convencional con Teoría de Elasticidad, descrito en Das para comparar y discutir sus resultados.
- No se hará ningún desarrollo teórico o de ninguna otra índole.
- No se aplicará la metodología del profesor Naime, se realizará las comparaciones mediante el uso de los datos extraidos en el trabajo de Wagdi, Naime 2020

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

II.1. Antecedentes

Los antecedentes que se muestran a continuación utilizaron procedimientos de cálculos geotécnicos básicos partiendo de la información obtenida de los suelos.

Tochón Rodríguez, María Gabriela y Torres Gómez, Jesus Enrique (2018).

Título: Automatización del método de cálculo de asentamientos de fundaciones superficiales en perfiles geotécnicos heterogéneos.

Este trabajo de investigación tuvo como finalidad el desarrollo de un programa para el cálculo de asentamientos de fundaciones superficiales, analizando a profundidad todos los parámetros necesarios para dicho cálculo, tomando en cuenta el Módulo de Young definido con la metodología sugerida por Echezuria de acuerdo con el esfuerzo de confinamiento y el nivel de carga desviadora impuesto por la fundación. Ese programa permite a los usuarios automatizar de manera eficaz los cálculos de asentamientos, a la vez que selecciona los valores apropiados del módulo de young.

Naime Y, Wagdi.(2020).

Título: Estimación de desplazamientos horizontales y deformaciones unitarias en el suelo debajo de fundaciones superficiales con base en la Ley Edométrica Continúa corregida.

Este artículo desarrolla un modelo matemático que corrige las ecuaciones del comportamiento oedométrico, mediante ecuaciones continuas, derivables e integrables en todo el dominio de la aplicación de los esfuerzos. Estas modificaciones superponen las deformaciones

horizontales en el suelo, lo cual permite crear una ley esfuerzo-deformación adaptada mejor al comportamiento real de los suelos debajo de las fundaciones superficiales.

Echezuría, Heriberto (2018).

Título: Diseño de cimentaciones por capacidad portante y asentamientos.

Este artículo se describe como estimarlos asentamientos tanto con método convencional basado en la teoría de la Elasticidad como con el que toma en cuenta el Módulo de Young presenta una variación con respecto al grado de confinamiento y el nivel de carga inducida por la fundación.

Das, Braja. (2011)

Título: Ingeniería de cimentaciones**.**

Este libro describe de manera descriptiva los distintos métodos para estimarel asentamiento, donde se presta principal atención a el método de la teoría elástica y el método "*Asentamiento de suelo arenoso: uso del factor de influencia de la deformación unitaria*", propuesto por Schmertmann y colaboradores (1978), con el fin de comparar los métodos mencionados con los demás métodos señalados.

II.2. Base Teórica

Para el diseño de una edificación es indispensable conocer las propiedades del suelo sobre el cual se va a construir, por lo que se realiza un muestreo dentro la masa de suelo que será utilizada para dicho proyecto. A las muestras de suelos obtenidas se les realiza una serie de pruebas como por ejemplo el ensayo de corte triaxial (TxT) o corte simple directo (DSS).

Algunos de los resultados obtenidos son:

- Angulo de fricción interna del suelo (ϕ)

- Módulo de deformación del suelo o módulo de Young
- Resistencia al corte sin drenaje (Su)*
- Gráfico de esfuerzo deformación*
- Gráfico de incremento de presión de poros con deformación*
- Gravedad específica del suelo
- Límites de Atterberg (LL, LP e IP)
- Contenido de humedad natural

Es importante destacar que el modelo de Echezuría puede estimar los parámetros de ingeniería (identificados con un asterisco arriba) a partir de los otros parámetros índices del suelo verificados por Izarra y D'Onofrio (2018) y Ramírez (2019). Esta es la base de los programas desarrollados por Tochón y Torres (2018)

II.2.1. Fundaciones superficiales

Las fundaciones superficiales son sistemas estructurales o estructuras que soportan las cargas y las transmiten directamente al suelo donde se está construyendo, dichas fundaciones se encuentran construidas tal que la profundidad de desplante de la fundación "**Df**" dividida entre el ancho de la fundación, **B**, está entre 3 y máximo 4 B. Para las fundaciones profundas ese cociente es mayor que 5. Tal como se observa en las figuras Nº 1 y 2 se puede diferenciar entre una fundación superficial y una fundación profunda.

Tomando en cuentas lo mencionado anteriormente es importante mencionar que en el presente TG se realizaran las estimaciones correspondientes de asentamiento solo en fundaciones superficiales.

- ✓ Fundación superficial

$$\boldsymbol{D < 3B}$$

Figura N° 1 Fundación superficial.

- ✓ Fundación profunda

$$\boldsymbol{D > 5B}$$

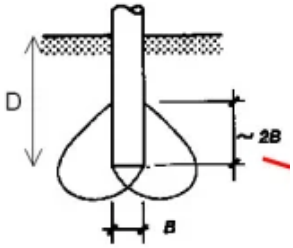


Figura N° 2 Fundación profunda.

II.2.2. Módulo de Young

El módulo de Young es un parámetro elástico comúnmente utilizado en la estimación de los asentamientos inmediatos o elásticos. Es bueno destacar que los módulos debido a incrementos de carga deben ser estimados considerando los esfuerzos desviadores. La estimación de los módulos considerando solamente el confinamiento define los módulos máximos del suelo y no los aplicables a la movilización de la masa de suelos debajo de la fundación, es importante recordar

que al movilizar la masa de suelo las deformaciones inducidas causan la reducción del módulo máximo.

Ahora bien, dado que es muy complicado estimar las deformaciones, es preferible utilizar el esfuerzo desviador tal como propone (Echezuría, 2020).

El contenido de humedad natural también afecta los módulos del suelo, ya que, afecta por ejemplo la rigidez de las arcillas, a medida que el contenido de agua se eleva por lo que el módulo del suelo se reduce.

II.2.3. Método de asentamientos basado en el Modelo Hiperbólico doblemente normalizado.

En un proyecto de envergadura es conveniente anticipar los parámetros de ingeniería aplicables al diseño de fundaciones para las etapas tempranas de la ingeniería (Conceptual y Básica), por cuanto para esas etapas no se ha asignado todos los fondos requeridos para la exploración geotécnica. En tal sentido es necesario simplificar y automatizar modelos capaces de predecir los parámetros de ingeniería a partir de la información básica del suelo (parámetros índices), con el objetivo de mejorar las estimaciones de costos del proyecto en esas etapas.

El modelo propuesto por (Echezuría, 2020). incluye los siguientes axiomas:

- Existe una correlación entre la resistencia al corte y la relación de vacíos, y en el caso de suelo sobre-consolidado, la resistencia al corte del suelo corresponde a la relación de vacíos que el mismo alcanzó al estar sometido al esfuerzo máximo ocurrido.
- La resistencia al corte es afectada por el cambio de volumen plástico.
- Las curvas normalizadas por el esfuerzo confinante en condiciones NC, se vuelven a normalizar con el sen (ϕ), con lo cual corresponden a hipérbolas doblemente normalizadas, dependientes del índice de plasticidad, IP.

- Los valores normalizados de la resistencia al corte por el esfuerzo efectivo confinante son proporcionales al seno del ángulo de fricción, $\frac{Su}{\sigma'c} = sen(\emptyset)$ Para condiciones geostáticas se puede utilizar como confinamiento el esfuerzo efectivo vertical.

Durante los procesos de corte en los ensayos, los módulos máximos del suelo se degradan con las deformaciones al aumentar la carga, obteniendo hipérbolas con respecto al gráfico esfuerzo deformación. Observado en el modelo (Echezuría, 2020).

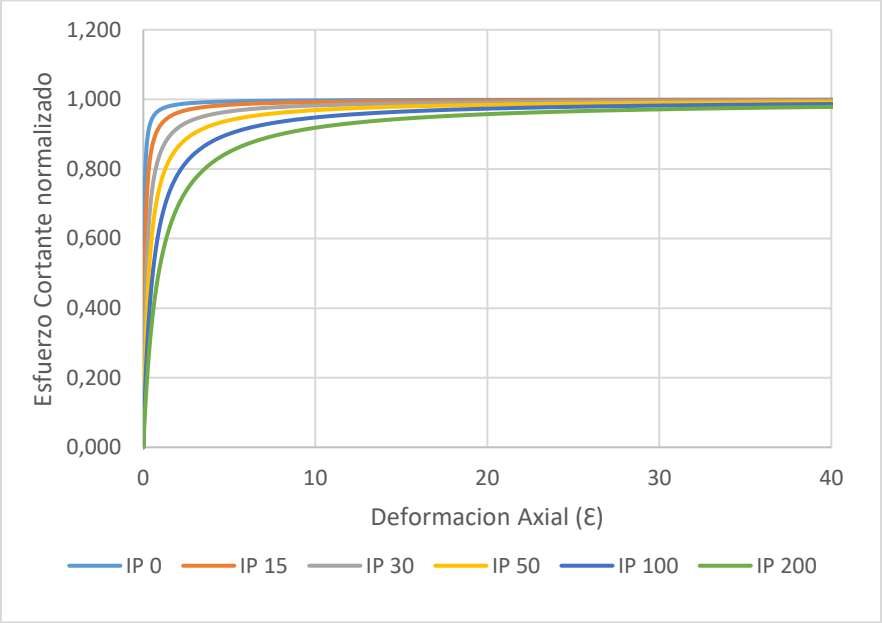


Figura Nº3. Curvas doblemente normalizadas para cada uno de los índices plásticos (IP).. Fuente: Echezuría 2020.

$$\boldsymbol{X} = \frac{\boldsymbol{N\,\theta}}{\boldsymbol{\beta+\theta}} \quad (1)$$

Donde:

$\boldsymbol{X}$**:** Es el nivel de esfuerzo cortante o desviador.

$\boldsymbol{\theta}$**:** Representa la deformación correspondiente según el tipo de ensayo que se emplee.

$\boldsymbol{N}$**:** Es una constante la cual tiene un valor de 1.

$\boldsymbol{\beta}$**:** Es el parámetro que se ajusta a la curvatura de las hipérbolas y esta correlacionada con el valor de IP.

Para el TG presentado se utilizará como N el valor de 1 esto se debe a que dicho valor corresponde al parámetro que define el tope de las curvas normalizadas para ensayos triaxiales tal como se observa en la FIGURA Nº3 con el objetivo de estimar el esfuerzo cortante y de esta forma estimar el valor del módulo de Young.

Las curvas hiperbólicas dependientes del IP utilizan el parámetro "β" para ajustar la forma de las hipérbolas. De la FIGURA Nº4, se pueden obtener los valores de dicho parámetro "β" los cuales dependen del índice de plasticidad IP, esto se utiliza al momento de querer obtener un valor de β con in IP distinto a los que se observan en la FIGURA Nº 3, es importante tener en cuenta ambos valores ya que son indispensables para la aplicación del modelo hiperbólico.

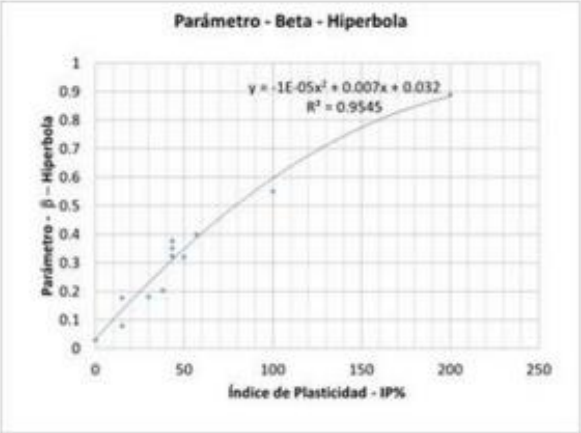


Figura 4. Curva para obtener el valor de β, en función al valor de IP. Fuente: D`Onofrio, A e Izarra, G. 2018.

D`Onofrio e Izarra, al momento de realizar la primera verificación de su modelo el cual se basa en la verificación del comportamiento de un modelo integrado de suelos plásticos no drenados en 2018, obtuvieron un gráfico en el cual se relacionaban el valor del índice de plasticidad (IP) con el parámetro β, y con base a la información utilizada, se utilizaron los valores que se observan en la TABLA Nº0, dichos valores permiten ajustar la hipérbola según el valor de índice de plasticidad (IP) deseado, de esta forma en el presente TG fueron utilizados dichos valores para la estimación del módulo de Young y el cálculo de asentamiento en un estrato de suelo arenoso o arcilloso.

Tabla Nº0.Valores de IP con los parámetros que se ajustan a la curvatura de la hipérbola (β).

IP	0	15	30	50	100	200
β	**0,03**	**0,08**	**0,18**	**0,32**	**0,55**	**0,89**

Los esfuerzos verticales inducidos por la fundación influyen en el estrato según la profundidad de estudio, es decir, mientras más profundo el punto de estudio tendrá una incidencia menor, tal como se ilustra en la FIGURA Nº5.

.

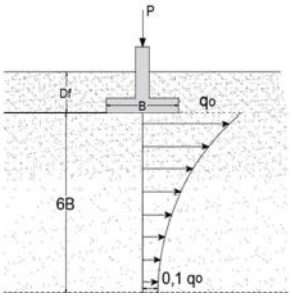


Figura N° 5. Incremento de los esfuerzos verticales según la profundidad de la zona de estudio. Fuente: Echezuría 2018.

La profundidad de influencia de la fundación se divide en sub estratos para tomar valores representativos en cada uno con los cuales estimar el módulo de Young. Como se aprecia en la FIGURA Nº 5 los mayores esfuerzos se encuentran en el tercio superior, donde el confinamiento es menor, por consecuencia el módulo tendrá un valor menor. Cuando se va profundizando el suelo tiene un mayor confinamiento y una deformación menor debido a que los esfuerzos son menores, teniendo un módulo de Young mucho mayor.

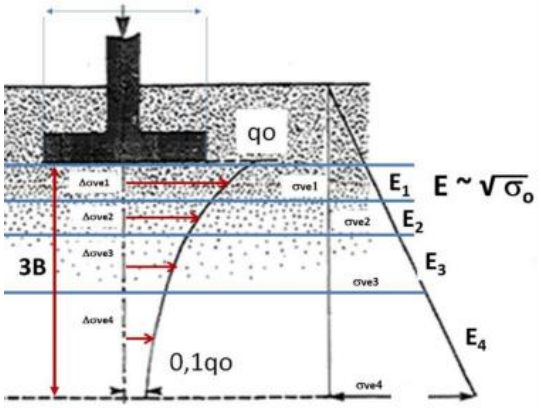


Figura Nª 6. Distribución del módulo de Young de acuerdo con el confinamiento por profundidad. Fuente: Echezuría 2018.

Así, los resultados de los estudios elaborado por (Echezuría, 2020), muestran que la distribución de módulos y esfuerzos inducidos por la carga, los asentamientos cerca de la cimentación son mucho mayores por lo que los asentamientos disminuyen a medida que aumenta la profundidad el estudio.

Para obtener el asentamiento mediante la aplicación del modelo hiperbólico se debe contar con cada uno de los datos requeridos, una vez que se tengan se utiliza la ecuación 3, la cual permitirá conocer el valor de asentamiento en cada uno de los estratos que se están estudiando, para el caso del presente TG son los estratos de arena y arcilla.

$$\mathbf{Se} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{E}} \int_{\mathbf{0}}^{\mathbf{H}} (\Delta \mathbf{pz} - \boldsymbol{\mu}\mathbf{s}\Delta \mathbf{px} - \boldsymbol{\mu}\mathbf{s}\Delta \mathbf{py})\mathbf{dz} \quad (2)$$

Donde:

Se: Asentamiento elástico.

$\boldsymbol{E}$**:** Módulo de elasticidad del suelo.

H: Espesor del estrato de suelo.

$\boldsymbol{\mu}$**s:** Relación de poisson del suelo.

Δ**pz**, Δ**px**, Δ**py:** Representa el incremento del esfuerzo debido a la carga aplicada sobre la cimentación en las direcciones x,y y z.

II.2.4. Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad.

Este método es comúnmente aplicado en la práctica convencional de la ingeniería por lo que sirve para comparar los valores de asentamientos que se obtienen aplicando otros métodos.

Para la aplicación de este método, es importante mencionar que las interpolaciones múltiples deben estar correlacionadas, al igual que el coeficiente de Poisson para el tipo de suelo que se está tratando, una vez hecha la interpolación correspondiente se calcula el valor del asentamiento haciendo uso de la ecuación (1).

$$\boldsymbol{Se} = \boldsymbol{qo}(\boldsymbol{\alpha B'})\frac{\mathbf{1}-\boldsymbol{\mu s}^{\mathbf{2}}}{\boldsymbol{Es}}\boldsymbol{IsIf} \quad (3)$$

Donde:

$\boldsymbol{qo}$**:** Carga aplicada sobre la cimentación

$\boldsymbol{B'}$**:** B/2 para el centro de la cimentación

$\boldsymbol{Es}$**:** Módulo de elasticidad promedio del suelo debajo de la fundación a una profundidad de 0 a 5B.

$\boldsymbol{\mu s}$**:** Representa la relación de poisson del suelo**.**

$\boldsymbol{Is}$**:** Factor de forma**.**

$\boldsymbol{If}$**:** Factor de profundidad.

$\boldsymbol{\alpha}$***:** Representa un factor que depende de la ubicación sobre la cimentación donde se calcule el asentamiento.

*Para el valor de alfa (α) se tienen distintos valores los cuales dependerán de la ubicación donde se quiere estimar el asentamiento, es decir si se quiere estimar el asentamiento utilizando la teoría de elasticidad en una esquina de la cimentación el valor de alfa (α) es igual a 1, ahora si se quiere estimar el asentamiento en el centro de la cimentación el valor de alfa (α) tiende a ser 4. Para la estimación de asentamiento mediante la implementación de la teoría de elasticidad se tomará como valor de 4, una vez que se selecciona el centro de la cimentacion y se conoce el valor de alfa (α) se hace uso de la ecuación 3 correspondiente a la estimación del asentamiento utilizando la metodología basada en la teoría de elasticidad de Braja Das

En el apartado de Anexos, del Anexo 14 al 17, se muestra a detalle las tablas adicionales para obtener los valores para el cálculo de asentamiento.

II.2.5. Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC).

Este método se realiza tomando en cuenta las curvas esfuerzo-deformación de los suelos causadas por la carga axial mediante el uso de ecuaciones continuas, derivables e integrables.

La ley edométrica continua se diferencia de la ley edométrica tradicional por la falta de continuidad derivable que tiene la ley tradicional. La verificación de la misma Wagdi Naime, (2020), se basó en observaciones y mediciones del comportamiento de fundaciones reales. Durante dicho proceso de verificación se asumió un módulo edométrico que varía linealmente con el esfuerzo partiendo de un valor inicial de un módulo E, a diferencia de la ley tradicional que también asume una variación lineal sin embargo parte del valor de un módulo E nulo.

El objetivo de la ley edométrica continua (LEC) es observar cómo es el comportamiento de los suelos cuando varían los esfuerzos axiales. Es importante mencionar que inicialmente este método se demostró solo para el caso de suelos arenosos, sin embargo, las investigaciones realizadas por Naime verificaron que sus aplicaciones se pueden realizar para todo tipo de suelo. Los análisis realizados en varias pruebas edométricas en suelos que van desde bajas hasta altas compresibilidades mostraron que la ley edométrica continua (LEC) se adapta mucho mejor que los demás métodos convencionales. Sin embargo, es importante mencionar que los valores que se observan en el trabajo realizado del Profesor (Wagdi Naime, 2020) no corresponden a los asentamientos inmediatos si no a los asentamientos totales y son utilizados solo en estratos de suelo arcilloso debido a que no se cuanta con la información para suelos arenosos.

II.2.6. Método de asentamiento basado en el método de Schmertmann (1978). Fuente: Das, Fundamentos de ingeniería de cimentaciones, séptima edición.

El método de Schmertmann es un procedimiento empírico desarrollado a partir de un modelo físico de asentamientos que fue calibrado mediante el uso de datos medidos. Este método a pesar de su carácter empírico tiene una base racional en la teoría de elasticidad, el análisis de métodos finitos y en observaciones realizadas tanto en campo como en laboratorio.

Schmertmann basado en los resultados de mediciones de desplazamientos producidos en masas de arena sometidas a carga, además el análisis de elementos finitos y deformaciones realizado en materiales con comportamiento no-lineal hacen que la deformación al interior de una masa de arena cargada sea muy similar en forma a la de un medio elástico lineal.

A través de su método, junto con otros colaboradores, desarrolló una ecuación capaz de obtener el asentamiento de suelos arenosos utilizando un factor de influencia de deformación unitaria, que se puede aplicar para calcular el asentamiento de cimentaciones cuadradas y rectangulares, adaptando los parámetros correspondientes para cada tipo de cimentación.

La ecuación propuesta por (Schmertmann, 1978) para el cálculo del asentamiento en arenas tiene la siguiente expresión.

$$\boldsymbol{Se = C1C2(\overline{q} - q)\sum_{0}^{z2}\frac{Iz}{Es}\Delta z} \quad (4)$$

Donde:

$\boldsymbol{Iz}$**:** Representa el factor de influencia de la deformación unitaria.

$\boldsymbol{C1}$**:** Factor de corrección para la profundidad de empotramiento de la cimentación.

$\boldsymbol{C2}$**:** Representa el factor de corrección para tomar en cuenta la fluencia plástica del suelo.

$\bar{\boldsymbol{q}}$**:** Esfuerzo aplicado sobre la cimentación.

$\boldsymbol{q}$**:** Representa el esfuerzo efectivo en la base de la cimentación (Df * ϒ).

Es: Módulo de elasticidad promedio del suelo debajo de la fundación

En el Anexo 18 y 19, se presentan las gráficas usada por Schmertmann para el cálculo del asentamiento, según su metodología desarrollada.

CAPITULO III

Marco Metodológico

En este capítulo se realizará una explicación de los procesos de investigación utilizados y la forma en que se realizarán las comparaciones de los resultados obtenidos por los distintos autores, con el fin de cumplir los objetivos planteados en el capítulo I del presente Trabajo de Grado.

III.1 Investigación

El Trabajo de Grado que se presenta se basa en una investigación descriptiva y comparativa.

En el Trabajo de Grado, se describe el comportamiento del suelo en torno a la edificación, cuando se está construyendo sobre el terreno, por lo que todos los esfuerzos de la estructura se trasladan a las bases y finalmente al terreno. Para ello se emplearán diferentes métodos para el cálculo de asentamiento en los estratos de suelo arenoso y arcilloso, posteriormente, se analizarán los resultados.

III.2 Funcionamiento

A continuación, se describen los procedimientos empleados con cada uno de los métodos utilizados.

III.2.1. Aplicación del Modelo Hiperbólico doblemente normalizado en arena y arcilla.

Con los datos de la cimentación superficial estudiada, y los valores de los parámetros de los suelos se obtiene la carga última y la admisible para ello, se hace uso de las siguientes ecuaciones que son aplicadas sobre la cimentación superficial.

Para obtener la carga última se hace uso de la siguiente ecuación.

$$\boldsymbol{Q\ ult = \lambda qs * \ \lambda qd * \sigma * Nq + \lambda \gamma s * \lambda \gamma d * \frac{B}{2} * \gamma s * N\gamma} \ (5)$$

Donde:

$\boldsymbol{Nq, N\gamma}$**:** Corresponden a factores de capacidad de carga.

$\boldsymbol{\lambda qs, \lambda \gamma s}$**:** Corresponden a factores de forma.

$\boldsymbol{\lambda qd, \lambda \gamma d}$ **:** Corresponde a factores de profundidad.

$\boldsymbol{\gamma s}$**:** Peso específico del suelo.

B: ancho de la cimentación.

Para obtener la carga admisible se hace uso de la siguiente ecuación.

$$\boldsymbol{Q\ adm = \frac{Qult}{FS}} \ (6)$$

Para el valor del valor de factor de seguridad, (FS) se puede ajustar dependiendo del suelo que se esté trabajando, sin embargo, para este TG el factor de seguridad será de 3, se tomó en consideración que para los 3 casos estudiado al no tener referencia en los casos II y caso III, se extrajo el ángulo de fricción del trabajo realizado por Tochon y Torre (2018).

Una vez obtenida la carga admisible, se procede a realizar el cálculo correspondiente para obtener sub-múltiplos de dicha carga con los cuales se calcularán los incrementos de esfuerzos verticales en profundidad, bajo el centro de la fundación. Con esos incrementos de carga con profundidad, se calculan los módulos de elasticidad (E) para la estimación de los asentamientos inmediatos utilizando la ecuación (3).

