

**ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS EN
CIMENTACIONES SUPERFICIALES**

**EDGAR FERNANDO NIÑO SOLANO
SHARYN GISSELA TARAZONA GUERRERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

**ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS EN
CIMENTACIONES SUPERFICIALES**

**EDGAR FERNANDO NIÑO SOLANO
SHARYN GISSELA TARAZONA GUERRERO**

**Trabajo de grado modalidad investigación para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director
WILFREDO DEL TORO RODRÍGUEZ
Ingeniero Civil.M.Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO - MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2013**

DEDICATORIA

A Dios

Por escuchar todas y cada una de mis oraciones, por cuidarme y darme la sabiduría necesaria para enfrentar todos y cada uno de los obstáculos que se me presentaron a lo largo de mi carrera

A mi madre Teresa Guerrero

Por todas sus oraciones, por ser la mamá más hermosa que Dios me pudo regalar, por todos sus ánimos, sus cuidados y por todo lo que soy.

A mi padre Neftalí Tarazona

Por su apoyo incondicional, por todas las charlas interminables, por sus abrazos llenos de amor y de cariño y por querer tanto a esta hija medio rebelde que Dios le regalo.

Mis hermanos Gesley, Pat Geysar y Patsy, por estar hay siempre para mí, a mi novio Roger Torres por ser el motor de mi vida y a mis amigos Edgar, Edwin, Néstor y Camilo, por quererme como soy

SHARYN GISSELA TARAZONA GUERRERO

Los diversos caminos que tomamos a lo largo de la vida nos llevan a superar grandes pruebas, durante este proceso podemos conocer amigos, compañeros y enemigos, personas que día tras día tienen algo para ofrecernos y cosas que enseñarnos, y es por esto que hoy quiero agradecerle a cada uno de ellos por las experiencias vividas.

A mis padres Filomena Solano y Anselmo Niño quienes son los gestores de este proyecto y de todos los que pueda emprender, pues con su amor y dedicación me ha apoyado día a día, enseñándome que nunca hay que rendirse, que los grandes no son los que nunca han caído, sino los que saben levantarse y sobreponerse a la adversidad. A mis hermanos y familiares quienes me ayudaron a formar valores y me mostraron que en la vida hay que vivir intensamente cada día, disfrutarla y estar siempre al lado de la familia.

A mis amigos Edwin, Tommy, Sharyn y demás compañeros y amigos que me brindaron su compañía y las alegrías más importantes durante mi carrera, mostrándome que siempre se debe luchar y jamás rendirse. Espero que la vida nos permita volvernos a encontrar y recuerden que cada uno hizo un trabajo en mí para hacerme mejor persona.

Gracias.

EDGAR FERNANDO NIÑO SOLANO

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a:

A Dios todo poderoso por darnos la sabiduría necesaria para resolver todas nuestras dudas y darnos la fuerza para vencer todos los obstáculos que se nos fueron presentando.

A todos los miembros del claustro de profesores de la Universidad Industrial de Santander e Ingenieros Civiles que nos brindaron su asesoría, y, en especial al Ingeniero Wilfredo del Toro Rodríguez por su asesoría continua durante la elaboración del proyecto.

A nuestros padres que con su esfuerzo y sacrificio, depositado toda su confianza en nosotros y nos han apoyado y colaborado en transcurso de toda nuestra carrera universitaria.