Es importante mencionar que para estimar los incrementos de esfuerzos en profundidad correspondiente a las cargas mencionadas se utilizarán cuatro (4) sub estratos, o zonas, debajo de la fundación, con la finalidad de observar el asentamiento en cada una de los estratos. De esta manera se considera adecuadamente los cambios en la distribución de esfuerzos en profundidad, la cual es altamente no lineal. Eso se realizará para perfiles homogéneos con suelo arenoso y arcilloso. La distribución de esfuerzos en profundidad se hizo aplicando el método de proyección 2:1 (vertical - horizontal). Se debe resaltar que dicha distribución de esfuerzos se realizó basándose en la información proveniente del libro de textos de ingeniería en cimentaciones de Braja Das (Fundamentos de la ingeniería de cimentaciones. Cap. 2; Braja Das, Séptima edición.) sin embargo, se debe acotar que existen distintas metodologías para obtener el esfuerzo en cada uno de los sub-estratos de suelos que se estudian. Para el presente TG se utilizó dicha distribución ya que esta se utiliza con frecuencia ya que es una metodología aproximada al momento de obtener el incremento de esfuerzo con respecto a la profundidad que se origina por la construcción de una cimentación superficial. Sin embargo, se debe destacar que cualquier metodología a utilizar para la obtención del esfuerzo es perfectamente válida en el uso del modelo hiperbólico.

Para estimar el valor del módulo de Young haciendo uso del modelo hiperbólico doblemente normalizado adaptado por el profesor ingeniero Heriberto Echezuria (Modelo Hiperbólico Doblemente Normalizado aplicable a la caracterización geotécnica. 2020) se realiza lo siguiente:

Para el valor del módulo de Young se debe conocer el valor de índice de plasticidad (IP) el cual se representa de forma porcentual, para el caso del presente trabajo de grado va de 0 a 200 %, al conocer el valor de IP que se utiliza se parte de un valor de deformación axial el cual se utilizara

para realizar el diagrama esfuerzo deformación, luego se obtiene el esfuerzo normalizado este se obtiene utilizando la ecuación de la hipérbola, ecuación (1) mostrada en el capítulo II.

Una vez que se obtiene el esfuerzo normalizado, se procede a obtener el esfuerzo en cada uno de los sub estratos, esto se obtiene multiplicando el valor del esfuerzo normalizado por el valor del confinamiento y el ángulo de fricción, una vez que se realice este procedimiento para cada uno de los esfuerzos del sub estrato 1 se realiza el mismo procedimiento para los sub estratos siguientes con la diferencia que a medida que aumenta la profundidad el confinamiento aumenta.

Una vez que se obtienen los valores de deformación y esfuerzo en cada uno de los sub estratos se elabora el diagrama esfuerzo - deformación y de esta forma obtener el valor del módulo de Young utilizando la ley de hook

Para conocer el asentamiento utilizando el modelo hiperbólico debemos obtener los valores de esfuerzo según el tipo de carga que se esté aplicando sobre la cimentación superficial de esta forma, si queremos conocer el valor del módulo de Young para un valor especifico de esfuerzo se utiliza el diagrama que se elaboró anteriormente y con el valor del esfuerzo según el sub estrato que se quiera conocer se aplica la ley de hook y de esta forma obtendremos el valor del módulo según la deformación y el esfuerzo tal como se observan en los anexos 7,8,9,10 y 11 así como los gráficos para cada uno de los sub estratos. finalmente, los asentamientos totales se grafican para observar su variación con el incremento de carga. Lo antes descrito aplica de igual manera para el caso de la arena como de la arcilla.

III.2.2. Aplicación del Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad en arena y arcilla.

Para la aplicación de este método se utilizará la ecuación (3). Extraída de: "*Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*", Cap. 2; Braja Das, Séptima edición.

Para el método basado en la teoría de elasticidad es necesario el cálculo del factor de forma, que depende de las dimensiones de la cimentación L, B y profundidad de desplante (Df), conjunto con la relación de poisson, se interpolará de la manera mencionada en los Anexos 13, 14, 15, 16 y 17 del presente trabajo. por lo que en este TG se hizo uso de un programa para realizar dichas interpolaciones. Este método también se utiliza el coeficiente de Poisson al cual se le dio como valor 0,5; representativo de la condición saturada, para ambos suelos la arcilla y la arena.

Después de aplicar la interpolación, se realizan los cálculos correspondientes para encontrar los valores de los coeficientes Is y If. De la misma forma se realiza iteraciones, para estimarel valor de alfa (α) dando como resultado α = 10, correspondiente a material normalmente consolidado (NC). Con los valores previamente mencionados se procede a estimarel asentamiento, con la ecuación (1).

III.2.3. Método de asentamiento basado en el método de Schmertmann en arena.

El método de schmertmann se basa en la obtención del asentamiento según el factor de influencia de la deformación unitaria, el cual depende de la relación de L/B y la carga aplicada al estrato; la metodología inicia con la determinación del Factor de influencia máximo e inicial según ecuaciones mostradas en el Anexo 15, Ecuación 11; armando así el gráfico correspondiente del Factor de influencia vs Profundidad, obteniendo la correlación del factor según la profundidad de estudio del estrato. Teniendo este gráfico se obtiene el Módulo de elasticidad según la aproximación de la variación del módulo, tomando en cuenta la profundidad.

Se prosigue a dividir el estrato en subestratos con una distancia que depende del punto de variación del sentido del gráfico Iz vs Es. Se elaborar una tabla con el fin de obtener la sumatoria de la relación del factor y la deformación, observada en la ecuación (4). Por último, se obtiene los factores C1 y C2; y aplicando la ecuación (4), se obtiene el asentamiento de la cimentación en el suelo en estudio.

III.2.4. Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC) en arcillas.

La ley edométrica continúa planteada por Wagdi Naime, (2020), muestra los asentamientos por consolidación que se obtienen en distintas cimentaciones por lo que utilizando los valores que muestra Naime en su investigación específicamente en las cimentaciones superficiales en estratos de arcilla, por lo que se realiza la comparación con dichos valores con las distintas metodologías mencionadas. Sin embargo, estas comparaciones no son similares con respecto a las otras metodologías aquí mencionadas ya que como se ha mencionado el asentamiento que se obtienen utilizando el modelo hiperbólico (Echezuria) y el modelo basado en la teoría elástica (Braja Das) son asentamientos inmediatos mientras que Naime (2020) obtiene son los asentamientos totales.

Es importante mencionar que los resultados que se tomaran en cuenta en suelo arcilloso son los siguientes:

- ✓ Arcilla marrón, Londres, fire testing station
- ✓ Arcilla azul, Londres, Chelsea bridge
- ✓ Arcilla azul, Londres, Waterloo bridge

CAPITULO IV

METODOLOGÍA PARA EL USO DE PROGRAMA XLS.

El Siguiente programa se desarrolla para la metodología del Modelo Hiperbólico desarrollado por Echezuría 2020, con el fin de facilitar los cálculos del modelo mediante el programa Excel para los casos de comparación con los métodos de elasticidad, método Schmertmann y del profesor Naime Wagdi, que fueron extraídos de las literaturas correspondientes.

IV.1. Procedimiento para el cálculo de asentamiento en estratos de arena y arcilla

1. Ingresar al programa de cálculo con el nombre de "Asentamiento en Arena y Arcilla" el cual se muestra de la siguiente manera

Figura N°7. Icono del programa utilizado para el cálculo de asentamiento.

2. Seleccionar cuál de los dos estratos desea trabajar las cuales se encontrarán en la parte inferior de su pantalla denominadas como "**Presentación Arena**" y "**Presentación Arcilla**"

Figura N°8. Presentación de los estratos estudiados.

3. Una vez escogido el tipo de suelo que se quiere trabajar se desplegará la imagen en la pantalla en la cual deberá introducir los datos solicitados, en la misma imagen se podrá observar las zonas las cuales se estará trabajando para el cálculo de asentamiento la cual se

dividen en cuatro (4) zonas denominadas como A1, A2, A3 y A4. Esto aplica tanto para arena como para arcilla.

De igual forma se deben colocar los valores de NSPT en caso de requerirlo, dichos valores se introducen en el lado izquierdo de la pantalla para cada uno de los estratos mencionados.

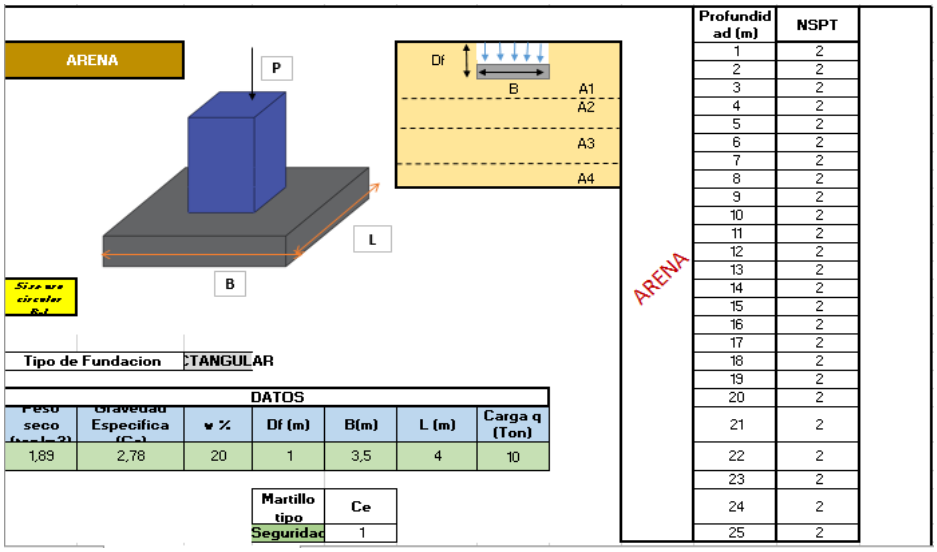


Figura N°9. Representación del perfil de arena.

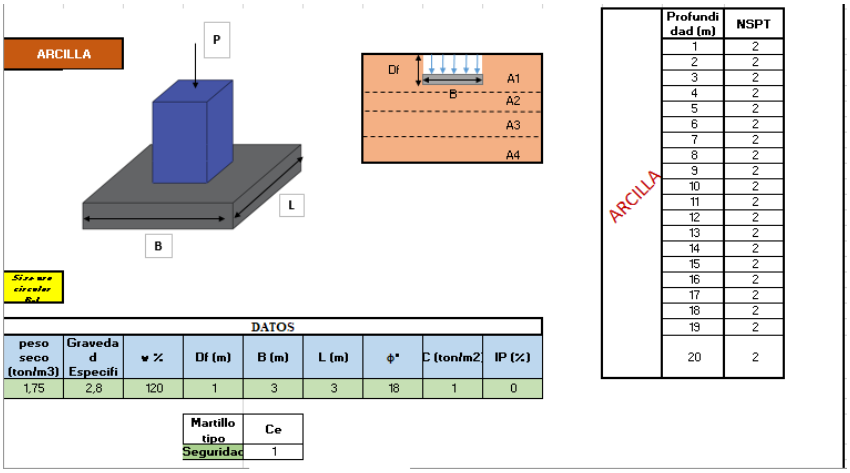


Figura N° 10. Representación del perfil de arcilla.

4. Una vez que se introducen los valores requeridos nos dirigimos a "**Resultados de Arena**" o "**Resultados Arcilla**" una vez desplegada la pantalla se mostraran los resultados obtenidos, así como el cálculo de asentamiento que se obtienen mediante los sub-múltiplos de carga que dependen de la carga admisible de igual forma se observa el gráfico del asentamiento obtenido para cada uno de los estratos de suelo mencionados.

DATOS						
Peso seco (ton/m3)	Gravedad Especifica (Gs)	w %	Df (m)	B(m)	L (m)	Carga q (Ton)
1,89	2,78	20	1	3,5	4	10

VALORES OBTENIDOS						
Peso humedo (ton/m3)	e	w sat (%)	γ sat (ton/m3)	γ agua (ton/m3)	γ sum (ton/m3)	γ total (ton/m3)
2,27	0,47	16,94	2,21	1,00	1,21	2,27

Q neta	36,06	Q admi	3,08

ARENA	Q Admisible	Submultiplos de Carga (Ton/m²)				
		10% Qseg	30% Qulti	50%Qseg	80%Qseg	100%Qulti
	3,08	0,31	0,92	1,54	2,46	3,08

VALORES DE	
Carga aplicada	Asentamiento (cm)
0,000	0,000
0,308	0,028
0,924	0,035
1,540	1,233
2,464	11,440
3,080	14,300

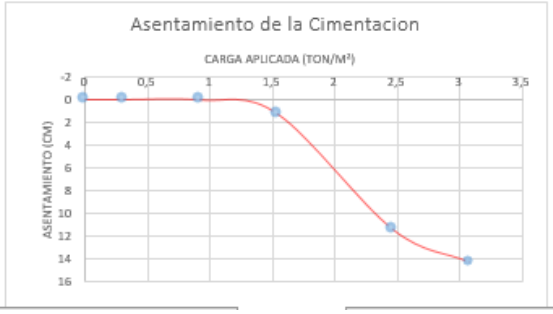


Figura N° 11. Representación de los resultados que se obtienen en suelo arenoso.

DATOS

Peso seco (ton/m3)	Gravedad Especifica (Gs)	W %	Df (m)	B (m)	L (m)	ϕ°	C (ton/m2	IP (%)
1,75	2,8	120	1	3	3	18	1	0

VALORES OBTENIDOS

Peso humedo (ton/m3)	e	W sat (%)	Y sat (ton/m3)	Y agua (ton/m3)	Y sum (ton/m3)	Y total (ton/m3)
3,85	0,60	21,43	2,13	1,00	1,13	3,85

Q neta	46,58	Q admi	2,35

ARCILLA	Q Admisible (Ton/m²)	Submultiplos de Carga (Ton/m²)				
		10% Qseg	30% Qseg	50%Qseg	80%Qseg	100%Qseg
	2,35	0,23	0,70	1,17	1,88	2,35

VALORES DE ASENTAMIENTO

Carga aplicada	Asentamiento (cm)
0,000	0,000
0,235	0,040
0,705	0,143
1,175	7,922
1,879	12,692
2,349	15,909

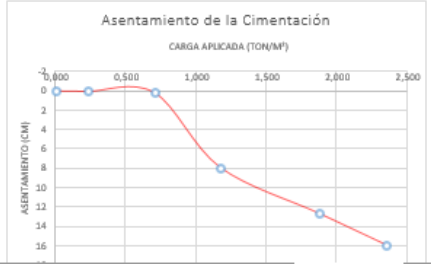


Figura N° 12. Representación de los resultados que se obtienen en suelo arcilloso.

CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

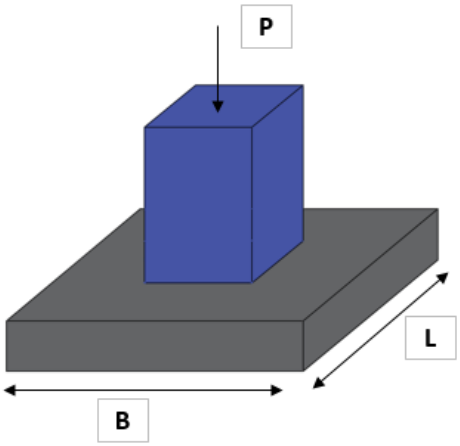


Figura N° 13. Cimentación superficial utilizado para el cálculo de asentamiento. Fuente: Elaborado por los autores.

Los perfiles geotécnicos utilizados en este TG son homogéneos de arcilla y arena, por lo que para cada uno de los suelos mencionados se le aplicaron los métodos correspondientes a cada caso.

V.1 Aplicación de las metodologías para asentamientos en suelo arenoso

V.1.1. Suelo homegéneo de arena, extraído de Tochon y Torres (2018).

Este caso se extrajo del Trabajo de Grado antes mencionado y aplicando los 3 modelos de estudio que son, Modelo Hiperbólico (Echezuría, 2020), Modelo elástico (Braja Das, 2011) y Modelo de factor de forma (Schemertmann 1976) **se** tiene**:**

Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df= 8,4 m.

V.1.1.1. Modelo hiperbólico aplicado (Echezuría, 2020).

Con los datos que se muestran se obtienen los valores necesarios para una muestra de suelo que en este caso se está trabajando sobre un estrato de arena, de los valores obtenidos se calcula la carga que va a soporta el estrato de suelo mediante la cimentación superficial, dichos valores se observan en la Tabla 1.

Tabla N° 1. Valores de Cargas admisibles teniendo en cuenta el Factor de seguridad con valor de 3. Aplicando el modelo hiperbólico de Echezuría (2020) de fundación de B=3,5m, L=4m, Df=8,4m.

ARENA	**Q Adm**	**Sub-múltiplos de Carga**				
		10% Q Adm	**30% Q Adm**	**50% Q Adm**	**80% Q Adm**	**100% Q Adm**
	12,42	1,24	3,73	6,21	9,94	12,42

Al observar los sub-múltiplos de carga que se observan en la Tabla 2, aplicando el modelo doblemente hiperbólico de Echezuría se obtienen los valores del módulo de Young de manera gráfica, una vez calculado el módulo de Young para cada una de las sub-cargas aplicadas se calculan los valores de asentamiento para cada una de las cargas tal como se observan en la siguiente tabla.

Tabla Nª 2. Valores obtenidos aplicando el modelo Hiperbólico en arenas de la fundación de B=3,5m, L=4m, Df=8,4m.

Carga aplicada (ton/m²)		1,242		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	3,15	0,61	944,11	0,0020509
A2	4,2	0,21	6848,86	0,0001318
A3	5,25	0,09	13012,84	0,0000373
A4	8,4	0,04	21916,36	0,0000158
				0,00224

Carga aplicada (ton/m²)		3,727		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	3,15	1,84	2739,55	0,002120
A2	4,2	0,64	6848,86	0,000395
A3	5,25	0,28	13012,84	0,000112
A4	8,4	0,12	21916,36	0,000047
				0,00267

Carga aplicada (ton/m²)		6,211		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	3,15	3,07	944,11	0,01025
A2	4,2	1,07	5479,09	0,00082
A3	5,25	0,46	13012,84	0,000186
A4	8,4	0,21	21916,36	0,000079
				0,0113

Carga aplicada (ton/m²)		9,938		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	3,15	4,918	944,11	0,01641
A2	4,2	1,719	3043,94	0,00237
A3	5,25	0,739	13012,84	0,000298
A4	8,4	0,330	21916,36	0,000126

				0,0192
Carga aplicada (ton/m²)		12,422		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	3,15	6,15	944,11	0,02051
A2	4,2	2,15	1957,96	0,00461
A3	5,25	0,92	13012,84	0,00037
A4	8,4	0,41	21916,36	0,000158
				0,0256

Como se indica en la tabla 2 se observan los módulos de Young para cada una de las sub-cargas aplicadas sobre el terreno, estos módulos son calculados utilizando los gráficos de esfuerzo y deformación, dichos gráficos se observan en el Anexo 7, para cada una de las zonas; de esta manera se obtienen los módulos correspondientes.

Tabla Nª 3. Valores de asentamiento aplicando el modelo hiperbólico de Echezuría (2020) de fundación de B=3,5m, L=4m, Df=8,4m.

Carga aplicada (ton/m²)	**Asentamiento (cm)**
0	**0,00**
1,242	**0,22**
3,727	**0,27**
6,211	**1,13**
9,938	**1,92**
12,422	**2,56**

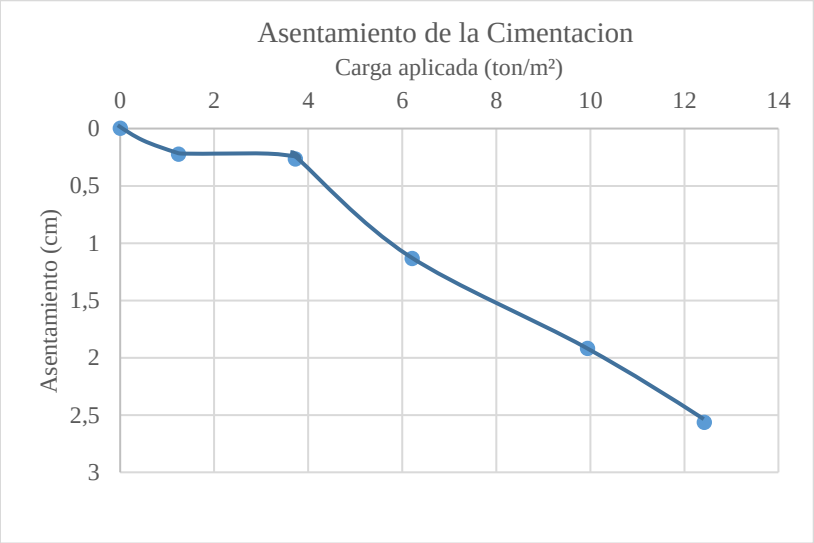


Gráfico N° 1. Valores de Asentamientos según carga aplicada para el Método Hiperbólico para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.

Una vez obtenidos los módulos de Young se calculan los asentamientos para cada uno de las sub-cargas, teniendo asentamientos se observa que el comportamiento de éstos aumentan a medida que la carga aplicada es mayor, de la misma forma a medida que aumenta la profundidad en el estrato de suelo el asentamiento disminuye tal como se menciona en el capítulo II y se observa en la Tabla Nº 2, finalmente se observa la Tabla Nº 3 a modo de resumen donde se aprecian las cargas aplicadas en cada una de las divisiones de estudio del estrato y los asentamientos totales así como el gráfico que muestra la variación del mismo.

V.1.1.2. Método de la Teoría de elasticidad, (Braja Das, 2011).

Una vez teniendo los datos mostrado en la tabla 4, se realiza las múltiples iteraciones correspondiente al cálculo del factor de forma y profundidad mencionadas en el capítulo II y mostrado en la tabla 5; se aplica la ecuación 3 con el fin de obtener el asentamiento para cada una de las sub-cargas en el estrato de arena, dichos asentamientos se muestran en la tabla 6.

Tabla N° 4. Valores obtenidos para una cimentación superficial en suelo arenoso, aplicando el método de la teoría de elasticidad para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m..

Parámetros para If	
μ	0,50
Df/B	0,29
B/L	0,88

Parámetros para Is	
B'	1,75
m'	1,14
n'	4,80

Tabla Nª 5. Valores obtenidos del factor de forma y profundidad, aplicando el método de la teoría de elasticidad para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.

Carga aplicada (ton/m²)		1,242	ton/m²	
Se (m)	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
0,0093	0,452	0,036	0,452	0,94914

Carga aplicada (ton/m²)		3,727	ton/m²	
Se	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
0,02800	0,45	0,04	0,45	0,95

Carga aplicada (ton/m²)		6,211	ton/m²	
Se	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
0,05834	0,45	0,04	0,45	0,95

Carga aplicada (ton/m²)		9,938	ton/m²	
Se	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
0,0747	0,45	0,04	0,45	0,95

Carga aplicada (ton/m²)		12,422	ton/m²	
Se	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
0,0933	0,45	0,04	0,45	0,95

Tabla Nª 6. Valores de asentamientos obtenidos aplicando el método de la teoría de elasticidad para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.

Carga aplicada (ton/m²)	**Asentamiento (cm)**
0	0
1,242	0,9334
3,727	2,8001
6,211	5,834
9,938	7,467
12,422	9,334

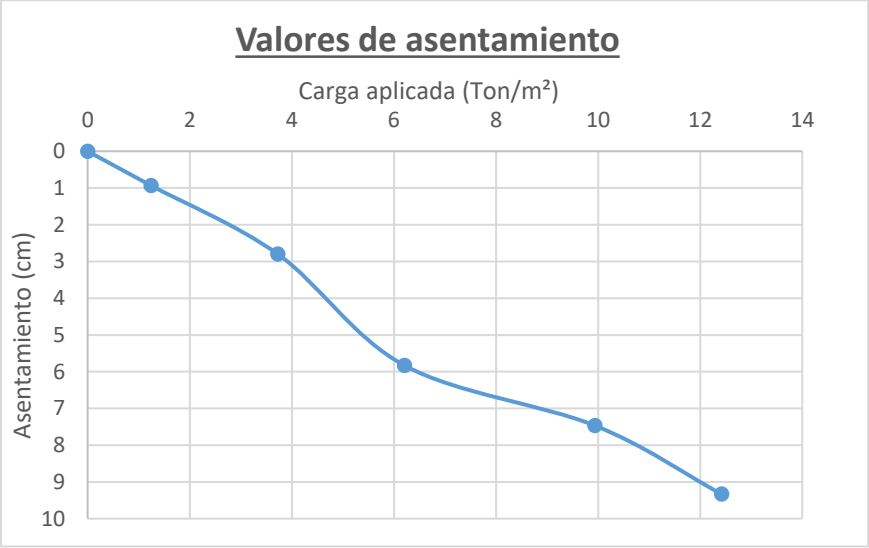


Gráfico N°2. Valores de Asentamientos según carga aplicada calculado por la Teoría de elasticidad, para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.

V.1.1.3. Modelo de Schmertmann: Uso del Factor de Influencia. (Braja Das, 2011).

Para el caso de las arenas donde es utilizado el método propuesto por Schmertman se observa que para conocer el valor de asentamiento requerido para una cimentación superficial se debe obtener los valores de Iz, los cuales son necesarios para elaborar el diagrama de la metodología de Schmertmann, observado en el Anexo 20. Este gráfico demuestra el factor de influencia el cual nos indica el valor inicial, el valor máximo y valor donde se hace cero, éstos valor se demuestra en la tabla 7. El procedimiento de Schmertmann aplicado a cada una de las cargas se visualiza en la tabla 8, obteniendo los asentamientos de las mismas, es importante acotar que para esta prueba se obtuvo el Módulo de Young promedio según la metodología de la teoría de elasticidad.

Tabla Nº7. Valores obtenidos factor de influencia para el modelo de Schmertmann.

Iz 0	0,10
Z1/B	0,51
Z2/B	2,03

Z0 (m)	0
Z1 (m)	1,78
Z2 (m)	7,11

Tabla Nº8. Valores obtenidos de asentamientos aplicando el modelo de Schmertmann. para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.

Carga aplicada (Ton/m²)		1,242					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	326,08	0,162	0,00025	0,693	1,4	0,54
2	1,27	309,50	0,374	0,00154			
3	1,72	277,46	0,441	0,00274			
4	3,61	232,43	0,178	0,00277			

Carga aplicada (Ton/m²)		3,73					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	521,57	0,166	0,00025	0,486	1,4	0,82
2	1,27	894,68	0,394	0,00163			
3	1,72	277,46	0,469	0,00291			
4	3,61	232,43	0,189	0,00294			

Carga aplicada (Ton/m²)		6,21					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	521,57	0,169	0,00026	0,525	1,4	1,57
2	1,27	894,68	0,402	0,00166			
3	1,72	277,46	0,479	0,00297			
4	3,61	232,43	0,193	0,00300			

Carga aplicada (Ton/m²)		9,94					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	521,57	0,169	0,00026	0,511	1,4	2,44
2	1,27	894,68	0,406	0,00168			
3	1,72	277,46	0,484	0,00300			
4	3,61	232,43	0,195	0,00303			

Carga aplicada (Ton/m²)		12,42					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	521,57	0,169	0,00026	0,495	1,4	2,93
2	1,27	894,68	0,408	0,00168			
3	1,72	277,46	0,486	0,00302			
4	3,61	232,43	0,197	0,00306			

Tabla Nª 9. Valores de asentamientos aplicando el modelo de Schmertmann. para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.

Carga aplicada (Ton/m²)	Asentamiento (cm)
0,00	0
1,24	0,54
3,73	0,97
6,21	1,85
9,94	2,87
12,42	3,44

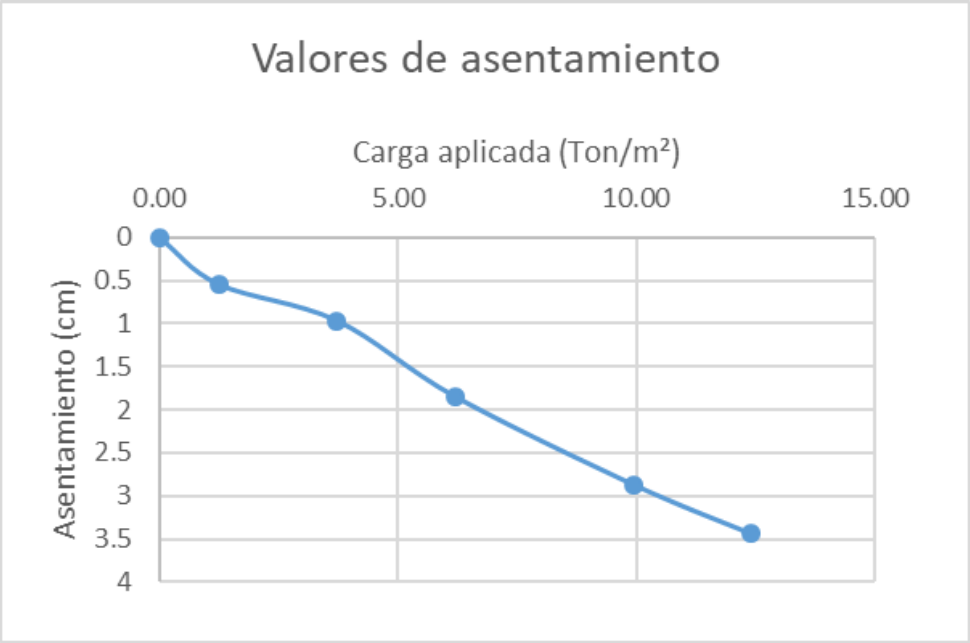


Gráfico N°3. Valores de Asentamientos según carga aplicada calculado por la metodología de Schmertmann, para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.

V.1.1.4. Comparación de las tres metodologías aplicadas en Caso I de suelo arenoso.

Una vez aplicados el modelo hiperbólico, el modelo de la teoría elástica y el método propuesto por Schmertmann los cuales son aplicados en un estrato de arena, se procede a realizar una tabla comparativa en la cual se observa la diferencia que se obtiene al aplicar los tres tipos de modelos.

Los asentamiento demostrado en la Tabla 10 en el suelo arenoso se observa que a medida que la carga aplicada aumenta, los asentamientos tienden a variar en comparación de un método con otro, estos cambios se deben a ciertos factores, para el caso del método de la teoría elástica como se aprecia en la tabla 6 existe una diferencia, de la misma manera para el método de la teoría

elástica se toma como valor de poisson 0,5 al ser un suelo Normalmente Consolidado, por otro lado si observamos los valores del modelo hiperbólico y el de Schmertmann se observa que a medida que la carga aumenta los valores de asentamientos no muestran una mayor diferencia, para un mejor entendimiento se observa el Gráfico 4, el cual se aprecia la diferencia entre los tres métodos aplicados sobre el estrato de arena.

Tabla Nª 10. Valores de Asentamiento de las metodologías aplicas en una cimentación superficial, para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.

ARENA

Carga aplicada (Ton/m²)	Método Hiperbólico (cm)	Teoría de elasticidad (cm)	Método de Schmertmann (cm)
0,00	**0,000**	**0,00**	**0,000**
0,31	**0,224**	**0,87**	**0,545**
0,92	**0,267**	**2,61**	**0,968**
1,54	**1,134**	**5,44**	**1,849**
2,46	**1,920**	**6,97**	**2,866**
3,08	**2,565**	**8,71**	**3,441**

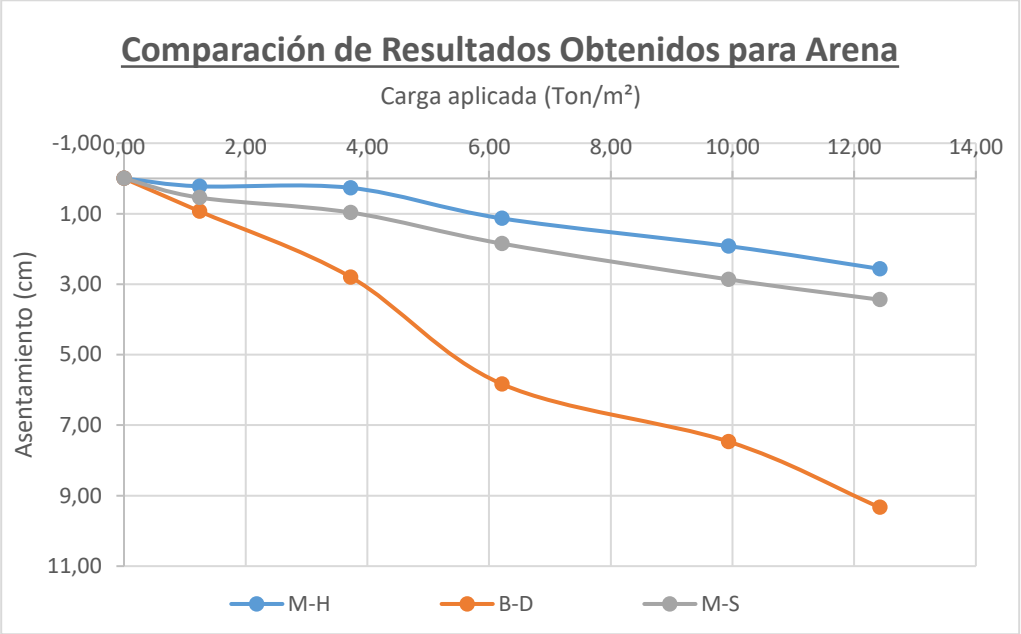


Gráfico Nº4. Valores de asentamientos calculados con la Teoría de elasticidad, Método Hiperbólico y metodología de Schmertmann, para el Caso I: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=3,5 m, L= 4 m, Df=8,4m.

Observando el gráfico anterior se visualiza que para la carga aplicada sobre un estrato de arena el modelo hiperbólico y el método propuesto por Schmertmann no tienen una diferencia considerable, es decir que para la carga que será aplicada sobre el estrato arenoso son muy parecidos entre sí, a diferencia del método de elasticidad con un asentamiento mucho mayor que los anteriores métodos. Es importante destacar que el método de Schmertmann ha sido verificado con mediciones en obras y sitios particulares y se ha encontrado buena correlación entre dichas mediciones con los valores calculados (Das, 2018). Ahora bien, el método hiperbólico Echezuría no ha podido ser corroborado con mediciones, pero el hecho de que se ajuste bastante al de Schmertmann revela la importancia de la consideración de los esfuerzos desviadores bajo la fundación lo cual se estima que hace el método de Schmertmann en forma diferente al considerar

el factor de influencia. Con relación al método elástico no es posible indicar lo mismo y la tendencia es a que existe una gran variabilidad con las mediciones en obras Lambe y Whitman (1969).

Para complementar el estudio del suelo arenoso se realiza la comparación de las metodologías antes mencionada con dos casos más, con el fin de observar las diferencias de los modelos en estudio.

V.1.2. Suelo homegéneo de arena, extraído del Braja Das (2011).

Caso II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df = 10,98 m.

V.1.2.1. Método hiperbólico aplicado (Echezuría, 2020).

En primer lugar, se calcula la carga que va a soporta el estrato de suelo mediante la cimentación superficial, dichos valores se observan en la Tabla 11.

Tabla Nª 11. Valores de Cargas admisibles teniendo en cuenta el Factor de seguridad con valor de 3, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

ARENA	Q Adm	Submultiplos de Carga				
		10% Qadm	30% Qadm	50% Qadm	80% Qadm	100% Qadm
	5,70	0,57	1,71	2,85	4,56	5,70

Al observar los sub-múltiplos de carga que se observan en la Tabla 12, aplicando el modelo doblemente hiperbólico de Echezuría se obtienen los valores del módulo de Young de manera gráfica, la cual se encuentra en el Anexo 12.

Tabla Nª 12. Valores obtenidos aplicando el modelo Hiperbólico en arenas, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

Carga aplicada (ton/m²)		0,570		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,647	0,31	944,11	0,0005559
A2	2,196	0,12	3580,98	0,0000774
A3	2,745	0,06	6803,86	0,0000234
A4	4,392	0,03	11459,13	0,0000103
				0,00067

Carga aplicada (ton/m²)		1,710		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,647	0,95	1432,39	0,001099
A2	2,196	0,38	2864,78	0,000290
A3	2,745	0,17	6803,86	0,000070
A4	4,392	0,08	11459,13	0,000031
				0,00149

Carga aplicada (ton/m²)		2,850		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,647	1,59	944,11	0,00278
A2	2,196	0,63	2387,32	0,00058
A3	2,745	0,28	6803,86	0,000117
A4	4,392	0,13	11459,13	0,000052
				0,0035

Carga aplicada (ton/m²)		4,560		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,647	2,54	944,11	0,00445
A2	2,196	1,01	1302,17	0,00170
A3	2,745	0,46	6803,86	0,000187
A4	4,392	0,22	11459,13	0,000083
				0,0064

Carga aplicada (ton/m²)		5,700		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,647	3,18	944,11	0,00556
A2	2,196	1,26	560,21	0,00495
A3	2,745	0,58	6803,86	0,00023
A4	4,392	0,26	11459,13	0,000103
				0,0108

Por último, se tiene la Tabla 13, con los asentamientos y comportamiento del mismo observado en la Gráfica 6.

Tabla Nª 13. Valores de asentamiento aplicando el modelo Hiperbólico, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

Carga aplicada (ton/m²)	**Asentamiento (cm)**
0	**0,00**
0,570	**0,07**
1,710	**0,15**
2,850	**0,35**
4,560	**0,64**
5,700	**1,08**

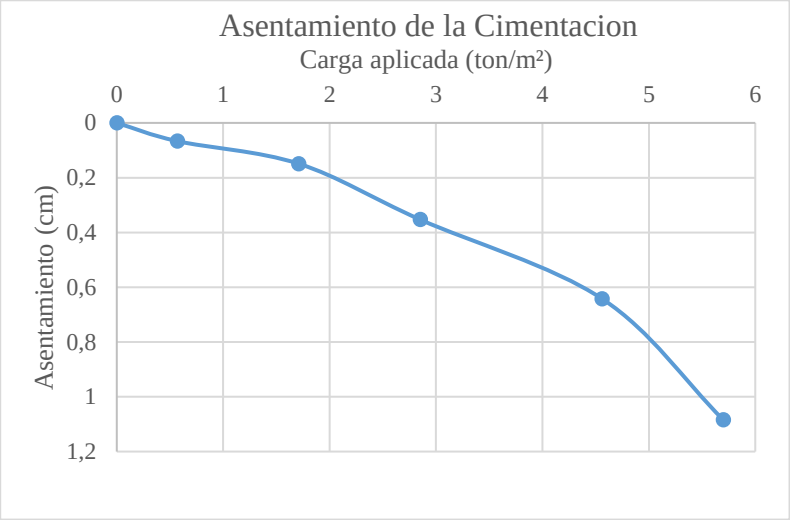


Gráfico Nº5. Valores de asentamientos calculados con el modelo hiperbólico, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

V.1.2.2. Método de la Teoría de elasticidad, (Braja Das, 2011).

Teniendo en cuenta el procedimiento anteriormente realizado para CASO I, se ejecuta de igual manera para el CASO II. Se tiene los valores para hallar el factor de forma y profundidad (Tabla 14) y se calcula dichos factores, mostrado en la tabla 15.

Tabla N° 14. Valores obtenidos para una cimentación superficial cuadrada en suelo arenoso, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

Parámetros para If	
μ	0,50
Df/B	0,50
B/L	1

Parámetros para Is	
B'	1,22
m'	1,00
n'	9,00

Tabla Nª 15. Valores obtenidos del factor de forma y profundidad, aplicando la teoría de elasticidad, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

Carga aplicada (ton/m²)		0,57	ton/m²	
Se (cm)	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
0,25	0,491	0,017	0,491	0,94914

Carga aplicada (ton/m²)		1,71	ton/m²	
Se (cm)	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
0,756	0,49	0,02	0,49	0,95

Carga aplicada (ton/m²)		2,85	ton/m²	
Se (cm)	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
1,574	0,49	0,02	0,49	0,95

Carga aplicada (ton/m²)		4,56	ton/m²	
Se (cm)	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
2,02	0,49	0,02	0,49	0,95

Carga aplicada (ton/m²)		5,70	ton/m²	
Se (cm)	**F1**	**F2**	**Is**	**If**
2,52	0,49	0,02	0,49	0,95

Tabla Nª 16. Valores de asentamientos obtenidos aplicando la teoría de elasticidad, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

Carga aplicada (ton/m²)	Asentamiento (cm)
0,00	0
0,57	0,2519
1,71	0,7557
2,85	1,574
4,56	2,015
5,70	2,519

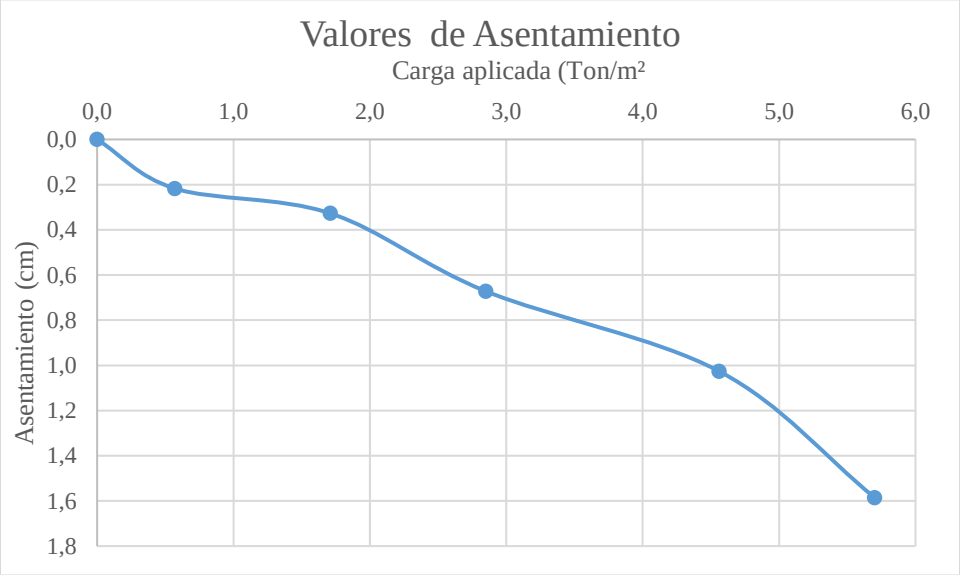


Gráfico Nº6. Valores de asentamientos calculados con el método de la teoría de elasticidad, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

V.1.2.3. Modelo de Schmertmann Uso del Factor de Influencia, (Braja Das, 2011).

El proceso del modelo se Schmertmann inicia con la obtención de Iz inicial y máximo, mostrado en la tabla 17, para continuar con la elaboración del diagrama (Anexo 21), para poder estimarlos factores C1 y C2, estos cálculos se pueden observar en la tabla 18. Es importante acotar

que para ésta prueba se obtuvo el Módulo de Young promedio según la metodología de la teoría de elasticidad como se realizó en el CASO I.

Tabla Nº17. Valores obtenidos factor de influencia para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

Iz 0	0,10
Z1/B	0,50
Z2/B	2,00

Z0 (m)	0
Z1 (m)	1,22
Z2 (m)	4,88

Tabla Nº18. Valores obtenidos del Modelo de Schmertmann, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

Carga aplicada (Ton/m²)		0.57					
Capa	**ΔZ**	**Es**	**Iz**	**Iz/Es *Δz**	**C1**	**C2**	**Se (cm)**
1	0.5	713.80	0.193	0.00014	1.000	1.4	0.22
2	0.72	1121.69	0.42	0.00027			
3	0.78	1121.69	0.57	0.00040			
4	2.88	1427.60	0.218	0.00044			

Carga aplicada (Ton/m²)		1.71					
Capa	**ΔZ**	**Es**	**Iz**	**Iz/Es *Δz**	**C1**	**C2**	**Se (cm)**
1	0.5	713.80	0.199	0.00014	0.633	1.4	0.33
2	0.72	1121.69	0.44	0.00028			
3	0.78	1121.69	0.521	0.00036			
4	2.88	1427.60	0.229	0.00046			

Carga aplicada (Ton/m²)		2.85					
Capa	**ΔZ**	**Es**	**Iz**	**Iz/Es *Δz**	**C1**	**C2**	**Se (cm)**
1	0.5	713.8	0.202	0.00014	0.700	1.4	0.67
2	0.72	1121.69	0.452	0.00029			
3	0.78	1121.69	0.536	0.00037			
4	2.88	1427.6	0.236	0.00048			

Carga aplicada (Ton/m²)		4.56					
Capa	**ΔZ**	**Es**	**Iz**	**Iz/Es *Δz**	**C1**	**C2**	**Se (cm)**
1	0.5	713.8	0.203	0.00014	0.680	1.4	1.03
2	0.72	1121.69	0.456	0.00029			
3	0.78	1121.69	0.54	0.00038			
4	2.88	1427.6	0.238	0.00048			

Carga aplicada (Ton/m²)		5.70					
Capa	**ΔZ**	**Es**	**Iz**	**Iz/Es *Δz**	**C1**	**C2**	**Se (cm)**
1	0.5	713.8	0.207	0.00014	0.750	1.4	1.58
2	0.72	1121.69	0.466	0.00030			
3	0.78	1121.69	0.554	0.00039			
4	2.88	1427.6	0.244	0.00049			

Se demuestra las cargas aplicadas y sus distintos asentamientos, para el caso II en la Tabla 19 y su comportamiento en el Gráfico N° 8.

Tabla Nª 19. Valores de asentamientos, el para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

Carga aplicada (Ton/m²)	**Asentamiento (cm)**
0.00	0
0.57	0.22
1.71	0.33
2.85	0.67
4.56	1.03
5.70	1.58

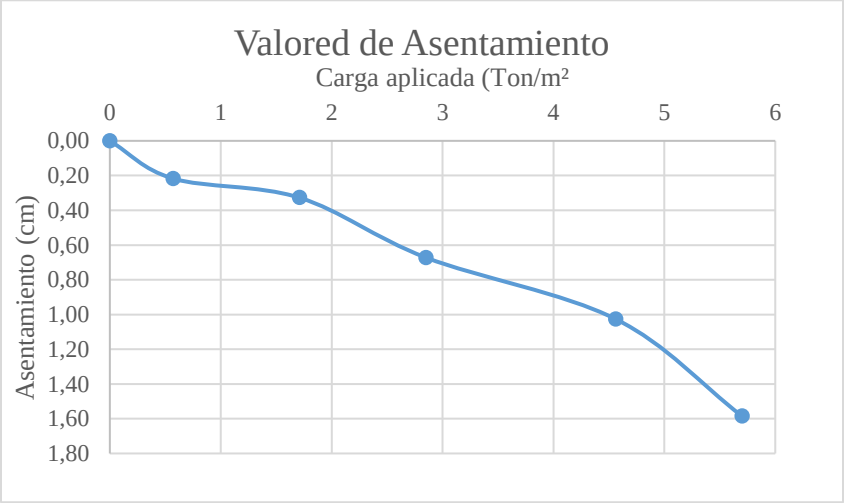


Gráfico Nº7. Valores de asentamientos calculados con el método de Schmertmann, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

V.1.2.4. Comparación de las tres metodologías aplicadas en Caso II de suelo arenoso.

Una vez aplicados el modelo hiperbólico, el modelo de la teoría elástica y el método propuesto por Schmertmann los cuales son aplicados en un estrato de arena, se procede a realizar una tabla comparativa en la cual se observa la diferencia que se obtiene al aplicar los tres tipos de modelos.

Los asentamientos demostrados en la Tabla 20 en el suelo arenoso se observa que a medida que la carga aplicada aumenta, los asentamientos tienden a variar en comparación de un método con otro, esto es según el plantamiento de estudio para cada caso, ya que como se demuestra la metodología de Echezuría 2020 y Schmertmann 1978 estudia el estrato en subestratos, obteniendo resultados similares con asentamientos menores en comparación a la metodología convencional.

Tabla Nª 20. Valores de Asentamiento de las metodologías aplicas en una cimentación superficial, en suelo arenoso para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m.

ARENA

Carga aplicada (Ton/m²)	Método Hiperbólico (cm)	Teoría de elasticidad (cm)	Método de Schmertmann (cm)
0,00	**0,000**	**0,00**	**0,000**
0,57	**0,067**	**0,25**	**0,217**
1,71	**0,149**	**0,76**	**0,327**
2,85	**0,353**	**1,57**	**0,672**
4,56	**0,642**	**2,02**	**1,026**
5,70	**1,08**	**2,52**	**1,585**

.

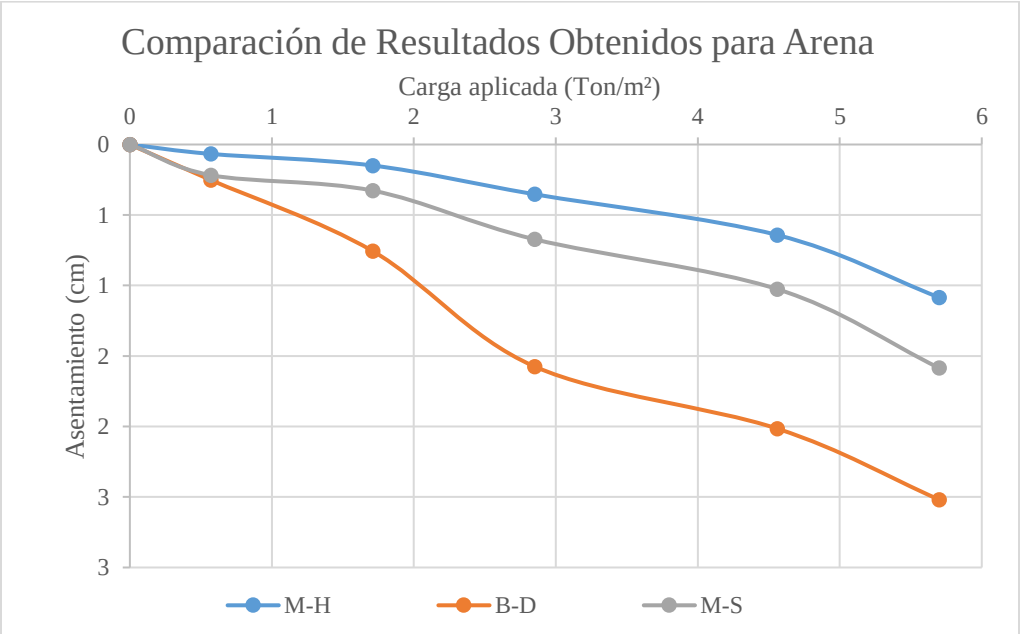


Gráfico Nº8. Valores de asentamientos calculados con el método Hiperbólico, el modelo de elasticidad y método de Schmertmann, para el CASO II: Perfil homogéneo Arena, con fundación cuadrada de B=2,44 m, L= 2,44 m, Df=10,98m.