A nuestros amigos y familiares que de una u otra manera colaboraron con este logro.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	18
1. OBJETIVOS.....	20
1.1 Objetivo general.....	20
1.2 Objetivos específicos.....	20
2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 CIMENTACIONES SUPERFICIALES.....	21
2.2 ASENTAMIENTO ELÁSTICO.....	21
2.2.1 Asentamientos elásticos basado en la teoría de la elasticidad.....	21
2.2.2 Asentamiento de suelo arenoso. Uso del factor de influencia de la deformación unitaria.....	28
2.3 RANGO DE LOS PARÁMETROS DEL MATERIAL PARA CALCULAR ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS.....	30
2.4 INCREMENTO DEL ESFUERZOS VERTICAL EN UNA MASA DE SUELO CAUSADO POR CARGA DE CIMENTACIÓN.....	31
2.4.1 Esfuerzo debajo de un área rectangular.....	31
2.5 INFORMACIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO PLAXIS.....	38
2.5.1 Plaxis 3D foundation.....	38
3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO.....	40
3.1 DIAGRAMA DE TRABAJO.....	40
3.2 CALCULO DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS MEDIANTE PLAXIS.....	40
3.2.1 Datos para modelaciones en plaxis.....	41
3.2.2 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ÁBACO $\mu = 0.3$	46
3.3 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS MEDIANTE TEORÍAS TRADICIONALES.....	51
3.3.1 Cálculo de asentamientos inmediatos mediante la teoría de la elasticidad..	51
3.3.2 Cálculo de asentamientos de suelo arenoso: uso del factor de influencia de la deformación unitaria.....	54
3.4. TABLAS COMPARATIVAS DE CALCULO DE ASENTAMIENTOS.....	57
3.5 CÁLCULO DE ESFUERZOS MEDIANTE PLAXIS.....	61
3.6 CÁLCULO DE ESFUERZOS MEDIANTE TEORÍAS TRADICIONALES.....	63
3.6.1. Cálculo de esfuerzos debajo de un área cuadrada.....	63
CONCLUSIONES.....	67
RECOMENDACIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	70
ANEXOS.....	71

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Variación de F_1 y F_2 con m' y n'	25
Tabla 2. Continuación.....	26
Tabla 3. Factor de profundidad de Fox	27
Tabla 4. Parámetros elásticos para diferentes suelos	30
Tabla 5. Variación del valor del factor de influencia, I	33
Tabla 6. (Continuación)	34
Tabla 7. Variación de I_c con m_1 y n_1	37
Tabla 9. Relaciones aproximadas y del ángulo de fricción interna para arenas	42
Tabla 10. Peso específico seco para algunos suelos	42
Tabla 11. Parámetros Elásticos para diferentes suelos.....	42
Tabla 12. Datos arena suelta	43
Tabla 13. Datos arena densa media	43
Tabla 14. Datos arena densa	43
Tabla 15. Datos Zapata	44
Tabla 16. Datos extraídos de PLAXIS relación $E/q_0=100$	47
Tabla 17. Datos extraídos de PLAXIS relación $E/q_0=150$	47
Tabla 18. Datos extraídos de PLAXIS relación $E/q_0=200$	48
Tabla 19. Datos para graficar curva normalizada $\mu =0.3$ relación $E/q_0=100$	49
Tabla 20. Datos para graficar curva normalizada $\mu =0.3$ relación $E/q_0=150$	49
Tabla 21. Datos para graficar curva normalizada $\mu =0.3$ relación $E/q_0=200$	50
Tabla 22. Calculo de la sumatoria	56
Tabla23. Asentamientos de arena suelta.....	57
Tabla 24. Asentamientos de arena densa media.....	58
Tabla 25. Asentamientos de arena densa.....	60
Tabla 26. Esfuerzos para arena suelta	65
Tabla 27. Esfuerzos para arena densa media	66
Tabla 28. Esfuerzos para arena densa	66

LISTA DE GRÁFICOS

	Pág.
Gráfico 1. Abaco normalizado para $\mu = 0.3$	51
Gráfico 2. Variación del I_z con respecto a la profundidad	56

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Asentamiento elástico de una cimentación superficial	22
Figura 2. Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas	23
Figura 3. Cálculo del asentamiento elástico usando el factor de influencia de la deformación unitaria.	29
Figura 4. Determinación del esfuerzo debajo de una esquina de una superficie flexible rectangular cargada	32
Figura 5. Esfuerzo debajo de cualquier punto de una superficie flexible rectangular cargada.	35
Figura 6. Método 2:1 para encontrar el incremento de esfuerzo debajo de una cimentación.....	37
Figura 7. Diagrama de trabajo.....	40
Figura 8. Sección transversal de deformaciones	46
Figura 9. Sección transversal de esfuerzos	62