De nuevo, se confirma la importancia de los esfuerzos desviadores en los cálculos de asentamientos tal como se destacó en el caso anterior.

V.1.3. Suelo homegéneo de arena, extraído de metodología según el uso del factor de influencia de la deformación unitaria, Schmertmann (1978) del Braja Das 2011.

Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m.

V.1.3.1. Método hiperbólico aplicado (Echezuría, 2020).

En primer lugar, se calcula la carga que va a soporta el estrato de suelo mediante la cimentación superficial, dichos valores se observan en la Tabla 21.

Tabla Nª 21. Valores de Cargas admisibles teniendo en cuenta el Factor de seguridad con valor de 3, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m.

Carga aplicada (ton/m²)		0,493		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,62	0,29160285	900,63	0,0005245
A2	2,16	0,12516143	3322,24	0,0000814
A3	2,7	0,06054564	6312,26	0,0000259
A4	4,32	0,02930586	10631,18	0,0000119
				0,00064

Carga aplicada (ton/m²)		1,478		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,62	0,87480856	1476,55	0,000960
A2	2,16	0,37548428	2657,79	0,000305
A3	2,7	0,18163691	6312,26	0,000078
A4	4,32	0,08791758	10631,18	0,000036
				0,00138

Carga aplicada (ton/m²)		2,463		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,62	1,45801427	900,63	0,00262
A2	2,16	0,62580713	2214,83	0,00061
A3	2,7	0,30272819	6312,26	0,000129
A4	4,32	0,1465293	10631,18	0,000060
				0,0034

Carga aplicada (ton/m²)		3,941		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,62	2,33282283	900,63	0,00420
A2	2,16	1,00129142	1022,23	0,00212
A3	2,7	0,4843651	6312,26	0,000207
A4	4,32	0,23444688	10631,18	0,000095
				0,0066

Carga aplicada (ton/m²)		4,927		
Zona de aplicación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse (m)**
A1	1,62	2,91602854	900,63	0,00525
A2	2,16	1,25161427	257,20	0,01051
A3	2,7	0,60545638	6312,26	0,00026
A4	4,32	0,2930586	10631,18	0,000119
				0,0161

Por último, se tiene la Tabla 22, con los asentamientos y comportamiento del mismo observado en la Gráfico 9.

Tabla Nª 22. Valores de asentamiento aplicando el modelo Hiperbólico, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m.

Carga aplicada (ton/m²)	**Asentamiento (cm)**
0	**0,00**
0,493	**0,06**
1,478	**0,14**
2,463	**0,34**
3,941	**0,66**
4,927	**1,61**

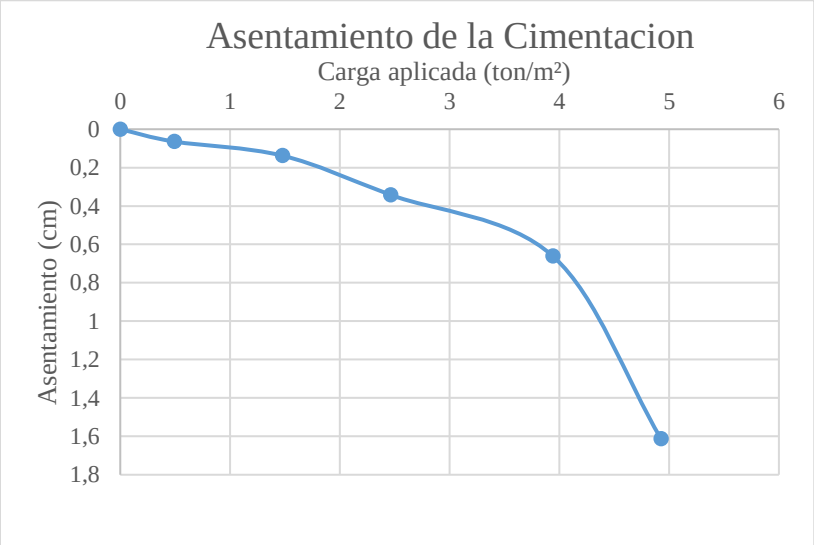


Gráfico Nº9. Valores de asentamientos calculados con el modelo hiperbólico, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m.

.

V.1.3.2. Método de la Teoría de elasticidad, (Braja Das, 2011).

Teniendo en cuenta el procedimiento anteriormente realizado para CASO II, se ejecuta de igual manera para el CASO III. Se tiene los valores para hallar el factor de forma y profundidad (Tabla 23) y se calcula dichos factores, mostrado en la tabla 24.

Tabla N° 23. Valores obteniedos para el método de la teoría de elasticidad, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m.

Parámetros para If	
μ	0,50
Df/B	0,70
B/L	0,50

Parámetros para Is	
B'	1,00
m'	2,00
n'	5,00

Tabla Nª 24. Valores obtenidos del factor de forma y profundidad, aplicando la teoría de elasticidad, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m.

Carga aplicada (ton/m²)		0,493	ton/m²	
F1	**F2**	**Is**	**If**	**Se (cm)**
0,526	0,058	0,526	0,949	0,28

Carga aplicada (ton/m²)		1,478	ton/m²	
F1	**F2**	**Is**	**If**	**Se (cm)**
0,526	0,058	0,526	0,949	0,84

Carga aplicada (ton/m²)		2,463	ton/m²	
F1	**F2**	**Is**	**If**	**Se (cm)**
0,526	0,058	0,526	0,949	1,76

Carga aplicada (ton/m²)		3,941	ton/m²	
F1	**F2**	**Is**	**If**	**Se (cm)**
0,526	0,058	0,526	0,949	2,26

Carga aplicada (ton/m²)		4,927	ton/m²	
F1	**F2**	**Is**	**If**	**Se (cm)**
0,526	0,058	0,526	0,949	2,82

Tabla Nª 25. Valores de asentamientos obtenidos aplicando la teoría de elasticidad, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m.

Carga aplicada (ton/m²)	**Asentamiento (cm)**
0	0
0,493	0,2824
1,478	0,8473
2,463	1,765
3,941	2,260
4,927	2,824

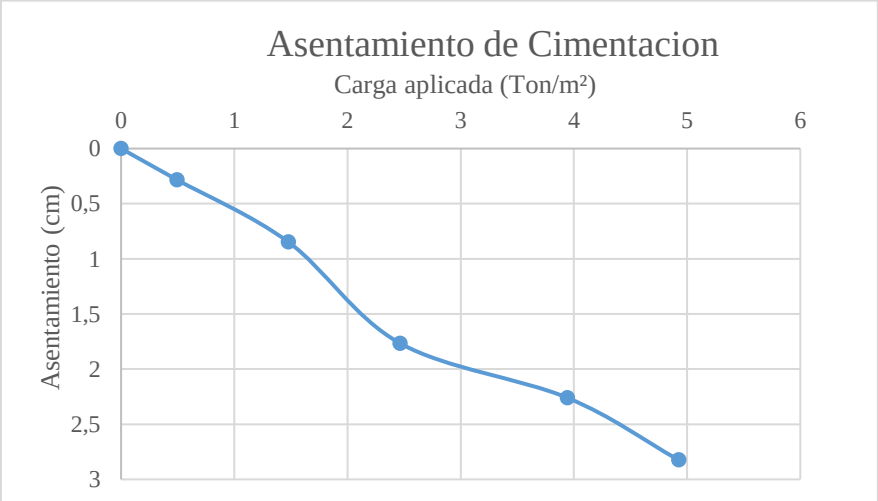


Gráfico Nº10. Valores de asentamientos calculados con el método de la teoría de elasticidad, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5 m.

V.1.3.3. Modelo de Schmertmann Uso del Factor de Influencia, (Braja Das, 2011).

El proceso del modelo se Schmertmann inicia con la obtención de Iz inicial y máximo, mostrado en la tabla 26, para continuar con la elaboración del diagrama (Anexo 22), para poder estimarlos factores C1 y C2, estos cálculos se pueden observar en la tabla 27. Es importante acotar que para ésta prueba se obtuvo el Módulo de Young promedio según la metodología de la teoría de elasticidad como se realizó en el CASO II.

Tabla Nº26. Valores obtenidos factor de influencia para Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, H= 5 m.

Iz 0	0,11
Z1/B	0,56
Z2/B	2,22

Z0 (m)	0
Z1 (m)	1,11
Z2 (m)	4,44

Tabla Nº27. Valores obtenidos del Modelo de Schmertmann, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5

Carga aplicada (Ton/m²)		0,49					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	642,66	0,202	0,00015716	2,229	1,4	0,02
2	0,611	979,7	0,404	0,00025196			
3	1,389	979,7	0,405	0,0005742			
4	1,944	842,6	0,15	0,00034607			

Carga aplicada (Ton/m²)		1,48					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	642,66	0,212	0,00016494	0,358	1,4	0,19
2	0,611	979,7	0,441	0,00027503			
3	1,389	979,7	0,448	0,00063517			
4	1,944	842,6	0,165	0,00038068			

Carga aplicada (Ton/m²)		2,46					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	642,66	0,221	0,00017194	0,746	1,4	0,79
2	0,611	979,7	0,469	0,0002925			
3	1,389	979,7	0,478	0,0006777			
4	1,944	842,6	0,176	0,00040606			

Carga aplicada (Ton/m²)		3,94					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	642,66	0,23	0,00017894	0,866	1,4	1,86
2	0,611	979,7	0,497	0,00030996			
3	1,389	979,7	0,51	0,00072307			
4	1,944	842,6	0,187	0,00043144			

Carga aplicada (Ton/m²)		4,93					
Capa	ΔZ	Es	Iz	Iz/Es *Δz	C1	C2	Se (cm)
1	0,5	642,66	0,235	0,00018283	0,899	1,4	2,62
2	0,611	979,7	0,513	0,00031994			
3	1,389	979,7	0,527	0,00074717			
4	1,944	842,6	0,194	0,00044759			

Se demuestra las cargas aplicadas y sus distintos asentamientos, para el caso III en la Tabla 28 y su comportamiento en el Gráfico N° 12.

Tabla Nª 28. Valores de asentamientos obtenidos del Modelo de Schmertmann, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5

Carga aplicada (Ton/m²)	**Asentamiento (cm)**
0,00	0
0,49	0,02
1,48	0,19
2,46	0,79
3,94	1,86
4,93	2,62

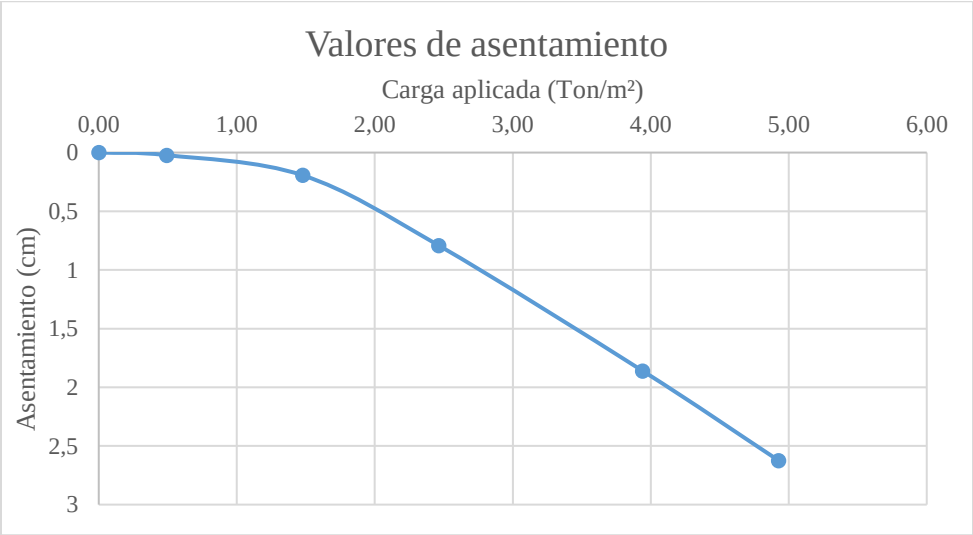


Gráfico Nº11. Valores de asentamientos calculados con el método de Schmertmann, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5

V.1.3.4. Comparación de las tres metodologías aplicadas en Caso III de suelo arenoso.

Una vez aplicados el modelo hiperbólico, el modelo de la teoría elástica y el método propuesto por Schmertmann los cuales son aplicados en un estrato de arena, se procede a realizar una tabla comparativa en la cual se observa la diferencia que se obtiene al aplicar los tres tipos de modelos.

Los asentamientos demostrados en la Tabla 29 en el suelo arenoso se observa que a medida que la carga aplicada aumenta, los asentamientos tienden a variar en comparación de un método con otro.

Tabla Nª 29. Valores de Asentamiento de las metodologías aplicadas para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5

ARENA

Carga aplicada (Ton/m²)	Método Hiperbólico (cm)	Teoría de elasticidad (cm)	Método de Schmertmann (cm)
0,00	**0,000**	**0,00**	**0,000**
0,49	**0,064**	**0,28**	**0,022**
1,48	**0,138**	**0,85**	**0,194**
2,46	**0,342**	**1,77**	**0,792**
3,94	**0,661**	**2,26**	**1,860**
4,93	**1,613**	**2,82**	**2,624**

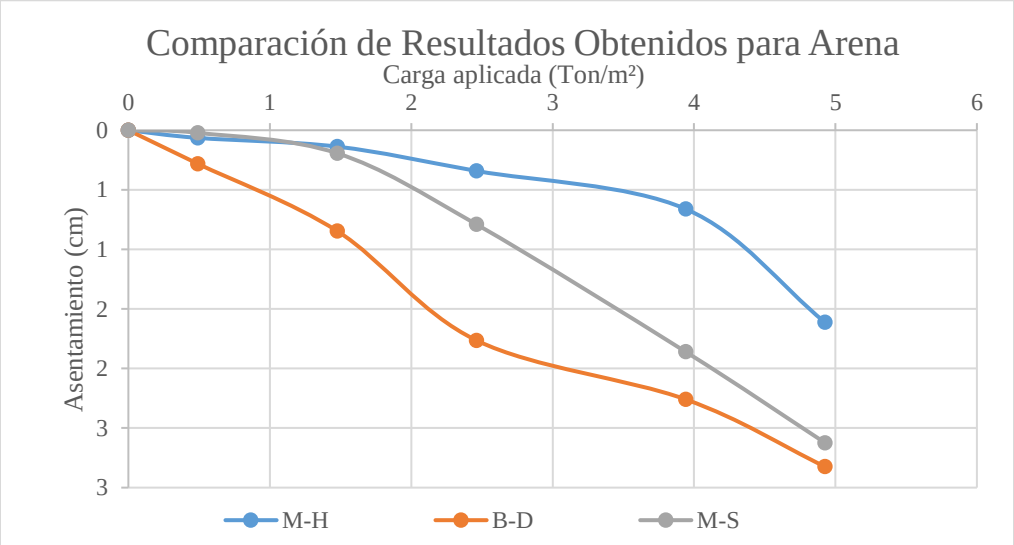


Gráfico Nº12. Valores de asentamientos calculados con la Teoría de elasticidad, Método Hiperbólico y metodología de Schmertmann, para el Caso III: Perfil homogéneo Arena, con fundación rectangular de B=2 m, L= 4 m, Df= 5.

De nuevo, se confirma la importancia de los esfuerzos desviadores en los cálculos de asentamientos tal como se destacó en los dos casos anteriores.

V.2.Aplicación de las metodologías para asentamientos en suelo arcilloso.

En el estudio realizado para el suelo arcilloso las metodologías empleadas son: Método de la teoría de elasticidad (Braja Das, 2011), Modelo hiperbólico para arcillas (Echezuría, 2020) y método de la Ley Edométrica Continua; éste último basado en el modelo desarrollado por el Profesor Naime, Wagdi. Los casos extraídos del texto del profesor Naime (Anexo 25), fueron los casos a comparar para ésta Tesis de Grado, con el fin de demostrar los resultados obtenidos.

Antes de continuar es importante destacar que para estos casos se asume que las arcillas son de alta plasticidad, quiere decir que para el Modelo Hiperbólico se toma un IP=50, por lo cual facilita la comparación final de los resultados de las metodologías mencionadas.

V.2.1. Suelo homogéneo de arcilla, Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres y cimentación rectangular. (Anexo 25).

Caso I. B= 1,52 m, L = 3,05m, Df = 2,13m.

V.2.1.1. Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC) aplicado al Caso I.

Tabla Nº30. Valor de asentamiento aplicando la metodología de la Ley Edométrica Continua, para el Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres y cimentación rectangular B= 1,52 m, L = 3,05m, Df = 2,13m.

Carga aplicada		8,61	ton/m²
Tipo de cimentación	**Profundidad**	**Módulo de Young (E)**	**Asentamiento (cm)**
Aislada	6,1	268,63	1,66

V.2.1.2. Modelo hiperbólico aplicado en suelos arcillosos aplicado al Caso I.

Como se menciona anteriormente, se aplica el modelo hiperbólico al Caso I descrito en el Anexo 25.

Tabla Nº31. Valor de asentamiento aplicando el modelo hiperbólico, para el Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres y cimentación rectangular B= 1,52 m, L = 3,05m, Df = 2,13m.

Carga aplicada		8,61	ton/m²		
Tipo de cimentación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse**	**Asentamiento (cm)**
Aislada	2,28	0,93	246,24	0,009	0,86
	3,648	0,44	634,10	0,003	0,25
	6,10	0,34	861,98	0,002	0,24
					1,35

V.2.1.3. Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad aplicado al Caso I.

Como se menciona anteriormente, se aplica el método de la teoría de elasticidad al Caso I descrito en el Anexo 25.

Tabla N° 32. Valores obtenidos para una cimentación rectangular B= 1,52 m, L = 3,05m, Df = 2,13m, para el Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres.

Parámetros para If	
μ	0,50
Df/B	1,40
B/L	0,50

Parámetros para Is	
B'	0,76
m'	2,01
n'	8,03

Tabla N° 33. Valor de asentamiento aplicando el método de la teoría de elasticidad, para el Caso I. Suelo homogéneo Arcilla Marrón de Londres y cimentación rectangular B= 1,52 m, L = 3,05m, Df = 2,13m.

Carga aplicada (ton/m²)		8,610	ton/m²			
m'	**n'**	**F1**	**F2**	**Is**	**If**	**Se (cm)**
2,01	8,03	0,386	0,036	0,386	0,827	2,33

V.2.2. Suelo homogéneo de arcilla, Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Chelsea, Bridge) y cimentación rectangular. (Anexo 25).

Caso II. B = 8,53 m, L = 32,31m, Df = 9,45m.

V.2.2.1 Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC) aplicado al Caso II.

Tal como se aprecia en los valores de asentamiento extraído del estudio del Profesor Naime Wagdi, se tomaron éstos resultados para compararlos con el modelo Hiperbólico (Echezuría 2020), y no se desarrollan por la complejidad de la metodología aplicada por el profesor, ya que utiliza un modelo matemático.

Tabla Nº34. Valor de asentamiento aplicando la metodología de la Ley Edométrica Continua, para el Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres y cimentación rectangular B = 8,53 m, L = 32,31m, Df = 9,45m.

Carga aplicada		18,03	ton/m²
Tipo de cimentación	**profundidad**	**Módulo de Young (E)**	**Asentamiento (cm)**
Aislada	18,29	781,81	8,55

V.2.2.2. Modelo hiperbólico aplicado en suelos arcillosos aplicado al Caso II.

Tabla Nº35. Valor de asentamiento aplicando el modelo hiperbólico, para el Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres y cimentación rectangular B = 8,53 m, L = 32,31m, Df = 9,45m.

Carga aplicada		18,03	ton/m²		
Tipo de cimentación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse**	**Asentamiento (cm)**
Aislada	10,236	5,24	774,92	0,069	**6,93**
	12,795	2,71	3418,21	0,010	**1,01**
	18,29	1,44	7948,02	0,003	**0,33**
					8,27

V.2.2.3. Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad aplicado en arcilla aplicado al Caso II.

Tabla Nº36. Valores obtenidos para el Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres y cimentación rectangular B = 8,53 m, L = 32,31m, Df = 9,45m.

Parámetros para If	
μ	0,50
Df/B	1,11
B/L	0,26

Parámetros para Is	
B'	4,27
m'	3,79
n'	4,29

Tabla Nº37. Valor de asentamiento aplicando el método de la teoría de elasticidad, para el Caso II. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres y cimentación rectangular B = 8,53 m, L = 32,31m, Df = 9,45m.

Carga aplicada (ton/m²)		18,030	ton/m²			
m'	**n'**	**F1**	**F2**	**Is**	**If**	**Se (cm)**
3,79	4,29	0,386	0,126	0,386	0,827	9,42

V.2.3. Suelo homogéneo de arcilla, Caso III Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular. (Anexo 25).

Caso III. B = 8,23 m, L = 35,66m, Df = 6,71m.

V.2.3.1 Método de asentamiento basado en la Ley Edométrica Continua (LEC) aplicado al Caso III.

Tal como se aprecia en los valores de asentamiento realizados por Naime.

Tabla Nº38. Valor de asentamiento aplicando la metodología de la Ley Edométrica Continua, para el Caso III. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular B = 8,23 m, L = 35,66m, Df = 6,71m.

Carga aplicada		26,92	ton/m²
Tipo de cimentación	**profundidad**	**Módulo de Young (E)**	**Asentamiento (cm)**
Aislada	12,19	646,02	13,48

V.2.3.2. Modelo hiperbólico aplicado en suelos arcillosos aplicado al Caso III.

Tabla Nº39. Valor de asentamiento aplicando el modelo hiperbólico, para el Caso III. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular B = 8,23 m, L = 35,66m, Df = 6,71m.

Carga aplicada		26,92	ton/m²		
Tipo de cimentación	**profundidad**	**Δσ**	**Módulo de Young (E)**	**Δse**	**Asentamiento (cm)**
Aislada	7,407	16,825	1074,77	0,116	**11,60**
	9,876	8,002	6835,36	0,012	**1,16**
	12,214	4,219	8542,94	0,006	**0,60**
					13,35

V.2.3.3. Método de asentamiento basado en la teoría de elasticidad aplicado al Caso III.

Tabla Nº40. Valores obtenidos para el Caso III. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular B = 8,23 m, L = 35,66m, Df = 6,71m.

Parámetros para If	
μ	0,50
Df/B	0,82
B/L	0,23

Parámetros para Is	
B'	4,12
m'	4,33
n'	2,96

Tabla Nº41. Valor de asentamiento aplicando el método de la teoría de elasticidad, para el Caso III. Suelo homogéneo Arcilla Azul de Londres (Waterloo, Bridge) y cimentación rectangular B = 8,23 m, L = 35,66m, Df = 6,71m.

Carga aplicada (ton/m²)		26,920	ton/m²			
m'	**n'**	**F1**	**F2**	**Is**	**If**	**Se (cm)**
4,33	2,96	0,386	0,126	0,386	0,827	16,42

V.3. Comparación de los asentamientos obtenidos en estratos de arcilla.

Una vez aplicada cada metodología se compara los resultados obtenidos, mostrado en la tabla 42, la cual se muestran los tres casos estudiados junto al valor de asentamiento para poder comparar los resultados.

Tabla Nº42. Valores de Asentamientos para cada uno de los distintos casos aplicados en arcilla.

		Asentamientos				
CASO	**Carga aplicada (ton/m²)**	**M-H (cm)**	**LEC (cm)**	**LET (cm)**	**Medidos en sitio (cm)**	**T-EL (cm)**
I	8,61	**1,35**	**1,66**	**1,65**	**1,52**	**2,33**
II	18,3	**8,27**	**8,55**	**8,38**	**5,59**	**9,42**
III	26,92	**13,35**	**13,48**	**13,21**	**10,67**	**16,42**

De la misma forma se puede observar en el Gráfico 13 los valores obtenidos de las 3 metodologías aplicada antes descritas y como complemento, se le agregó los resultados del modelo edométrico tradicional (LET), junto con el asentamiento medido en el sitio, estos últimos dos extraídos del trabajo del profesor (Wagdi Naime 2020), es importante destacar que esta comparación se puede realizar debido a que las arcillas son de alta plasticidad por lo cual se tomó como valor de Plasticidad al 50% para todas las arcillas, por lo cual permite realizar dicha comparación.

Al observar con detalle el gráfico se aprecia como los valores de M-H (verde) y los calculados con la Teoría de Elasticidad (azul) correspondientes al asentamiento inmediato son mayores que los asentamientos medidos que corresponden al sentamiento total hasta el momento de la medición. De la misma manera, los asentamientos con la ley edométrica continua LEC (naranja) y la ley edométrica tradicional, LET (gris), que corresponden a los asentamientos por consolidación, también son mayores que los valores de asentamientos totales. Es claro que ni los asentamientos inmediatos ni los de consolidación pueden ser mayores que los asentamientos totales, por eso se analizarán los cálculos en mayor detalle.