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Etapas para modelar un asentamiento en el software PLAXIS.	72
a-1 Definir nombre del modelo, gravedad y peso del agua.	72
a-2 Definir unidades y tamaño del volumen de suelo a modelar.	72
a-3 Definir la geometría de la Zapata en el volumen de suelo mediante la herramienta: Geometry Line.	73
a-4 Asignar la zapata en la geometría ya definida mediante la herramienta: Floor.	73
a-5 Definir los niveles correspondientes a cota cero y cambios de materiales mediante la herramienta: workplanes.	74
a-6 Definir las propiedades de los materiales a utilizar para el suelo mediante la herramienta: Materials. (1).	74
a-7 Definir las propiedades de los materiales a utilizar para el suelo mediante la herramienta: Materials. (2).	75
a-8 Definir las características de la interfaz entre la zapata y suelo.	75
a-9 Definir las propiedades de los materiales a utilizar para la zapata mediante la herramienta: Materials.	76
a-10 Asignar las propiedades de la zapata.	76
a-11 Definir la estratigrafía del suelo y nivel de agua mediante calicatas imaginarias usando la herramienta: Borehole.	77
a-12 Asignar la carga distribuida sobre el área de la zapata usando la herramienta: Distributed load (horizontal planes).	77
a-13 Generar la malla de elementos finitos en 2D a utilizar, pero teniendo en cuenta que se debe hacer una malla refinada.	78
a-14 Generar la malla de elementos finitos en 2D a utilizar.	78
a-15 Pasar a la fase de cálculos y definir las fases de la modelación para el procesador FEM.	79
a-16 Habilitar para la Fase 1: la zapata y la carga sobre ésta, para luego proceder a realizar los cálculos.	79
a-17 una vez realizados los cálculos procedemos a visualizar los datos obtenidos.	80
a-18 Enseguida realizamos un corte mediante la herramienta: Cross Section, para visualizar los resultados que nos interesan.	80
a-19 Uno de los gráficos que es de nuestro interés es el de Deformaciones Totales.	81
a-20 El otro grafico de nuestro interés es el de Esfuerzos.	82
a-21 Para obtener los datos de los casos anteriores se hace mediante la herramienta: Table, la cual nos arroja una tabla con todos los datos de los puntos de la sección y deberán ser organizados y tabulados con Excel.	82
Anexo B. Ábacos de asentamientos para arenas.	83

GLOSARIO

Asentamiento: es la deformación vertical en la superficie de un terreno proveniente de la aplicación de cargas o debido al peso propio de las capas.

Arenas: la arena es un conjunto de partículas de rocas disgregadas. En geología se denomina arena al material compuesto de partículas cuyo tamaño varía entre 0,063 y 2 milímetros (mm).

PLAXIS: programa que sirve para la realización de análisis de deformación y estabilidad de problemas geotécnicos.

Nivel Freático: es el nivel o altura hasta donde está el agua.

Coefficiente de Poisson: es una constante elástica que proporciona una medida del estrechamiento de sección de un prisma de material elástico lineal e isótropo cuando se estira longitudinalmente y se adelgaza en las direcciones perpendiculares a la de estiramiento.

Permeabilidad: es la capacidad que tiene un material de permitirle a un flujo que lo atraviese sin alterar su estructura interna.

Módulo de Young: el módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza.

Carga: la palabra carga tiene varias acepciones. Una de ellas alude al peso que debe soportar algo o alguien, sobre su materia o sobre su espíritu.

Peso específico: se le llama peso específico a la relación entre el peso de una sustancia y su volumen.

Isotrópico: es la característica de los cuerpos cuyas propiedades físicas no dependen de la dirección. Es decir, se refiere al hecho de que ciertas magnitudes vectoriales conmensurables, dan resultados idénticos con independencia de la dirección escogida para dicha medida.