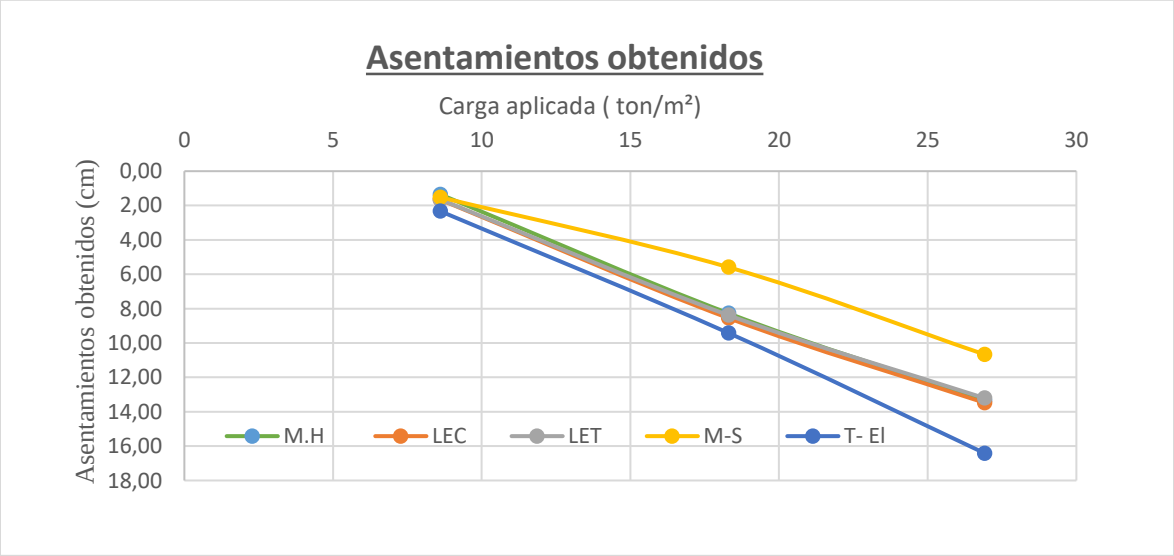


Gráfico Nº13. Valores de asentamientos calculados con el Método Hiperbólico, Ley Edométrica Continua y método realizado con la Teoría de elasticidad, para los tres tipos de arcillas de Londres, extraído del Trabajo de profesor Naime Wagdi.

Para el caso del método hiperbólico, M-H, la sobreestimación del asentamiento es un reflejo del índice de plasticidad, puesto que al no tener un valor exacto de IP ni del contenido de material no plástico, no se conoce el valor correspondiente del ángulo de fricción. Algo similar pasa con los asentamientos con la teoría elástica pues es evidente que el módulo de Young parece estar muy subestimado.

Por otra parte, para la ley edométrica continua (Naime) LEC y la ley edometrica tradicional LET, es posible que el tiempo transcurrido no haya permitido alcanzar el asentamiento por consolidación completo, es decir, no haya transcurrido el tiempo necesario para permitir la disipación total de las presiones de poros.

Para demostrar la influencia del contenido de material no plástico y robustecer el análisis de este resultado según el modelo hiperbólico se calculó el asentamiento con diferentes valores de material no plástico y sus ángulos de fricción con apoyo de la Figura 14, desarrollado por Echezuría y Privitera (2018).

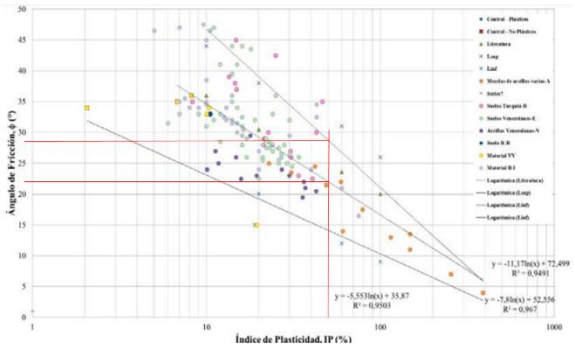


Figura N°14. Obtención de los ángulos de fricción para el estudio de los Casos I, II y III, con la gráfica de la "Correlación entre el ángulo de fricción con el índice de plasticidad. Fuente: Integración 3-d de las propiedades ingenieriles del suelo y la importancia del plano q-e.

El nuevo cálculo se realizó para ángulos de fricción de 22° y 28°; además de 18° (ya utilizado para los Casos I, II y III). Los resultados indican asentamientos muy parecidos a los medidos en sitio, y se incluyen en la Tabla 43 y el Gráfico N° 14. También se demuestran en el Anexo 26 y 27, las diferencias de los módulos de Young para cada uno de estos nuevos casos estudiados.

Tabla N°43. Resultados de asentamientos en arcilla para los Casos I, II y II, aplicando el modelo hiperbólico y valores medidos en sitios.

Casos	Carga aplicada (ton/m²)	M-H (cm) [18º]	M-H (cm) [22º]	M-H (cm) [28º]	Medidos en sitio (cm)
I	8.61	1.58	1.57	0.89	1.52
II	18.3	8.26	5.01	4.88	5.59
III	26.92	13.13	11.35	11.07	10.67

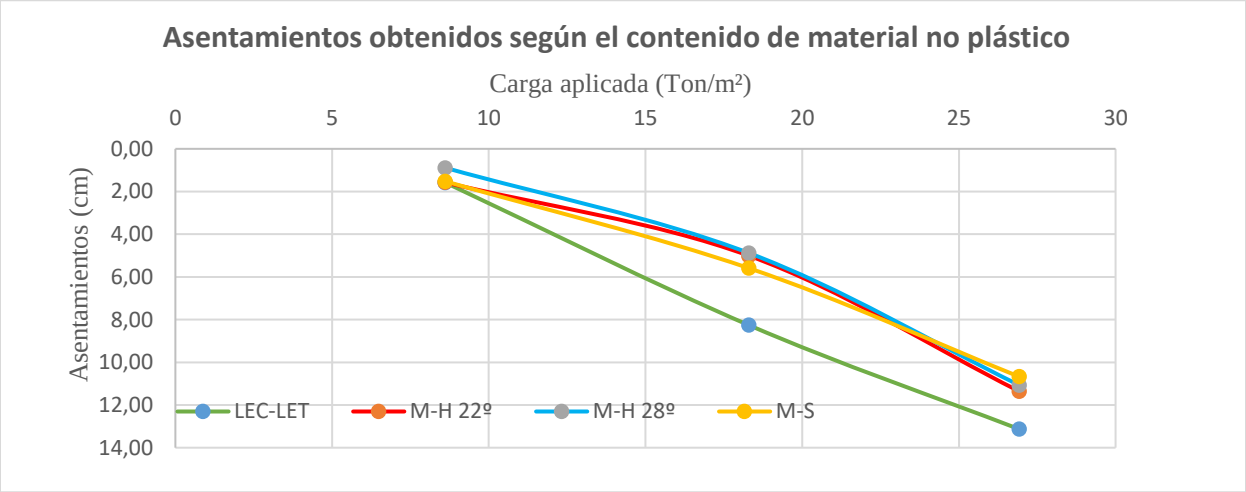


Gráfico Nº14. Comparación de las curvas según asentamientos obtenidos para los diferentes ángulos de fricción de estudio (22º y 28º) aplicando el modelo hiperbólico y asentamientos medido en sitio.

Como se observa en el Gráfico Nº14 los nuevos valores de asentamiento inmediato obtenidos mediante el modelo hiperbólico (Echezuria), se ajustan a los medidos en sitio, con lo cual se refuerza la condición de que el asentamiento por consolidación no debe haber ocurrido completamente.

CAPITULO VI

Conclusiones y Recomendaciones

VI.1. Conclusiones

Para el caso de las arenas se observa que, para los tres casos estudiados, los resultados obtenidos con los métodos de Schmertman e Hiperbólico de Echezuría presentan una tendencia similar, aunque en general, los resultados de Schmertman son algo mayores que los del Hiperbólico. En contraste, los resultados obtenidos con el modelo elástico resultan siempre mucho mayores que los anteriores.

Claramente esa diferencia, es debida a que los modelos de Schmertmann y Echezuría consideran los ajustes de los módulos de Young aplicables a distintas profundidades, aunque lo hacen de manera diferente. Similarmente, se observó que, para esos modelos la diferencia entre los asentamientos calculados para cimentaciones rectangulares y cuadradas es baja. Contrariamente, los asentamientos calculados con la Teoría de Elasticidad son muy superiores a los anteriores tanto para fundaciones cuadradas como rectangulares.

En el caso de las arcillas, la comparación de las metodologías planteadas por los Profesores Naime y Echezuría no se pueden comparar debido a que la Ley edométrica continúa modificada aplica para asentamientos por consolidación y en el modelo hiperbólico es para asentamientos inmediatos. No obstante, fue posible identificar que es muy probable que para las arcillas estudiadas con esos métodos no se hubiera alcanzado la consolidación completa ya que el método hiperbólico con un contenido de material no plástico permitió estimar asentamientos inmediatos similares a los medidos en sitio, demostrando la versatilidad del modelo hiperbólico de Echezuría.

VI.2. Recomendaciones

- ✓ Es conveniente la comparación de los asentamientos con el modelo hiperbólico y método de la ley edométrica continua (LEC) para cimentaciones continuas, cimentaciones combinadas o losas de fundación.

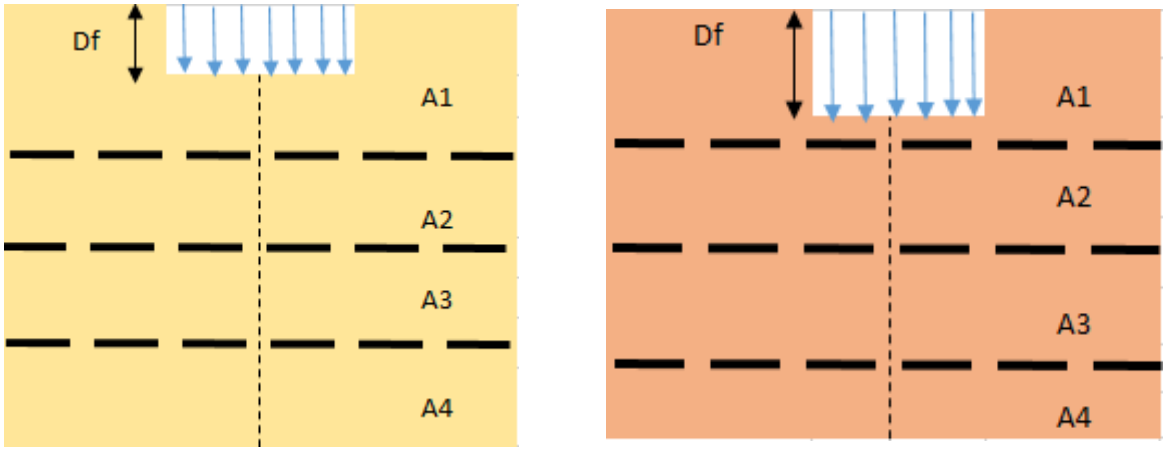
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Braja Das. Fundamentos de la ingeniería de cimentaciones. Séptima edición. México. Cengage learning.
- D`Onofrio, A e Izarra, G. 2018. Verificación del comportamiento de un modelo integrado de suelos plásticos no drenados y su programación en Matlab. Trabajo de Grado para Ingeniero Civil, Univ. Católica Andrés Bello, Caracas.
- Echezuría, H. 2020. Modelo Hiperbólico Doblemente Normalizado aplicable a la caracterización geotécnica. Caracas.
- Echezuría, H. (2018). Integración 3-d de las propiedades ingenieriles del suelo y la importancia del plano, q-e, Memorias de las Jornadas de Investigación y Encuentro Académico Industrial de la Facultad de Ing. de la Univ. Central de Venezuela, oct.
- Echezuría, H. Diseño de cimentaciones por capacidad portante y asentamientos. Univ. Católica Andrés Bello. Caracas.
- Naime.W. 2020. Ley Edométrica Continua para el comportamiento esfuerzo – deformación de los suelos. Univ. Central de Venezuela, Caracas.
- Tochon y Torres. 2018. Automatización del método de cálculo de asentamientos de fundaciones superficiales en perfiles geotécnicos heterogéneos. Trabajo de Grado para Ingeniero Civil, Univ. Católica Andrés Bello, Caracas.

ANEXOS

Una vez que obtenemos los valores de módulo de Young y los asentamientos para los estratos de arena y arcilla los cuales fueron los estratos de suelo que se estudiaron en el presente trabajo de grado hay que tener en cuenta que se debieron estimardiferentes valores dependiendo de tipo de metodología a usar, como se pudo observar en el trabajo de grado que se está presentando se mostraran los anexos necesarios para cada una de las metodologías aplicadas para que de esta manera dejar una mayor claridad de lo que se realizó.

El anexo 1 se muestra el estrato de suelo en el que se trabajó en este caso se muestran los estratos de arena y arcilla los cuales están divididos en cuatro zonas las cuales se encuentran descritas como A1, A2, A3 y A4.

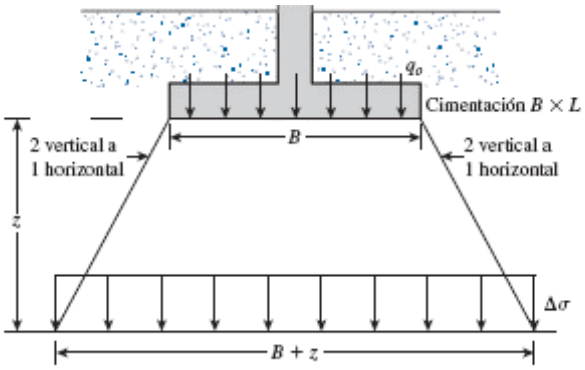


Anexo 1. Estratos de suelos utilizados para el uso de las distintas metodologías. Fuente: elaboración por los autores

Modelo hiperbólico

Tal como se observa en el anexo 1 se tienen los dos estratos de suelo los cuales fueron utilizados en el presente trabajo de grado, dichos estratos están conformados por arena y arcilla

respectivamente, al observar los estratos se puede observar una línea en el medio de la cimentación, dicha línea corresponde al eje que se trabajó en cada una de las metodologías aplicadas.

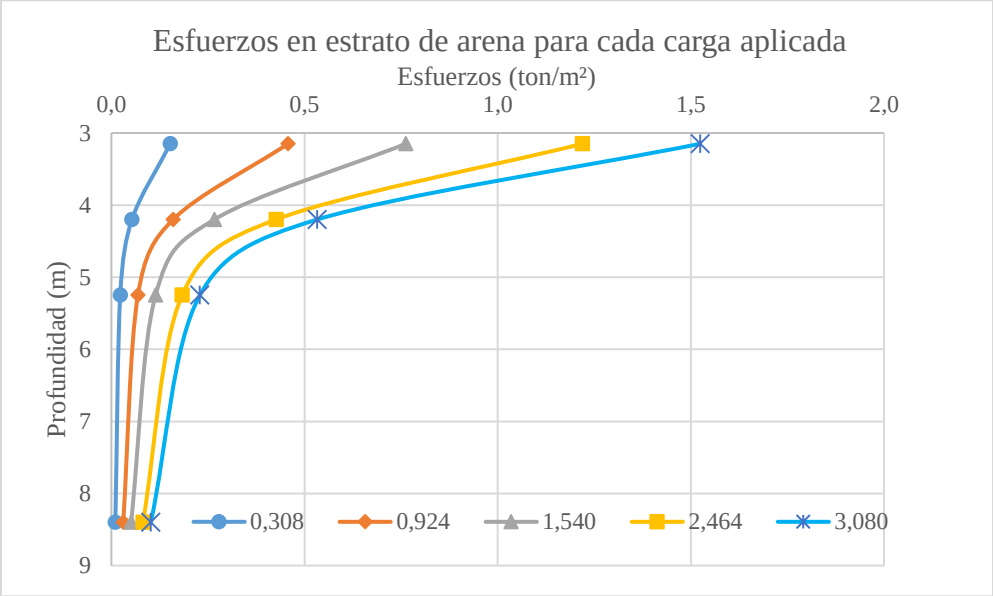


Anexo 2. Aplicación del método 2:1 para el cálculo de esfuerzos. Fuente: Fundamentos de la ingeniería en cimentaciones.

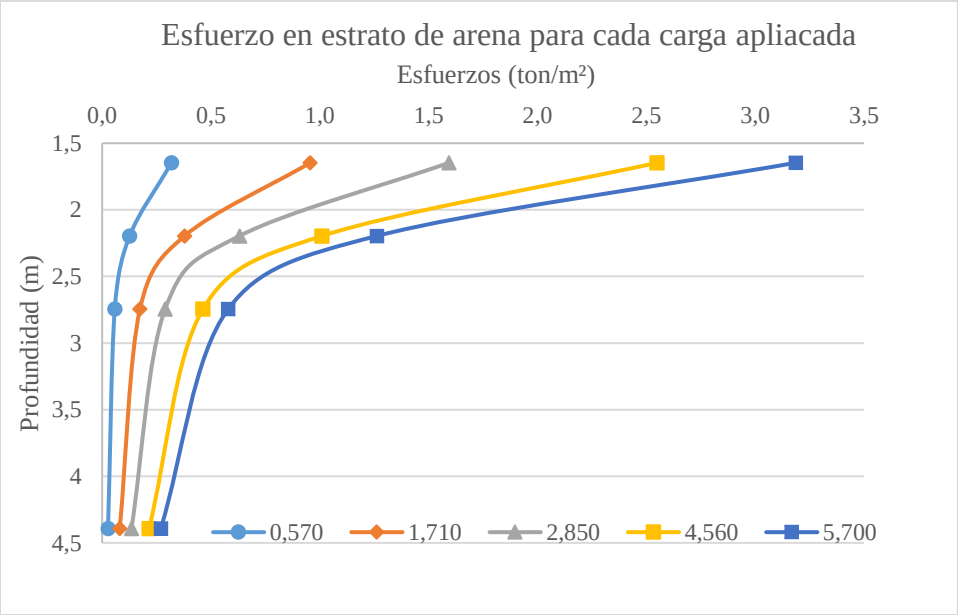
El anexo 2 muestra el método aplicado para obtener los esfuerzos que ocurren debajo de la cimentación, dicho método fue utilizado al aplicar el modelo hiperbólico, esto nos indica el valor de esfuerzo que se tiene en cada una de las zonas anteriormente mencionadas en el Anexo1, este cálculo de esfuerzo nos da un mejor entendimiento al momento de estimarel valor del módulo de Young, ya que como se menciona en el capítulo II a medida que los esfuerzos disminuyen el valor del módulo de Young tiene a aumentar ahora bien la ecuación para obtener los esfuerzos se muestran en el anexo 3 donde se aprecia cada uno de los datos que se tomaron en cuenta.

$$\Delta\sigma = \frac{q_o \times B \times L}{(B + z)(L + z)}$$

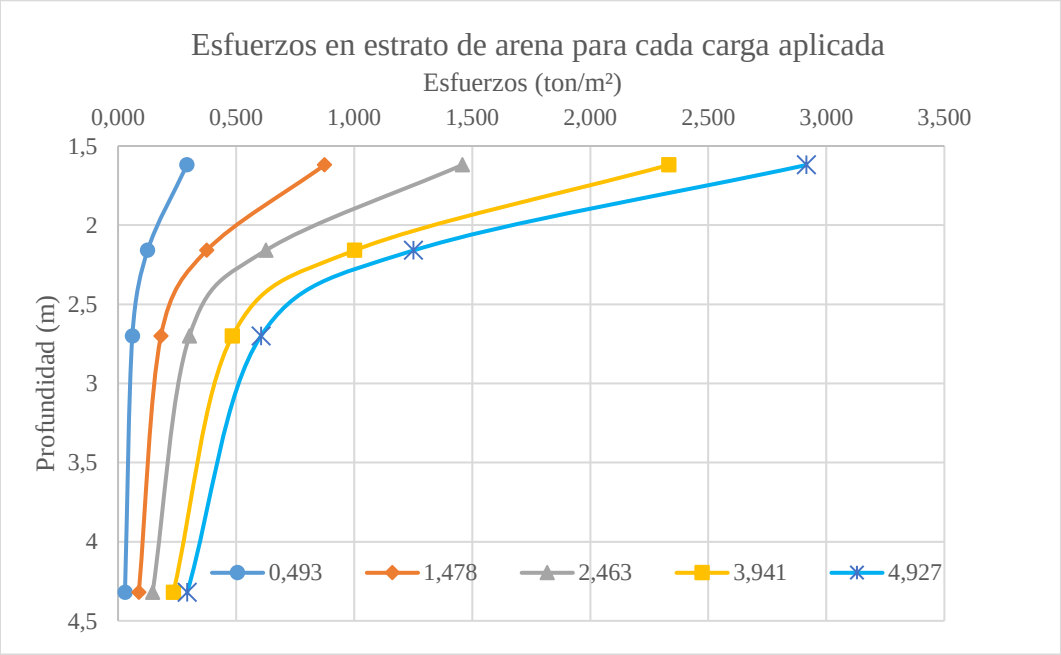
Anexo 3. Ecuación utilizada para el cálculo de esfuerzo. Fuente: Fundamentos de la ingeniería en cimentaciones.



Anexo 4. Esfuerzos para las distintas cargas aplicadas en el caso I. Fuente: elaborada por los autores.



Anexo 5. Esfuerzos para las distintas cargas aplicadas en el caso II. Fuente: elaborada por los autores.



Anexo 6. Esfuerzos para las distintas cargas aplicadas en el caso III. Fuente: elaborada por los autores.

Tal como se puede observar en los Anexos 4,5 y 6 se aprecian como varían los esfuerzos obtenidos aplicando el método de proyección 2:1 de manera gráfica según el tipo de carga a la cual se está sometiendo el suelo, dichos gráficos que se muestran pertenecen a los estratos de arena y arcilla aplicados en el modelo hiperbólico.

Una vez que se tiene lo necesario para estimarel módulo de Young utilizando el modelo hiperbólico utilizamos la información que se obtiene de la figura Nº 3 del capítulo II el cual indica el valor de índice de plasticidad (IP) esto es importante ya que dependiendo del valor con el cual se esté trabajando se obtiene un valor de beta (β) que se adecua para cada caso tal como se explica en el capítulo II y III, ya definido lo anterior mencionado se calculan los valores de esfuerzos que dependen de la curva de esfuerzo normalizado, como se mencionó en el anexo 1 se divide el esfuerzo para cada una de las zonas mencionadas, esto se realiza para poder realizar la

curva esfuerzo deformación para cada una de las zonas estudiadas y de esta forma obtener el módulo de Young según la carga que se aplicando sobre el estrato.

Deformacion Axial (ε)	Esfuerzo Normalizado	Esfuerzoo A1	Deformacion Axial (ε)	Esfuerzo A2	Deformacion Axial (ε)	Esfuerzo A3	Deformacion Axial (ε)	Esfuerzo A4	Deformacion Axial (ε)
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,0000	0
0,01	0,2500	0,2055	0,0100	0,6849	0,0100	1,3013	0,01	2,1916	0,01
0,02	0,4000	0,3287	0,0200	1,0958	0,0200	2,0821	0,02	3,5066	0,02
0,03	0,5000	0,4109	0,0300	1,3698	0,0300	2,6026	0,03	4,3833	0,03
0,04	0,5714	0,4696	0,0400	1,5655	0,0400	2,9744	0,04	5,0095	0,04
0,05	0,6250	0,5137	0,0500	1,7122	0,0500	3,2532	0,05	5,4791	0,05
0,06	0,6667	0,5479	0,0600	1,8264	0,0600	3,4701	0,06	5,8444	0,06
0,07	0,7000	0,5753	0,0700	1,9177	0,0700	3,6436	0,07	6,1366	0,07
0,08	0,7273	0,5977	0,0800	1,9924	0,0800	3,7856	0,08	6,3757	0,08
0,09	0,7500	0,6164	0,0900	2,0547	0,0900	3,9039	0,09	6,5749	0,09
0,1	0,7692	0,6322	0,1000	2,1073	0,1000	4,0040	0,1	6,7435	0,1
0,11	0,7857	0,6458	0,1100	2,1525	0,1100	4,0898	0,11	6,8880	0,11
0,12	0,8000	0,6575	0,1200	2,1916	0,1200	4,1641	0,12	7,0132	0,12
0,13	0,8125	0,6678	0,1300	2,2259	0,1300	4,2292	0,13	7,1228	0,13
0,14	0,8235	0,6768	0,1400	2,2561	0,1400	4,2866	0,14	7,2195	0,14
0,15	0,8333	0,6849	0,1500	2,2830	0,1500	4,3376	0,15	7,3055	0,15
0,16	0,8421	0,6921	0,1600	2,3070	0,1600	4,3833	0,16	7,3824	0,16
0,17	0,8500	0,6986	0,1700	2,3286	0,1700	4,4244	0,17	7,4516	0,17
0,18	0,8571	0,7045	0,1800	2,3482	0,1800	4,4615	0,18	7,5142	0,18
0,19	0,8636	0,7098	0,1900	2,3660	0,1900	4,4953	0,19	7,5711	0,19
0,2	0,8696	0,7147	0,2000	2,3822	0,2000	4,5262	0,2	7,6231	0,2
0,21	0,8750	0,7191	0,2100	2,3971	0,2100	4,5545	0,21	7,6707	0,21
0,22	0,8800	0,7232	0,2200	2,4108	0,2200	4,5805	0,22	7,7146	0,22
0,23	0,8846	0,7270	0,2300	2,4234	0,2300	4,6045	0,23	7,7550	0,23
0,24	0,8889	0,7305	0,2400	2,4352	0,2400	4,6268	0,24	7,7925	0,24

Anexo 7. Valores de esfuerzo para cada una de las zonas en estratos de arena. Fuente: elaboración propia.

Deformacion Axial (ε)	Esfuerzo Normalizado	Esfuerzos A1	Deformacion Axial (ε)	Esfuerzos A2	Deformacion Axial (ε)	Esfuerzos A3	Deformacion Axial (ε)	Esfuerzos A4	Deformacion Axial (ε)
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0	0,0000	0
0,01	0,2500	0,1173	0,0100	0,1564	0,0100	0,1955	0,01	0,3129	0,01
0,02	0,4000	0,1877	0,0200	0,2503	0,0200	0,3129	0,02	0,5006	0,02
0,03	0,5000	0,2347	0,0300	0,3129	0,0300	0,3911	0,03	0,6258	0,03
0,04	0,5714	0,2682	0,0400	0,3576	0,0400	0,4470	0,04	0,7152	0,04
0,05	0,6250	0,2933	0,0500	0,3911	0,0500	0,4889	0,05	0,7822	0,05
0,06	0,6667	0,3129	0,0600	0,4172	0,0600	0,5215	0,06	0,8343	0,06
0,07	0,7000	0,3285	0,0700	0,4380	0,0700	0,5475	0,07	0,8761	0,07
0,08	0,7273	0,3413	0,0800	0,4551	0,0800	0,5689	0,08	0,9102	0,08
0,09	0,7500	0,3520	0,0900	0,4693	0,0900	0,5866	0,09	0,9386	0,09
0,1	0,7692	0,3610	0,1000	0,4814	0,1000	0,6017	0,1	0,9627	0,1
0,11	0,7857	0,3688	0,1100	0,4917	0,1100	0,6146	0,11	0,9833	0,11
0,12	0,8000	0,3755	0,1200	0,5006	0,1200	0,6258	0,12	1,0012	0,12
0,13	0,8125	0,3813	0,1300	0,5084	0,1300	0,6355	0,13	1,0169	0,13
0,14	0,8235	0,3865	0,1400	0,5153	0,1400	0,6442	0,14	1,0307	0,14
0,15	0,8333	0,3911	0,1500	0,5215	0,1500	0,6518	0,15	1,0429	0,15
0,16	0,8421	0,3952	0,1600	0,5270	0,1600	0,6587	0,16	1,0539	0,16
0,17	0,8500	0,3989	0,1700	0,5319	0,1700	0,6649	0,17	1,0638	0,17
0,18	0,8571	0,4023	0,1800	0,5364	0,1800	0,6705	0,18	1,0727	0,18
0,19	0,8636	0,4053	0,1900	0,5404	0,1900	0,6755	0,19	1,0809	0,19
0,2	0,8696	0,4081	0,2000	0,5441	0,2000	0,6802	0,2	1,0883	0,2
0,21	0,8750	0,4107	0,2100	0,5475	0,2100	0,6844	0,21	1,0951	0,21
0,22	0,8800	0,4130	0,2200	0,5507	0,2200	0,6883	0,22	1,1013	0,22
0,23	0,8846	0,4152	0,2300	0,5536	0,2300	0,6919	0,23	1,1071	0,23
0,24	0,8889	0,4172	0,2400	0,5562	0,2400	0,6953	0,24	1,1125	0,24

Anexo 8. Valores de esfuerzo para cada una de las zonas en estratos de arcilla. Fuente: elaboración propia.

Una vez que se tienen las cargas definidas y los esfuerzos con respecto al valor de índice de plasticidad (IP) se procede a realizar el cálculo correspondiente para el módulo de young (E), este procedimiento se realiza para las cargas aplicadas en los estratos desuelo, en el anexo 9,10 y 11 se muestra a detalle los esfuerzos y deformaciones para obtener el módulo de Young según la carga aplicada.

Carga aplicada	1,242	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación(%)**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,6147**	**0,0898**	Valor a buscar	**0,0924**	**0,0007**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,6164	0,09	Limite Superior	1,3013	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,2149**	**0,0031**	Valor a buscar	**0,0412**	**0,000188**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,6849	0,01	Limite Superior	2,1916	0,01

Carga aplicada	3,727	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**1,844**	**0,0673**	Valor a buscar	**0,2771**	**0,0021**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	1,9177	0,07	Limite Superior	1,3013	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,6446**	**0,0094**	Valor a buscar	**0,1236**	**0,000564**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,6849	0,01	Limite Superior	2,1916	0,01

Carga aplicada	6,211	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**3,073**	**9,1246**	Valor a buscar	**0,4618**	**0,0035**
Límite Inferior	0,8118	2,41	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,0000	0	Limite Superior	1,3013	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**1,0744**	**0,0196**	Valor a buscar	**0,2059**	**0,000940**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	1,0958	0,02	Limite Superior	2,1916	0,01

Carga aplicada	9,938	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**4,9175**	**14,5994**	Valor a buscar	**0,7388**	**0,0057**
Límite Inferior	0,8118	2,41	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,0000	0	Limite Superior	1,3013	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**1,7190**	**0,0565**	Valor a buscar	**0,3295**	**0,001503**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	1,8264	0,06	Limite Superior	2,1916	0,01

Carga aplicada	12,422	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**6,1469**	**18,2493**	Valor a buscar	**0,9235**	**0,0071**
Límite Inferior	0,8118	2,41	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,0000	0	Limite Superior	1,3013	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**2,1488**	**0,1097**	Valor a buscar	**0,4119**	**0,001879**
Límite Inferior	0,6849	0,01	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	2,1525	0,11	Limite Superior	2,1916	0,01

Anexo 9. Valores de esfuerzo y deformación en estrato de arena para caso I. Fuente: elaboración propia.

Carga aplicada	0,570	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,3186**	**0,0890**	Valor a buscar	**0,0579**	**0,0009**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,3223	0,09	Limite Superior	0,6804	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,1262**	**0,0035**	Valor a buscar	**0,0269**	**0,000235**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,3581	0,01	Limite Superior	1,1459	0,01

Carga aplicada	1,710	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,956**	**0,0667**	Valor a buscar	**0,1737**	**0,0026**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	1,0027	0,07	Limite Superior	0,6804	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,3787**	**0,0132**	Valor a buscar	**0,0808**	**0,000705**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,5730	0,02	Limite Superior	1,1459	0,01

Carga aplicada	2,850	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**1,593**	**9,0462**	Valor a buscar	**0,2895**	**0,0043**
Límite Inferior	0,4244	2,41	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,0000	0	Limite Superior	0,6804	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,6311**	**0,0264**	Valor a buscar	**0,1347**	**0,001175**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,7162	0,03	Limite Superior	1,1459	0,01

Carga aplicada	4,560	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**2,5490**	**14,4739**	Valor a buscar	**0,4632**	**0,0068**
Límite Inferior	0,4244	2,41	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,0000	0	Limite Superior	0,6804	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**1,0098**	**0,0775**	Valor a buscar	**0,2155**	**0,001881**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	1,0417	0,08	Limite Superior	1,1459	0,01

Carga aplicada	5,700	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**3,1863**	**18,0923**	Valor a buscar	**0,5790**	**0,0085**
Límite Inferior	0,4244	2,41	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,0000	0	Limite Superior	0,6804	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**1,2623**	**0,2253**	Valor a buscar	**0,2694**	**0,002351**
Límite Inferior	1,1638	0,13	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	1,2671	0,23	Limite Superior	1,1459	0,01

Anexo 10. Valores de esfuerzo y deformación en estrato de arena para caso II. Fuente: elaboración propia.

Carga aplicada	0,493	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,2916**	**0,0878**	Valor a buscar	**0,0605**	**0,0010**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,2990	0,09	Limite Superior	0,6312	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,1252**	**0,0038**	Valor a buscar	**0,0293**	**0,000276**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,3322	0,01	Limite Superior	1,0631	0,01

Carga aplicada	1,478	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,875**	**0,0592**	Valor a buscar	**0,1816**	**0,0029**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,8859	0,06	Limite Superior	0,6312	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,3755**	**0,0141**	Valor a buscar	**0,0879**	**0,000827**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,5316	0,02	Limite Superior	1,0631	0,01

Carga aplicada	2,463	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**1,458**	**8,9236**	Valor a buscar	**0,3027**	**0,0048**
Límite Inferior	0,3938	2,41	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,0000	0	Limite Superior	0,6312	0,01

A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**0,6258**	**0,0283**	Valor a buscar	**0,1465**	**0,001378**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,6644	0,03	Limite Superior	1,0631	0,01

Carga aplicada	3,941	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**2,3328**	**14,2777**	Valor a buscar	**0,4844**	**0,0077**
Límite Inferior	0,3938	2,41	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,0000	0	Limite Superior	0,6312	0,01

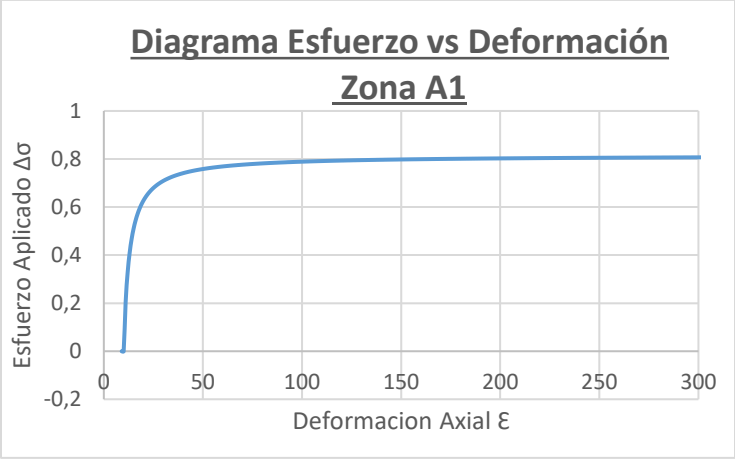
A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**1,0013**	**0,0980**	Valor a buscar	**0,2344**	**0,002205**
Límite Inferior	0,0000	0	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	1,0222	0,1	Limite Superior	1,0631	0,01

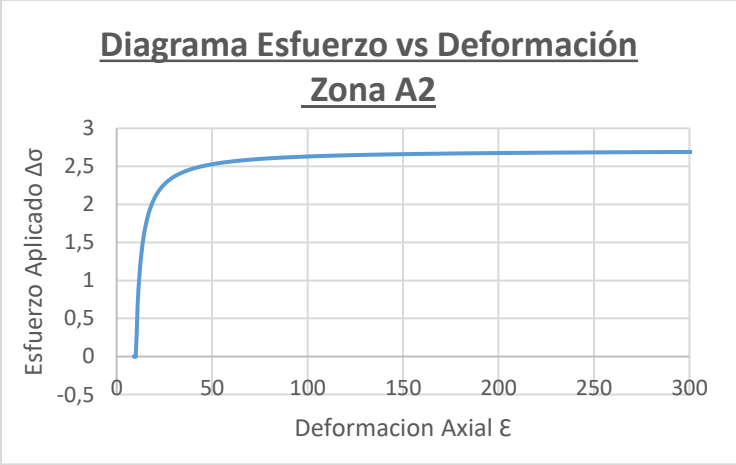
Carga aplicada	4,927	**ton/m²**			
A1	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A3**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**2,9160**	**17,8472**	Valor a buscar	**0,6055**	**0,0096**
Límite Inferior	0,3938	2,41	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	0,0000	0	Limite Superior	0,6312	0,01

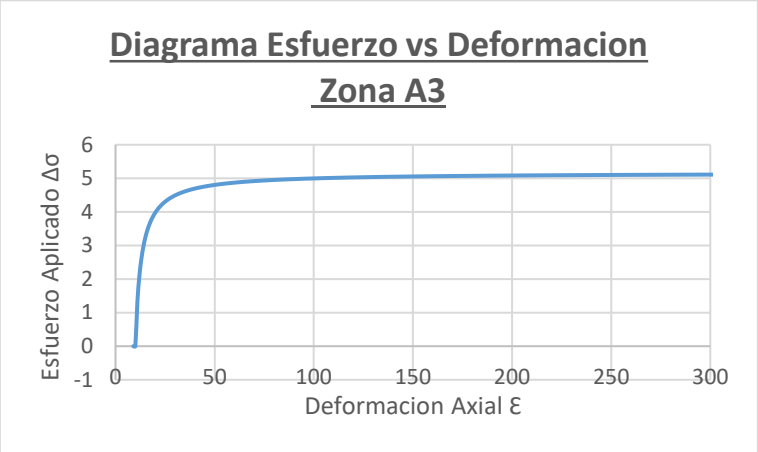
A2	**Esfuerzos**	**Deformación**	**A4**	**Esfuerzos**	**Deformación**
Valor a buscar	**1,2516**	**0,4866**	Valor a buscar	**0,2931**	**0,002757**
Límite Inferior	1,2340	0,39	Límite Inferior	0,0000	0
Limite Superior	1,2522	0,49	Limite Superior	1,0631	0,01

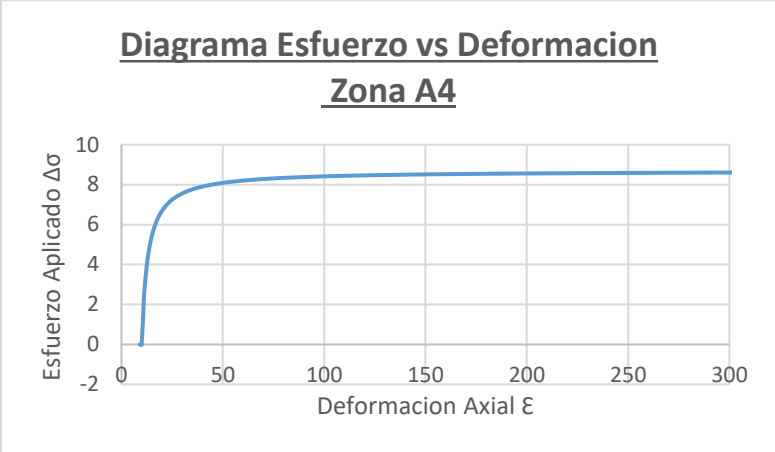
Anexo 11. Valores de esfuerzo y deformación en estrato de arena para caso III. Fuente: elaboración propia.

Al observar los anexos anteriores de los valores de esfuerzo y deformación se obtienen los diagramas para cada una de las zonas que se están utilizando, estos diagramas se pueden observar en el anexo 12.









Anexo 12. Diagrama de esfuerzos vs deformación de las zonas A1, A2, A3 y A4. Para el estudio del estrato de Arena.

Método basado en la teoría elástica.

Para la aplicación del método basado en la teoría elástica como bien se menciona este método se basa en múltiples iteraciones las cuales son necesarios para poder obtener los valores de asentamientos en los estratos de suelo que en el presente trabajo de grado son arena y arcilla, dichos valores de iteración se obtienen de distintas tablas las cuales necesitan de valores previamente calculados para poder obtener los valores que se requieren.

Como se mencionó anteriormente para poder obtener los valores de iteración se necesita de valores previos los cuales son necesarios para poder hacer uso de las tablas de iteración, dichas tablas se encuentran en el libro de texto de fundamentos de ingeniería en cimentaciones algunas de las ecuaciones son las siguientes

$$\boldsymbol{Is = F1 + \frac{1-2\mu s}{1-\mu s}} \quad (7) \qquad \boldsymbol{F1 = \frac{1}{\pi} * (A0 + A1)} \quad (8)$$

$$F2 = \frac{n'}{2\pi} * tan^{-1}A2 \quad (9) \qquad A0 = m` * ln\frac{(1+\sqrt{m`^2+1})\sqrt{m`^2+n`^2}}{m`(1+\sqrt{m`^2+n`^2+1})} \quad (10)$$

$$A1 = ln\frac{(m`+\sqrt{m`^2+1})\sqrt{1+n`^2}}{m`+\sqrt{m`^2+n`^2+1}} \quad (11) \qquad A2 = \frac{m`}{n`\sqrt{m`^2+n`^2+1}} \quad (12)$$

Es importante mencionar que las ecuaciones mostradas se pueden obtener utilizando tablas de iteración como también se puede obtener los resultados utilizando las mencionadas ecuaciones siempre y cuando se tengan los datos que se necesitan para aplicar dicha ecuación.

	m'									
n'	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.25	0.014	0.013	0.012	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.010	0.010
0.50	0.049	0.046	0.044	0.042	0.041	0.040	0.038	0.038	0.037	0.037
0.75	0.095	0.090	0.087	0.084	0.082	0.080	0.077	0.076	0.074	0.074
1.00	0.142	0.138	0.134	0.130	0.127	0.125	0.121	0.118	0.116	0.115
1.25	0.186	0.183	0.179	0.176	0.173	0.170	0.165	0.161	0.158	0.157
1.50	0.224	0.224	0.222	0.219	0.216	0.213	0.207	0.203	0.199	0.197
1.75	0.257	0.259	0.259	0.258	0.255	0.253	0.247	0.242	0.238	0.235
2.00	0.285	0.290	0.292	0.292	0.291	0.289	0.284	0.279	0.275	0.271
2.25	0.309	0.317	0.321	0.323	0.323	0.322	0.317	0.313	0.308	0.305
2.50	0.330	0.341	0.347	0.350	0.351	0.351	0.348	0.344	0.340	0.336
2.75	0.348	0.361	0.369	0.374	0.377	0.378	0.377	0.373	0.369	0.365
3.00	0.363	0.379	0.389	0.396	0.400	0.402	0.402	0.400	0.396	0.392
3.25	0.376	0.394	0.406	0.415	0.420	0.423	0.426	0.424	0.421	0.418
3.50	0.388	0.408	0.422	0.431	0.438	0.442	0.447	0.447	0.444	0.441
3.75	0.399	0.420	0.436	0.447	0.454	0.460	0.467	0.458	0.466	0.464
4.00	0.408	0.431	0.448	0.460	0.469	0.476	0.484	0.487	0.486	0.484
4.25	0.417	0.440	0.458	0.472	0.481	0.484	0.495	0.514	0.515	0.515
4.50	0.424	0.450	0.469	0.484	0.495	0.503	0.516	0.521	0.522	0.522
4.75	0.431	0.458	0.478	0.494	0.506	0.515	0.530	0.536	0.539	0.539
5.00	0.437	0.465	0.487	0.503	0.516	0.526	0.543	0.551	0.554	0.554
5.25	0.443	0.472	0.494	0.512	0.526	0.537	0.555	0.564	0.568	0.569
5.50	0.448	0.478	0.501	0.520	0.534	0.546	0.566	0.576	0.581	0.584
5.75	0.453	0.483	0.508	0.527	0.542	0.555	0.576	0.588	0.594	0.597
6.00	0.457	0.489	0.514	0.534	0.550	0.563	0.585	0.598	0.606	0.609
6.25	0.461	0.493	0.519	0.540	0.557	0.570	0.594	0.609	0.617	0.621
6.50	0.465	0.498	0.524	0.546	0.563	0.577	0.603	0.618	0.627	0.632
6.75	0.468	0.502	0.529	0.551	0.569	0.584	0.610	0.627	0.637	0.643
7.00	0.471	0.506	0.533	0.556	0.575	0.590	0.618	0.635	0.646	0.653
7.25	0.474	0.509	0.538	0.561	0.580	0.596	0.625	0.643	0.655	0.662
7.50	0.477	0.513	0.541	0.565	0.585	0.601	0.631	0.650	0.663	0.671
7.75	0.480	0.516	0.545	0.569	0.589	0.606	0.637	0.658	0.671	0.680
8.00	0.482	0.519	0.549	0.573	0.594	0.611	0.643	0.664	0.678	0.688
8.25	0.485	0.522	0.552	0.577	0.598	0.615	0.648	0.670	0.685	0.695
8.50	0.487	0.524	0.555	0.580	0.601	0.619	0.653	0.676	0.692	0.703
8.75	0.489	0.527	0.558	0.583	0.605	0.623	0.658	0.682	0.698	0.710
9.00	0.491	0.529	0.560	0.587	0.609	0.627	0.663	0.687	0.705	0.716
9.25	0.493	0.531	0.563	0.589	0.612	0.631	0.667	0.693	0.710	0.723
9.50	0.495	0.533	0.565	0.592	0.615	0.634	0.671	0.697	0.716	0.719
9.75	0.496	0.536	0.568	0.595	0.618	0.638	0.675	0.702	0.721	0.735
10.00	0.498	0.537	0.570	0.597	0.621	0.641	0.679	0.707	0.726	0.740
20.00	0.529	0.575	0.614	0.647	0.677	0.702	0.756	0.797	0.830	0.858
50.00	0.548	0.598	0.640	0.678	0.711	0.740	0.803	0.853	0.895	0.931
100.00	0.555	0.605	0.649	0.688	0.722	0.753	0.819	0.872	0.918	0.956

Anexo 13. Variación de F1con m` y n`. Fuente: Fundamento de la ingeniería en cimentaciones.

	m'									
n'	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	25.0	50.0	100.0
0.25	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
0.50	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
0.75	0.073	0.073	0.072	0.072	0.072	0.072	0.071	0.071	0.071	0.071
1.00	0.114	0.113	0.112	0.112	0.112	0.111	0.111	0.110	0.110	0.110
1.25	0.155	0.154	0.153	0.152	0.152	0.151	0.151	0.150	0.150	0.150
1.50	0.195	0.194	0.192	0.191	0.190	0.190	0.189	0.188	0.188	0.188
1.75	0.233	0.232	0.229	0.228	0.227	0.226	0.225	0.223	0.223	0.223
2.00	0.269	0.267	0.264	0.262	0.261	0.260	0.259	0.257	0.256	0.256
2.25	0.302	0.300	0.296	0.294	0.293	0.291	0.291	0.287	0.287	0.287
2.50	0.333	0.331	0.327	0.324	0.322	0.321	0.320	0.316	0.315	0.315
2.75	0.362	0.359	0.355	0.352	0.350	0.348	0.347	0.343	0.342	0.342
3.00	0.389	0.386	0.382	0.378	0.376	0.374	0.373	0.368	0.367	0.367
3.25	0.415	0.412	0.407	0.403	0.401	0.399	0.397	0.391	0.390	0.390
3.50	0.438	0.435	0.430	0.427	0.424	0.421	0.420	0.413	0.412	0.411
3.75	0.461	0.458	0.453	0.449	0.446	0.443	0.441	0.433	0.432	0.432
4.00	0.482	0.479	0.474	0.470	0.466	0.464	0.462	0.453	0.451	0.451
4.25	0.516	0.496	0.484	0.473	0.471	0.471	0.470	0.468	0.462	0.460
4.50	0.520	0.517	0.513	0.508	0.505	0.502	0.499	0.489	0.487	0.487
4.75	0.537	0.535	0.530	0.526	0.523	0.519	0.517	0.506	0.504	0.503
5.00	0.554	0.552	0.548	0.543	0.540	0.536	0.534	0.522	0.519	0.519
5.25	0.569	0.568	0.564	0.560	0.556	0.553	0.550	0.537	0.534	0.534
5.50	0.584	0.583	0.579	0.575	0.571	0.568	0.585	0.551	0.549	0.548
5.75	0.597	0.597	0.594	0.590	0.586	0.583	0.580	0.565	0.583	0.562
6.00	0.611	0.610	0.608	0.604	0.601	0.598	0.595	0.579	0.576	0.575
6.25	0.623	0.623	0.621	0.618	0.615	0.611	0.608	0.592	0.589	0.588
6.50	0.635	0.635	0.634	0.631	0.628	0.625	0.622	0.605	0.601	0.600
6.75	0.646	0.647	0.646	0.644	0.641	0.637	0.634	0.617	0.613	0.612
7.00	0.656	0.658	0.658	0.656	0.653	0.650	0.647	0.628	0.624	0.623
7.25	0.666	0.669	0.669	0.668	0.665	0.662	0.659	0.640	0.635	0.634
7.50	0.676	0.679	0.680	0.679	0.676	0.673	0.670	0.651	0.646	0.645
7.75	0.685	0.688	0.690	0.689	0.687	0.684	0.681	0.661	0.656	0.655
8.00	0.694	0.697	0.700	0.700	0.698	0.695	0.692	0.672	0.666	0.665
8.25	0.702	0.706	0.710	0.710	0.708	0.705	0.703	0.682	0.676	0.675
8.50	0.710	0.714	0.719	0.719	0.718	0.715	0.713	0.692	0.686	0.684
8.75	0.717	0.722	0.727	0.728	0.727	0.725	0.723	0.701	0.695	0.693
9.00	0.725	0.730	0.736	0.737	0.736	0.735	0.732	0.710	0.704	0.702
9.25	0.731	0.737	0.744	0.746	0.745	0.744	0.742	0.719	0.713	0.711
9.50	0.738	0.744	0.752	0.754	0.754	0.753	0.751	0.728	0.721	0.719
9.75	0.744	0.751	0.759	0.762	0.762	0.761	0.759	0.737	0.729	0.727
10.00	0.750	0.758	0.766	0.770	0.770	0.770	0.768	0.745	0.738	0.735
20.00	0.878	0.896	0.925	0.945	0.959	0.969	0.977	0.982	0.965	0.957
50.00	0.962	0.989	1.034	1.070	1.100	1.125	1.146	1.265	1.279	1.261
100.00	0.990	1.020	1.072	1.114	1.150	1.182	1.209	1.408	1.489	1.499