Cimentación superficial: se denomina cimentación al conjunto de elementos estructurales cuya misión es transmitir las cargas de la edificación o elementos apoyados a este al suelo, distribuyéndolas de forma que no superen su presión admisible ni produzcan cargas zonales.

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS PARAMÉTRICO DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS EN CIMENTACIONES SUPERFICIALES*

AUTORES: NIÑO SOLANO, Edgar Fernando
TARAZONA GUERRERO, Sharyn Gissela**

PALABRAS CLAVE: asentamiento, inmediato, cimentación, superficial, carga, módulo, Young, coeficiente, poisson, suelo y Plaxis.

CONTENIDO

En el presente trabajo se desea realizar una investigación que permita el análisis paramétrico de asentamientos inmediatos en cimentaciones superficiales con el fin de generar ábacos normalizados con la ayuda del software PLAXIS, corroborando los resultados del programa con las metodologías tradicionales, y en este caso particular se tendrá en cuenta dos teorías: la Teoría de la Elasticidad y la Teoría propuesta por Schmertmann y Hartman, pero apoyándose principalmente la segunda teoría, que está diseñada para el cálculo de asentamientos en suelos granulares.

Los parámetros que se tendrán para dicho análisis serán el Modulo de Young, el coeficiente de Poisson y la carga, teniendo en cuenta que el tipo de suelo a analizar será: arena, basándonos en las clasificaciones más comunes de ésta.

El proyecto investigativo básicamente, presenta una alternativa de cálculo de asentamientos en arenas a través de los ábacos, los cuales se fundamentan en la relación entre Modulo de elasticidad y carga, pero sin descuidar la afectación del Módulo de Poisson.

Como conclusión se demuestra a través de las teorías tradicionales que los ábacos tendrán un porcentaje de error que oscilará entre el 1% y el 12%, que equivaldría a un error expresado en milímetros, además se puede calcular asentamientos de diferentes relaciones de Modulo de Elasticidad – Carga, apreciando como afecta la variación de estos parámetros a los asentamientos.

* Proyecto de grado

** Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas, Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez – Ingeniero Civil.M.Sc.

ABSTRACT

TITLE: PARAMETRIC ANALYSIS OF IMMEDIATE SETTLEMENTS IN SHALLOW FOUNDATIONS*

AUTHORS: NIÑO SOLANO, Edgar Fernando
TARAZONA GUERRERO, Sharyn Gissela**

KEYWORDS: Immediate, settlement, shallow, foundation, load, Young's, modulus, Poisson's, ratio, soil, Plaxis.

CONTENTS

In the present work one wants to realize an investigation that allows the analysis paramétrico of immediate accessions in superficial foundations in order to generate abaci normalized with the help of the software PLAXIS, corroborating the results of the program with the traditional methodologies, and in this particular case two theories will be born in mind: the Theory of the Elasticity and the Theory proposed by Schmertmann and Hartman, but resting principally the second theory, which is designed for the calculation of accessions in granular soils.

The parameters that will be had for the above mentioned analysis will be Young's Module, Poisson's coefficient and the load, bearing in mind that the type of soil to analyzing will be: sand, basing on the most common classifications of this one.

The research project basically, he presents an alternative of calculation of accessions in sands across the abaci, which are based on the relation between Module of elasticity and load, but without neglecting the affectation of Poisson's Module.

Since conclusion demonstrates across the traditional theories that the abacuses will have a an estimated error rate between 1% and 12%, equivalent to an error expressed in millimeters, in addition it is possible to calculate settlements of different relations of Module of Elasticity - Load, estimating like it affects the variation of these parameters to the settlements.

* Grade Project

** Universidad Industrial de Santander, Faculty of Physical - Mechanical Engineerings, School of Civil Engineering. Director: Wilfredo del Toro Rodríguez - Civil Engineer.M.Sc.