Anexo 14. Variación de F1con m` y n` (continuación). Fuente: Fundamento de la ingeniería en cimentaciones.

	m'									
n'	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.25	0.049	0.050	0.051	0.051	0.051	0.052	0.052	0.052	0.052	0.052
0.50	0.074	0.077	0.080	0.081	0.083	0.084	0.086	0.086	0.0878	0.087
0.75	0.083	0.089	0.093	0.097	0.099	0.101	0.104	0.106	0.107	0.108
1.00	0.083	0.091	0.098	0.102	0.106	0.109	0.114	0.117	0.119	0.120
1.25	0.080	0.089	0.096	0.102	0.107	0.111	0.118	0.122	0.125	0.127
1.50	0.075	0.084	0.093	0.099	0.105	0.110	0.118	0.124	0.128	0.130
1.75	0.069	0.079	0.088	0.095	0.101	0.107	0.117	0.123	0.128	0.131
2.00	0.064	0.074	0.083	0.090	0.097	0.102	0.114	0.121	0.127	0.131
2.25	0.059	0.069	0.077	0.085	0.092	0.098	0.110	0.119	0.125	0.130
2.50	0.055	0.064	0.073	0.080	0.087	0.093	0.106	0.115	0.122	0.127
2.75	0.051	0.060	0.068	0.076	0.082	0.089	0.102	0.111	0.119	0.125
3.00	0.048	0.056	0.064	0.071	0.078	0.084	0.097	0.108	0.116	0.122
3.25	0.045	0.053	0.060	0.067	0.074	0.080	0.093	0.104	0.112	0.119
3.50	0.042	0.050	0.057	0.064	0.070	0.076	0.089	0.100	0.109	0.116
3.75	0.040	0.047	0.054	0.060	0.067	0.073	0.086	0.096	0.105	0.113
4.00	0.037	0.044	0.051	0.057	0.063	0.069	0.082	0.093	0.102	0.110
4.25	0.036	0.042	0.049	0.055	0.061	0.066	0.079	0.090	0.099	0.107
4.50	0.034	0.040	0.046	0.052	0.058	0.063	0.076	0.086	0.096	0.104
4.75	0.032	0.038	0.044	0.050	0.055	0.061	0.073	0.083	0.093	0.101
5.00	0.031	0.036	0.042	0.048	0.053	0.058	0.070	0.080	0.090	0.098
5.25	0.029	0.035	0.040	0.046	0.051	0.056	0.067	0.078	0.087	0.095
5.50	0.028	0.033	0.039	0.044	0.049	0.054	0.065	0.075	0.084	0.092
5.75	0.027	0.032	0.037	0.042	0.047	0.052	0.063	0.073	0.082	0.090
6.00	0.026	0.031	0.036	0.040	0.045	0.050	0.060	0.070	0.079	0.087
6.25	0.025	0.030	0.034	0.039	0.044	0.048	0.058	0.068	0.077	0.085
6.50	0.024	0.029	0.033	0.038	0.042	0.046	0.056	0.066	0.075	0.083
6.75	0.023	0.028	0.032	0.036	0.041	0.045	0.055	0.064	0.073	0.080
7.00	0.022	0.027	0.031	0.035	0.039	0.043	0.053	0.062	0.071	0.078
7.25	0.022	0.026	0.030	0.034	0.038	0.042	0.051	0.060	0.069	0.076
7.50	0.021	0.025	0.029	0.033	0.037	0.041	0.050	0.059	0.067	0.074
7.75	0.020	0.024	0.028	0.032	0.036	0.039	0.048	0.057	0.065	0.072
8.00	0.020	0.023	0.027	0.031	0.035	0.038	0.047	0.055	0.063	0.071
8.25	0.019	0.023	0.026	0.030	0.034	0.037	0.046	0.054	0.062	0.069
8.50	0.018	0.022	0.026	0.029	0.033	0.036	0.045	0.053	0.060	0.067
8.75	0.018	0.021	0.025	0.028	0.032	0.035	0.043	0.051	0.059	0.066
9.00	0.017	0.021	0.024	0.028	0.031	0.034	0.042	0.050	0.057	0.064
9.25	0.017	0.020	0.024	0.027	0.030	0.033	0.041	0.049	0.056	0.063
9.50	0.017	0.020	0.023	0.026	0.029	0.033	0.040	0.048	0.055	0.061
9.75	0.016	0.019	0.023	0.026	0.029	0.032	0.039	0.047	0.054	0.060
10.00	0.016	0.019	0.022	0.025	0.028	0.031	0.038	0.046	0.052	0.059
20.00	0.008	0.010	0.011	0.013	0.014	0.016	0.020	0.024	0.027	0.031
50.00	0.003	0.004	0.004	0.005	0.006	0.006	0.008	0.010	0.011	0.013
100.00	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.005	0.006	0.006

Anexo 15. Variación de F2con m` y n`. Fuente: Fundamento de la ingeniería en cimentaciones.

	m'									
n'	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	25.0	50.0	100.0
0.25	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053	0.053
0.50	0.087	0.087	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088
0.75	0.109	0.109	0.109	0.110	0.110	0.110	0.110	0.111	0.111	0.111
1.00	0.121	0.122	0.123	0.123	0.124	0.124	0.124	0.125	0.125	0.125
1.25	0.128	0.130	0.131	0.132	0.132	0.133	0.133	0.134	0.134	0.134
1.50	0.132	0.134	0.136	0.137	0.138	0.138	0.139	0.140	0.140	0.140
1.75	0.134	0.136	0.138	0.140	0.141	0.142	0.142	0.144	0.144	0.145
2.00	0.134	0.136	0.139	0.141	0.143	0.144	0.145	0.147	0.147	0.148
2.25	0.133	0.136	0.140	0.142	0.144	0.145	0.146	0.149	0.150	0.150
2.50	0.132	0.135	0.139	0.142	0.144	0.146	0.147	0.151	0.151	0.151
2.75	0.130	0.133	0.138	0.142	0.144	0.146	0.147	0.152	0.152	0.153
3.00	0.127	0.131	0.137	0.141	0.144	0.145	0.147	0.152	0.153	0.154
3.25	0.125	0.129	0.135	0.140	0.143	0.145	0.147	0.153	0.154	0.154
3.50	0.122	0.126	0.133	0.138	0.142	0.144	0.146	0.153	0.155	0.155
3.75	0.119	0.124	0.131	0.137	0.141	0.143	0.145	0.154	0.155	0.155
4.00	0.116	0.121	0.129	0.135	0.139	0.142	0.145	0.154	0.155	0.156
4.25	0.113	0.119	0.127	0.133	0.138	0.141	0.144	0.154	0.156	0.156
4.50	0.110	0.116	0.125	0.131	0.136	0.140	0.143	0.154	0.156	0.156
4.75	0.107	0.113	0.123	0.130	0.135	0.139	0.142	0.154	0.156	0.157
5.00	0.105	0.111	0.120	0.128	0.133	0.137	0.140	0.154	0.156	0.157
5.25	0.102	0.108	0.118	0.126	0.131	0.136	0.139	0.154	0.156	0.157
5.50	0.099	0.106	0.116	0.124	0.130	0.134	0.138	0.154	0.156	0.157
5.75	0.097	0.103	0.113	0.122	0.128	0.133	0.136	0.154	0.157	0.157
6.00	0.094	0.101	0.111	0.120	0.126	0.131	0.135	0.153	0.157	0.157
6.25	0.092	0.098	0.109	0.118	0.124	0.129	0.134	0.153	0.157	0.158
6.50	0.090	0.096	0.107	0.116	0.122	0.128	0.132	0.153	0.157	0.158
6.75	0.087	0.094	0.105	0.114	0.121	0.126	0.131	0.153	0.157	0.158
7.00	0.085	0.092	0.103	0.112	0.119	0.125	0.129	0.152	0.157	0.158
7.25	0.083	0.090	0.101	0.110	0.117	0.123	0.128	0.152	0.157	0.158
7.50	0.081	0.088	0.099	0.108	0.115	0.121	0.126	0.152	0.156	0.158
7.75	0.079	0.086	0.097	0.106	0.114	0.120	0.125	0.151	0.156	0.158
8.00	0.077	0.084	0.095	0.104	0.112	0.118	0.124	0.151	0.156	0.158
8.25	0.076	0.082	0.093	0.102	0.110	0.117	0.122	0.150	0.156	0.158
8.50	0.074	0.080	0.091	0.101	0.108	0.115	0.121	0.150	0.156	0.158
8.75	0.072	0.078	0.089	0.099	0.107	0.114	0.119	0.150	0.156	0.158
9.00	0.071	0.077	0.088	0.097	0.105	0.112	0.118	0.149	0.156	0.158
9.25	0.069	0.075	0.086	0.096	0.104	0.110	0.116	0.149	0.156	0.158
9.50	0.068	0.074	0.085	0.094	0.102	0.109	0.115	0.148	0.156	0.158
9.75	0.066	0.072	0.083	0.092	0.100	0.107	0.113	0.148	0.156	0.158
10.00	0.065	0.071	0.082	0.091	0.099	0.106	0.112	0.147	0.156	0.158
20.00	0.035	0.039	0.046	0.053	0.059	0.065	0.071	0.124	0.148	0.156
50.00	0.014	0.016	0.019	0.022	0.025	0.028	0.031	0.071	0.113	0.142
100.00	0.007	0.008	0.010	0.011	0.013	0.014	0.016	0.039	0.071	0.113

Anexo 16. Variación de F2con m` y n` (continuación). Fuente: Fundamento de la ingeniería en cimentaciones.

Una vez que se obtienen los valores de F1 y F2 se calculan los valores de Is y If donde Is se puede obtener utilizando la ecuación 3, para el caso de If se puede obtener de la misma forma

que F1 y F2 es decir que dicho valor se obtiene mediante iteraciones que dependen de distintos datos, dicha tabla se muestra a continuación.

		B/L		
μ_s	D_f/B	0.2	0.5	1.0
0.3	0.2	0.95	0.93	0.90
	0.4	0.90	0.86	0.81
	0.6	0.85	0.80	0.74
	1.0	0.78	0.71	0.65
0.4	0.2	0.97	0.96	0.93
	0.4	0.93	0.89	0.85
	0.6	0.89	0.84	0.78
	1.0	0.82	0.75	0.69
0.5	0.2	0.99	0.98	0.96
	0.4	0.95	0.93	0.89
	0.6	0.92	0.87	0.82
	1.0	0.85	0.79	0.72

Anexo 17. Variación de If con Df/B, B/L y μ. Fuente: Fundamento de la ingeniería en cimentaciones.

Una vez que se tienen todos los valores necesarios se procede a estimarel valor de asentamiento utilizando la ecuación mencionada en el capítulo II y de esta manera obtener los valores de asentamientos en los estratos de arena y arcilla y realizar las comparaciones correspondientes tal como se mostraron anteriormente en el capítulo V.

Método de Schmertmann uso del factor de fluencia.

Al referirnos a los suelos arenosos el presente trabajo de grado se mencionó el método propuesto por Schmertmann, ya que muestra una forma distinta al modelo implementado (modelo hiperbólico), tal como se puedo observar en el capítulo V del presente trabajo se observó que los resultados de asentamientos obtenidos son similares.

En el capítulo V se observó el gráfico de factor de influencia de la misma forma se observan los valores obtenidos al representar el estrato de suelo arenoso en 4 capas tal como se ha

desarrollado a lo largo del presente trabajo grado, sim embargo para realizar dicho gráfico se debieron tomar en cuenta algunas consideraciones, estas se mencionan en el capítulo III sim embargo en el siguiente anexo se muestra a detalle para la elaboración de factor de fluencia.

Tal como se observó en el capítulo II la ecuación 3muestra cómo se calcula el asentamiento una vez que se calculan los distintos valores que se muestran en dicha ecuación, por lo que se mostraran a detalle cuales son los valores mencionados, así como su estructura.

Se sabe que la ecuación 4 se representa de la siguiente forma.

$$\boldsymbol{Se = C1C2(\overline{q} - q)\sum_{0}^{z2}\frac{Iz}{Es}\Delta z} \quad (4)$$

Pero como se obtienen alguno de los valores que se muestran en dicha ecuación.

$$\boldsymbol{C1 = 1 + 0,5(\frac{q}{\overline{q}-q})} \quad (13) \qquad \boldsymbol{C2 = 1 + 0,2\log(\frac{T}{0,1})} \quad (14)$$

$$\boldsymbol{Iz = 0,5 + 0,1\sqrt{\frac{\overline{q}-q}{qz1}}} \quad (15)$$

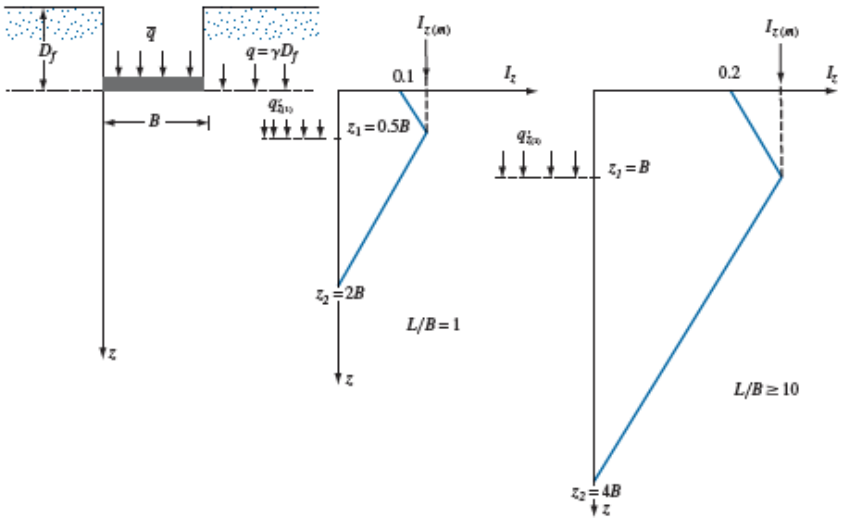
Se debe aclarar que:

$\boldsymbol{\overline{q}}$**:** representa el esfuerzo a nivel de la cimentación.

$\boldsymbol{q}$**:** es el esfuerzo efectivo en la base de la cimentación.

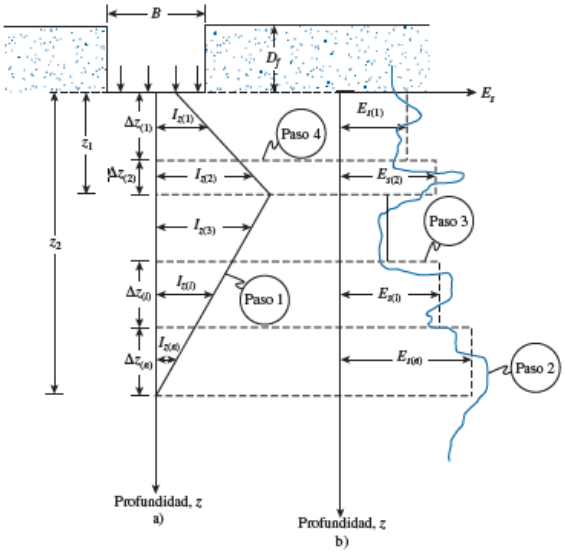
$\boldsymbol{qz1}$**:** representa el esfuerzo efectivo a una profundidad de z1 antes de la construcción de la cimentación.

Al observar el capítulo III se menciona cuáles son los pasos para poder estimarel asentamiento, sin embargo, se debe tener atención con respecto a los valores de L/B ya que la variación del factor de influencia es distinta tal como se observa en el anexo 18.

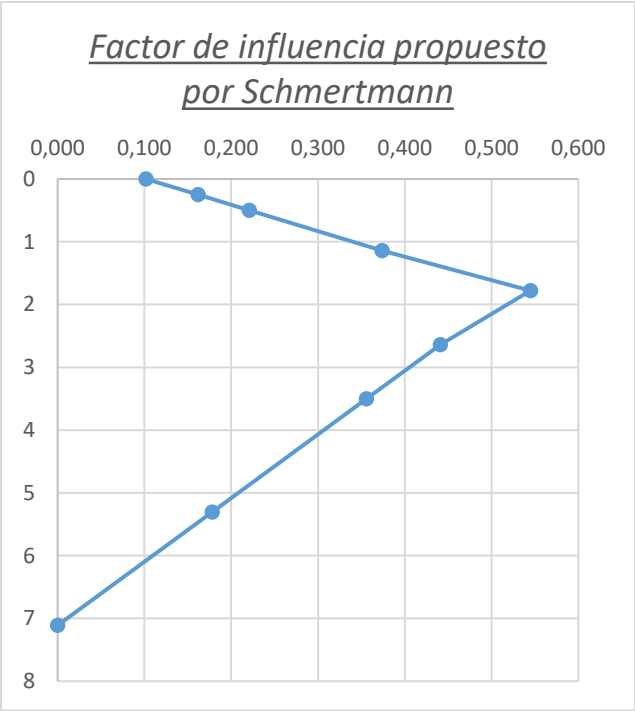


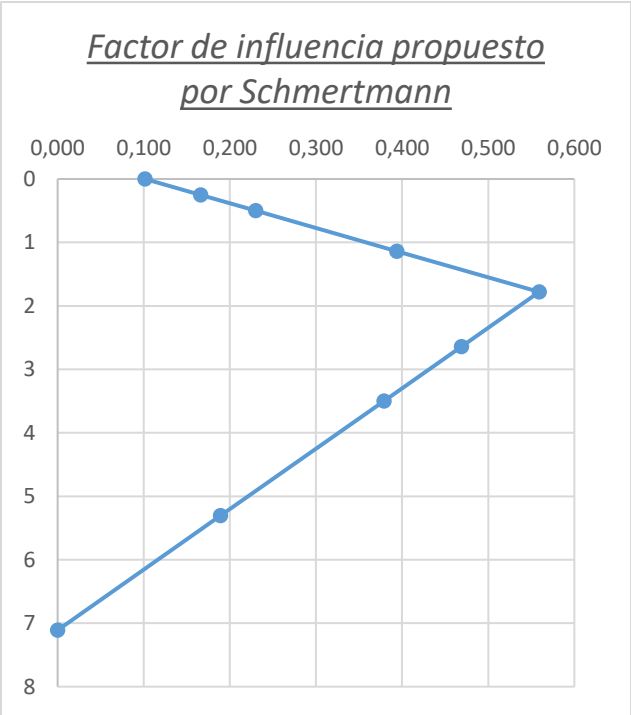
Anexo 18. Variación del factor de influencia de la deformación unitaria con respecto a la profundidad y L/B. Fuente: Fundamento de la ingeniería en cimentaciones.

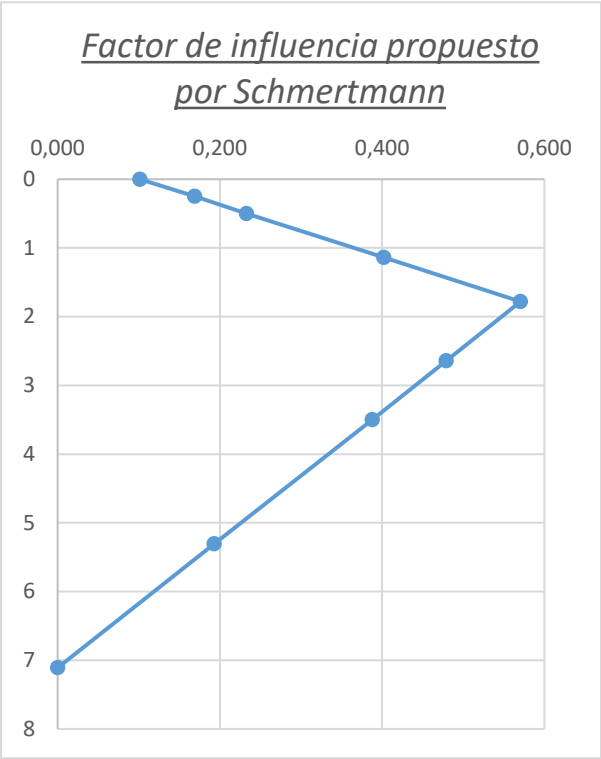
Una vez comprendida la variación del factor de fluencia se precede a realizar el cálculo correspondiente para obtener el valor de asentamiento en el estrato de arena, al contar con todos los datos necesarios se aplica la ecuación correspondiente para obtener dicho asentamiento, por lo que a modo de detalle se observa el anexo 19 en el cual se muestra a detalle cómo se obtiene el asentamiento utilizando el factor de influencia.

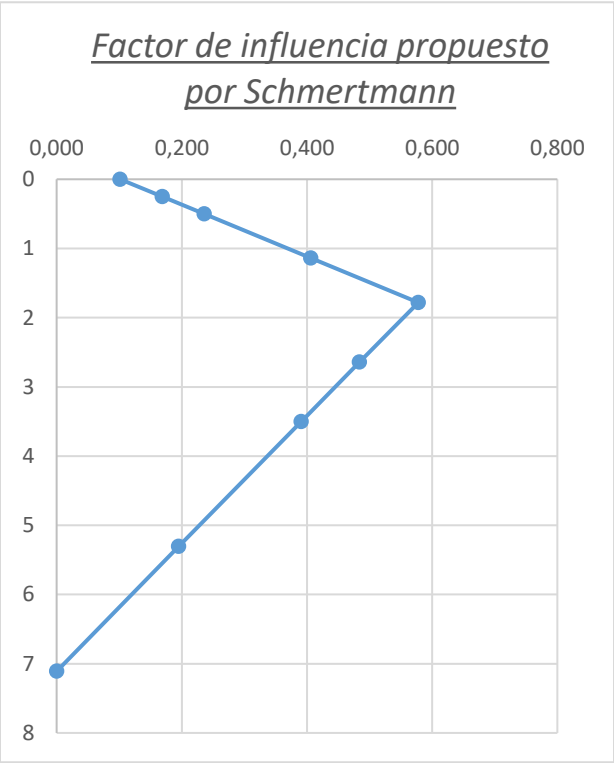


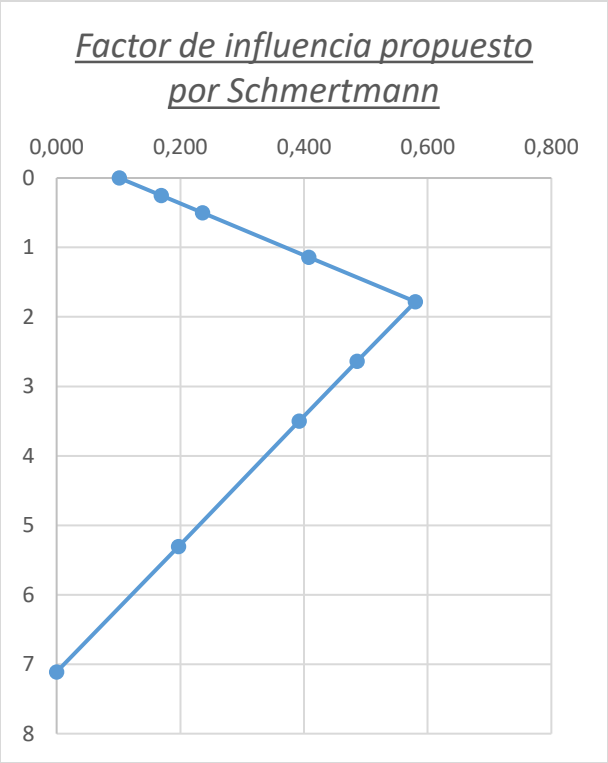
Anexo 19. Detalle del factor de influencia para el cálculo de asentamiento. Fuente: Fundamento de la ingeniería en cimentaciones.



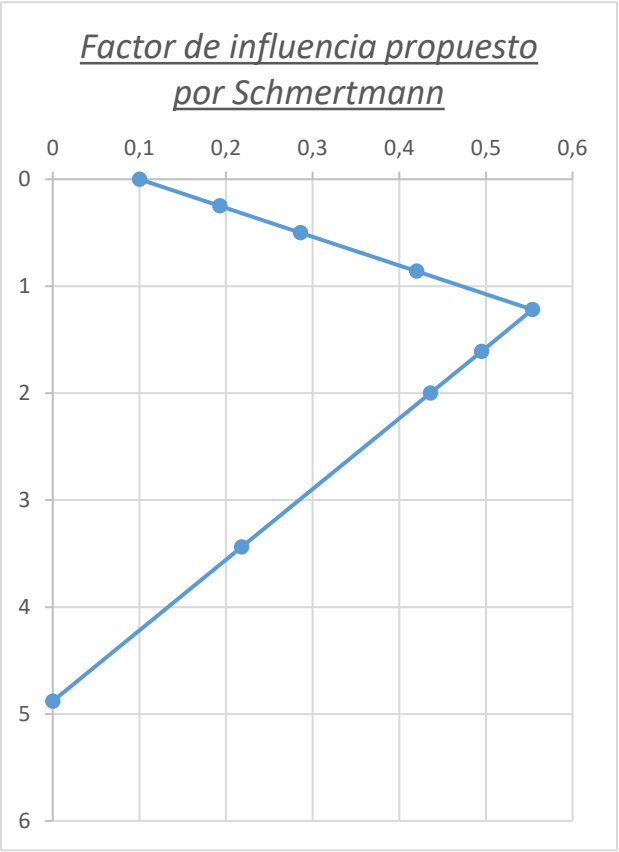


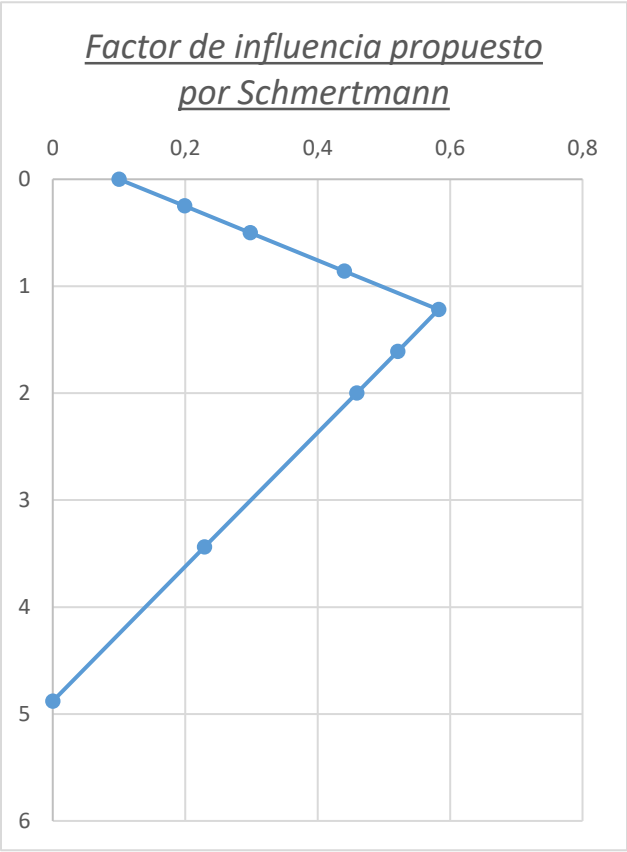


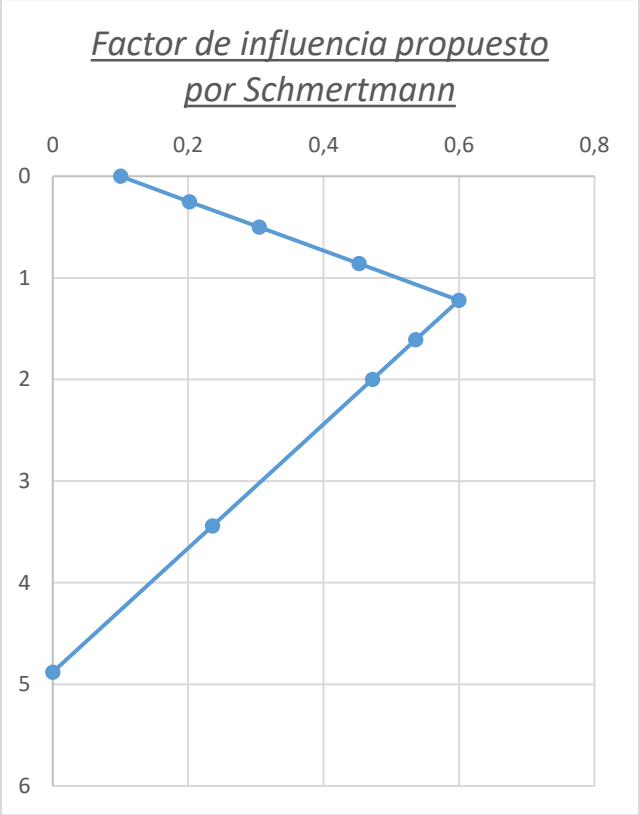


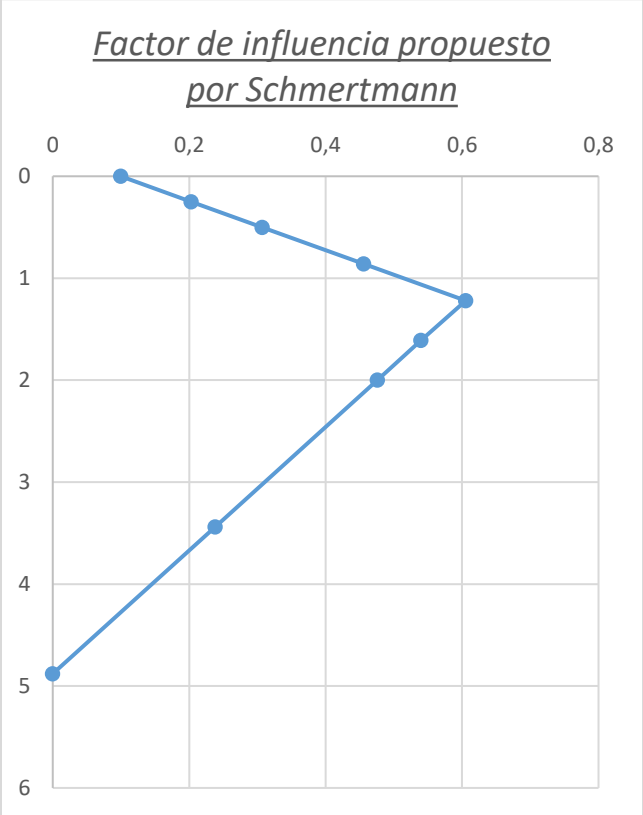


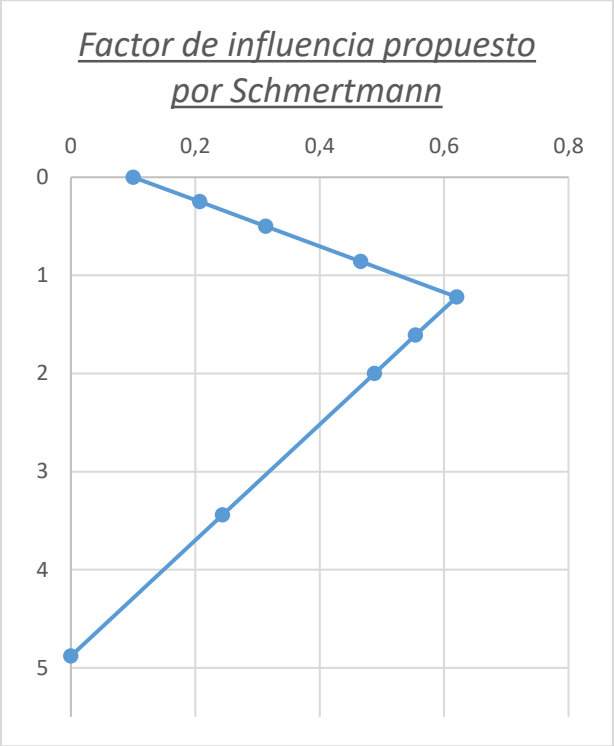
Anexo 20. Factor de influencia correspondiente al caso I. Fuente: Elaborada por los autores.


Factor de influencia propuesto por Schmertmann
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0
1
2
3
4
5
6

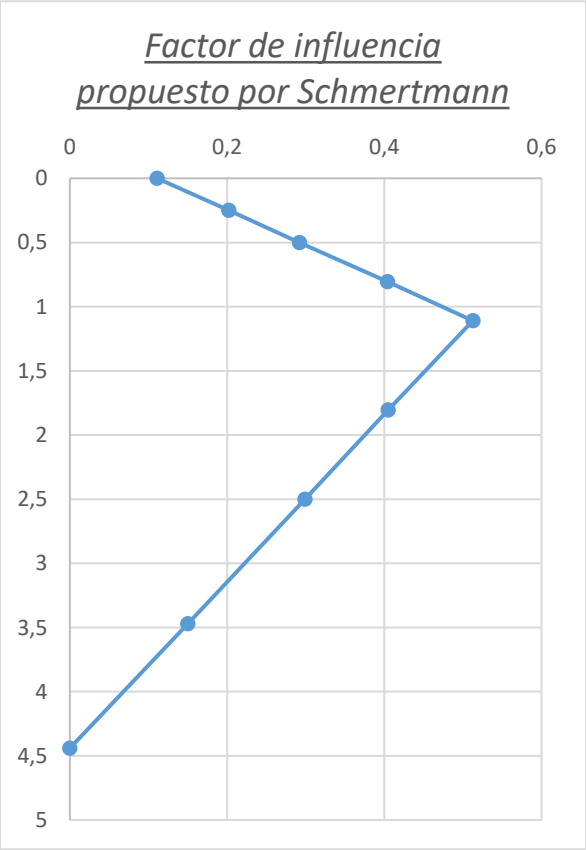

Factor de influencia propuesto por Schmertmann
0
0,2
0,4
0,6
0,8
0
1
2
3
4
5
6

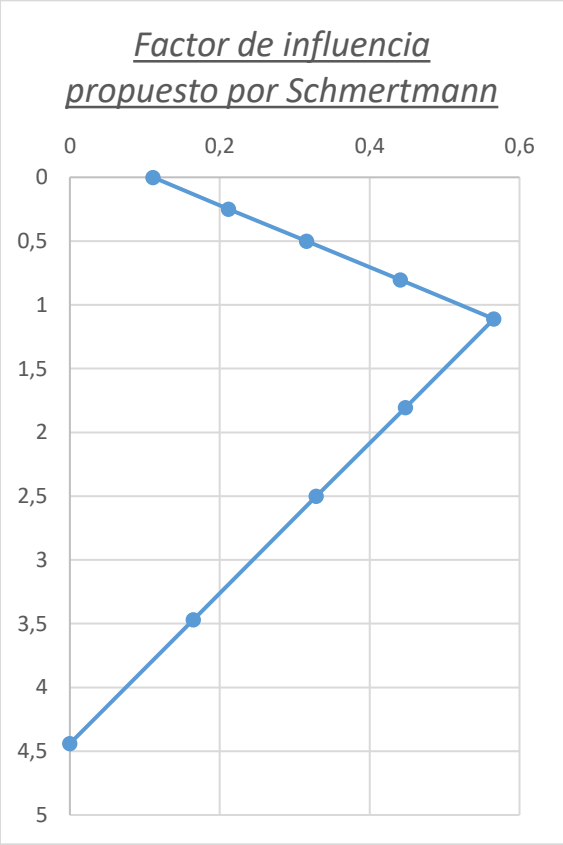

Factor de influencia propuesto por Schmertmann
0
0,2
0,4
0,6
0,8
0
1
2
3
4
5
6

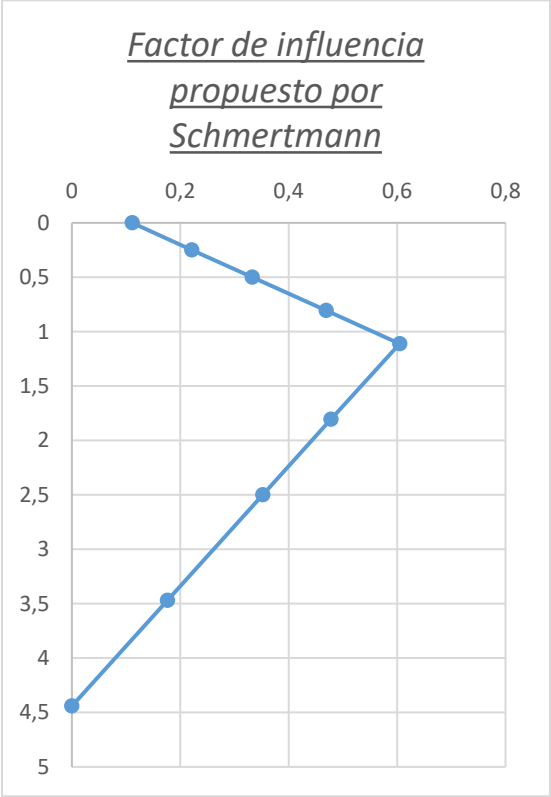

Factor de influencia propuesto por Schmertmann
0
0,2
0,4
0,6
0,8
0
1
2
3
4
5
6

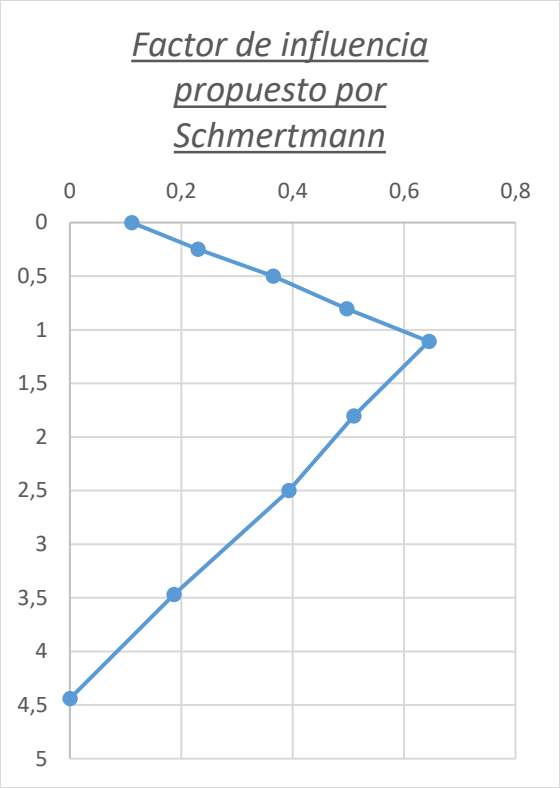


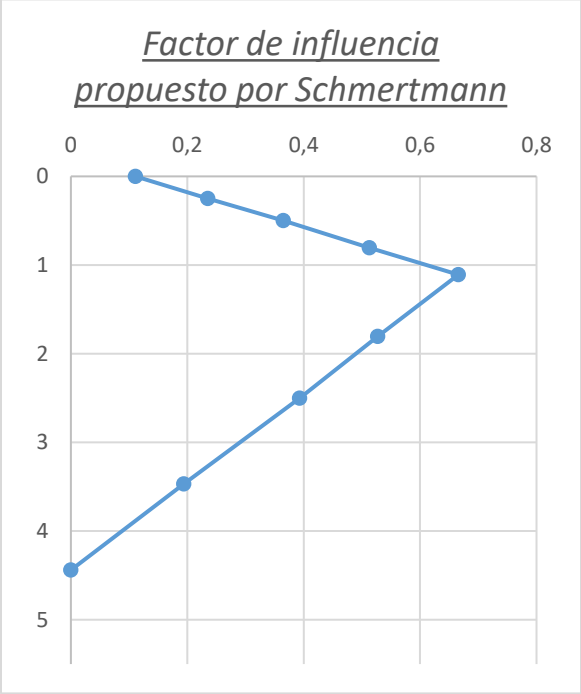
Anexo 21. Factor de influencia correspondiente al caso II. Fuente: Elaborada por los autores.











Anexo 22. Factor de influencia correspondiente al caso III. Fuente: Elaborada por los autores

Método de la ley edométrica continua (LEC)

En el caso de la ley edométrica continua propuesta por Naime como se mencionó en el capítulo II este método se aplicó en el estrato de suelo arcilloso y como se pudo observar en el capítulo V no solo se compararon el modelo hiperbólico y la ley edométrica continua (LEC) sino que también fueron comparados con otras metodologías como la teoría de la elasticidad, la ley edométrica tradicional (LET) y los medidos en sitio con la finalidad de comparar los valores de asentamiento que se obtienen y tener una mejor apreciación de la misma.

Nº	Lugar		Perfil	H	Tipo de Fundación	D_f	BxL	h_w	q	Dato de compresibilidad						S_{medido}	$S_{calculado}$	
										m_v	Cc	Cr	e_o	E_{so}	λ		LET[a]	LEC
				m			m		kPa	m^2/kN				kPa			cm	
1	Fire Testing Station, London[b]		Brown London Clay	6,10	Zapata aislada	-2,13	1,52x3,05	-0,61	84,48	1,61E-04	-	-	-	2676,67	62,31	1,52	1,65	1,66
2	Chelsea Bridge, London[b]		Blue London Clay	18,29	Zapata aislada	-9,45	8,53x32,31	3,96	179,51	7,10E-05	-	-	-	7790,00	33,00	5,59	8,38	8,55
3	Waterloo Bridge, London[b]		Blue London Clay	12,19	Zapata aislada	-6,71	8,23x35,66	5,18	263,98	8,52E-05	-	-	-	6436,93	29,91	10,67	13,21	13,48
4	Masonic Temple, Chicago[b]	E1	Stiff Soil	0,76	Zapatas múltiples analizadas como losa de fundación	-4,27	38,10x55,47	-3,05	70,75	1,89E-04	-	-	-	2837,24	26,14	24,89	22,35	22,37
		E2	Soft Chicago Clay	5,94						5,15E-04	-	-	-	880,66	9,93			
		E3	Medium Soft Chicago Clay	5,79						2,65E-04	-	-	-	2371,38	9,19			
		E4	Stiff Soil	2,44						1,89E-04	-	-	-	2241,56	18,74			

Anexo 23. Valores de asentamiento en suelo arcilloso con sus respectivos datos. Fuente: Naime .

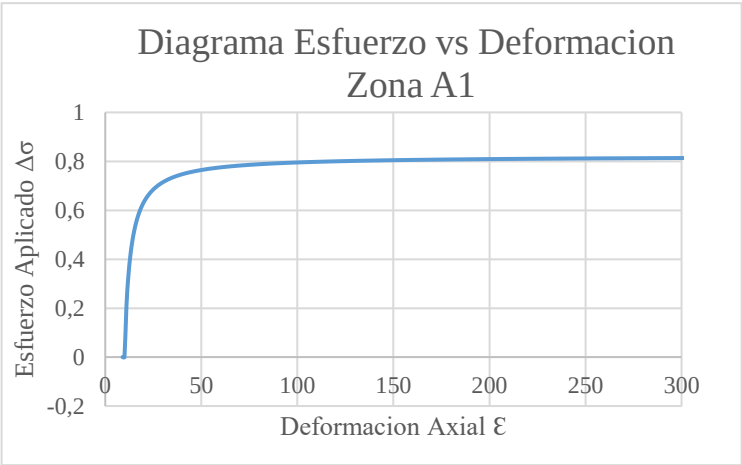
Tal como se observa en el anexo anterior se muestran los datos de las arcillas asi como los asentamientos utilizando la LEC, LET y los medidos en sitio, lo cual sirvió para poderlo comparar con el modelo hiperbólico y de la misma forma compararlo con la teoría de la elasticidad y tener una mejor apreciación de los resultados obtenidos. Se observó en los capítulos anteriores que los datos de asentamientos obtenidos fueron muy similares cuando se utilizaron las metodologías de LEC y el modelo hiperbólico, esto muestra que aunque un modelo sea distinto a otro se observó que los resultados no mostraron una variación significativa, a

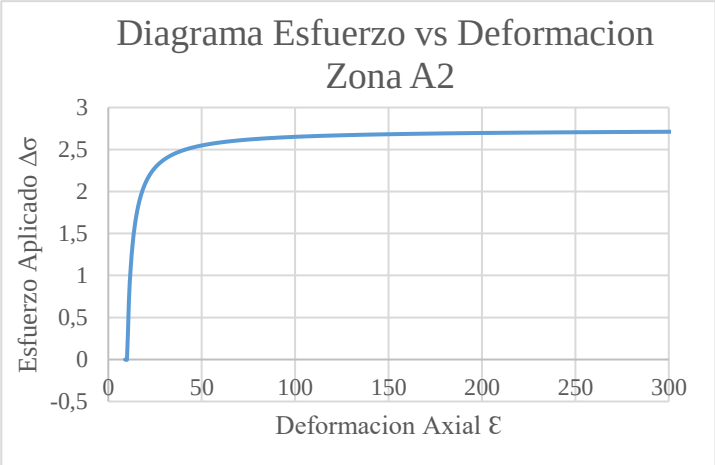
diferencia de los resultados que se obtuvieron aplicando la teoría de elasticidad que son resultados con una variación considerable.

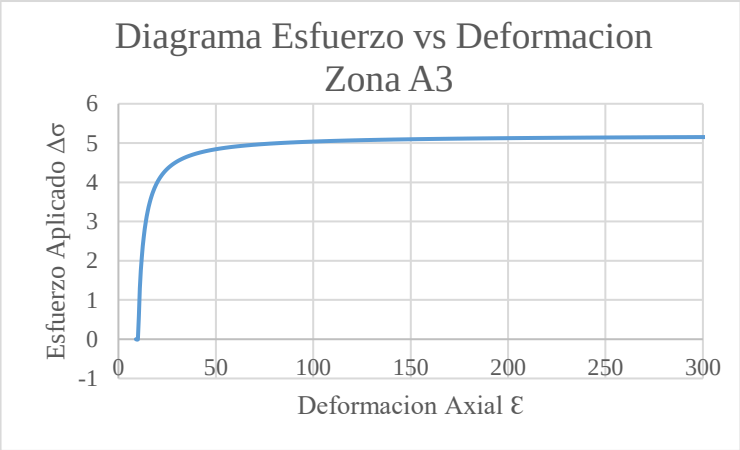
$$S = \int_{z_i}^{z_f} \varepsilon \, d_z \qquad S = \frac{1}{\lambda} \int_{z_i}^{z_f} \ln\left(1 + \frac{\lambda \Delta\sigma_z}{E_{so} + \lambda \sigma_{zi}}\right) dz$$

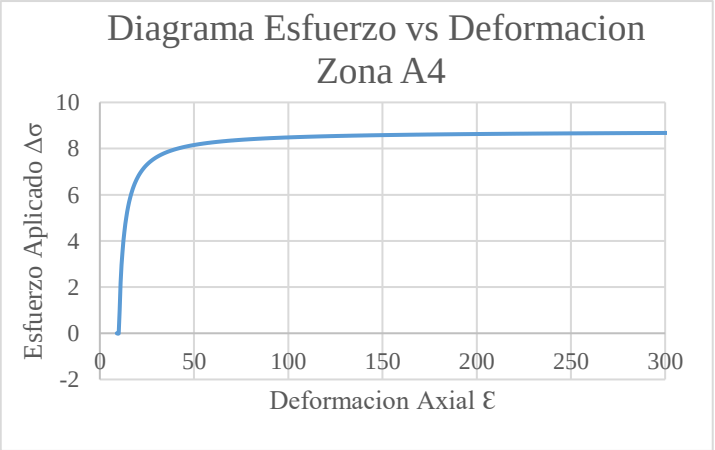
Anexo 24. Ecuaciones para el cálculo de asentamiento mediante la ley edométrica continua.

Fuente:Naime.









Anexo 25. Gráfico Esfuerzo vs Deformación para las zonas para cada uno de los estratos del estudio de la arcilla, para la Método Hiperbólico

ARCILLA - CASO I (ϕ : 22°)					
Carga aplicada		8.61	ton/m²		
Tipo de cimentación	profundidad	Δσ	Módulo de Young (E)	Δse	Asentamiento (cm)
Aislada	2.28	1.639	336.55	0.0111	1.110
	3.65	0.801	778.76	0.0038	0.375
	6.1	0.358	2570.74	0.0009	0.085
					1.571

ARCILLA - CASO II (ϕ : 22°)					
Carga aplicada		18.3	ton/m²		
Tipo de cimentación	profundidad	Δσ	Módulo de Young (E)	Δse	Asentamiento (cm)
Aislada	10.24	5.244	1659.15	0.032	3.235
	12.80	2.710	2995.68	0.012	1.157
	18.29	1.440	4282.22	0.006	0.615
					5.01

ARCILLA - CASO III (ϕ : 22°)					
Carga aplicada		26.92	ton/m²		
Tipo de cimentación	profundidad	Δσ	Módulo de Young (E)	Δse	Asentamiento (cm)
Aislada	7.41	16.825	1659.15	0.075	7.511
	9.88	8.002	2995.68	0.026	2.638
	12.21	4.219	4282.22	0.012	1.203
					11.35

Anexo 26. Valores de Módulo de Young y asentamiento para arcillas aplicando modelo hiperbólico y ángulo de fricción de 22°.

ARCILLA - CASO I (ϕ : 28°)					
Carga aplicada		8.61	ton/m²		
Tipo de cimentación	profundidad	Δσ	Módulo de Young (E)	Δse	Asentamiento (cm)
Aislada	2.28	0.827	336.550	0.0056	0.560
	3.648	0.296	336.550	0.0032	0.320
	6.1	0.124	12074.955	0.0001	0.006
					0.89

ARCILLA - CASO II (ϕ : 28°)

Carga aplicada		18.3	ton/m²		
Tipo de cimentación	profundidad	Δσ	Módulo de Young (E)	Δse	Asentamiento (cm)
Aislada	10.236	5.240	1758.765	0.0305	3.050
	12.795	2.710	2815.729	0.0123	1.231
	18.29	1.440	4390.893	0.0060	0.600
					4.88

ARCILLA - CASO III (ϕ : 28°)					
Carga aplicada		26.92	ton/m²		
Tipo de cimentación	profundidad	Δσ	Módulo de Young (E)	Δse	Asentamiento (cm)
Aislada	7.407	16.825	1758.765	0.0709	7.086
	9.876	8.002	2815.729	0.0281	2.807
	12.214	4.219	4390.893	0.0117	1.174
					11.07

Anexo 27. Valores de Módulo de Young y asentamiento para arcillas aplicando modelo hiperbólico y ángulo de fricción de 28°.