INTRODUCCIÓN

En un suelo los asentamientos elásticos o inmediatos ocurren después de la colocación de la estructura, en la construcción de una cimentación superficial es muy importante conocer el tipo de asentamiento que esta va a ocasionar, y para esto es indispensable conocer el tipo de suelo con el que se va a interactuar, su composición, sus propiedades y todas aquellas características propias de él, para su respectivo análisis.

Un análisis que se realizará mediante el programa PLAXIS, que es una herramienta numérica que permite conocer mediante una serie de pasos los asentamientos inmediatos que una cimentación puede ocasionar en el terreno. Cuando se trabaja con PLAXIS, se depende de una serie de datos que se introducen, de acuerdo con las propiedades del suelo, tales como su condición saturada y no saturada, su permeabilidad, un módulo de Young y coeficiente de Poisson para un caso de análisis Elástico-Lineal.

En esta investigación se generarán ábacos mediante unos datos arrojados por PLAXIS, con dichos datos se realizará ciertos cálculos para poder graficar en excel, convirtiendo así estos datos en unas curvas normalizadas de las cuales se podrá obtener los asentamientos para cualquier tipo de arena (suelta, media densa y densas).

De igual forma se calcularán los asentamientos inmediatos que la cimentación le trasmite al suelo mediante la teoría de “Schmertmann y Harman”, junto con la “Teoría de la Elasticidad” y se realizara un cuadro comparativo de estos tres cálculos para mostrar cómo es la variación entre éstos.

También se calcularan los esfuerzos generados en PLAXIS y se hará su respectivo comparativo con la teoría existente.

De esta manera se busca generar nuevas ideas para el cálculo de deformaciones que minimicen los pasos para la obtención de dichos parámetros.

1. OBJETIVOS

1.1 Objetivo general. Analizar el comportamiento del suelo de cimentación bajo cargas mediante un análisis Elástico-Lineal, teniendo en cuenta la variación de los parámetros elásticos del mismo.

1.2 Objetivos específicos. Entender el funcionamiento del programa PLAXIS para el análisis del comportamiento de los asentamientos inmediatos, para posteriormente poder interpretar los resultados obtenidos.

- Realizar una breve revisión bibliográfica sobre el tema.
- Analizar cómo afectan las diferentes modificaciones de los parámetros: Coeficiente de Poisson y Módulo de Young, las deformaciones bajo la carga de cimentaciones.
- Examinar los resultados obtenidos con las metodologías convencionales para el cálculo de asentamientos inmediatos.
- Calibrar mediante un modelamiento los esfuerzos y deformaciones producidos por una carga de un edificio de cinco pisos sobre el suelo de cimentación.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 CIMENTACIONES SUPERFICIALES

Las cimentaciones superficiales reparten la fuerza que le transmite la estructura a través de sus elementos de apoyo, sobre una superficie de terreno bastante grande que admite esas cargas.

Se considera cimentación superficial cuando tienen entre 0,50 m. y 4 m. de profundidad, y cuando las tensiones admisibles de las diferentes capas del terreno que se hallan hasta esa cota, permiten apoyar el edificio en forma directa sin provocar asentamientos excesivos de la estructura que puedan afectar la funcionalidad de la estructura; de no ser así, se harán cimentaciones profundas.

2.2 ASENTAMIENTO ELÁSTICO

2.2.1 Asentamientos elásticos basado en la teoría de la elasticidad

El asentamiento elástico de una cimentación superficial se estima usando la teoría de la elasticidad y aplicando la ley de Hooke,

$$S_e = \int_0^H \varepsilon_z dz = \frac{1}{E_s} \int_0^H (\Delta\sigma_z - \mu_s \Delta\sigma_x - \mu_s \Delta\sigma_y) dz$$

Dónde:

S_e = asentamiento elástico.

E_s = módulo de elasticidad del suelo.

H = espesor del estrato de suelo.

μ_s = relación de Poisson del suelo.

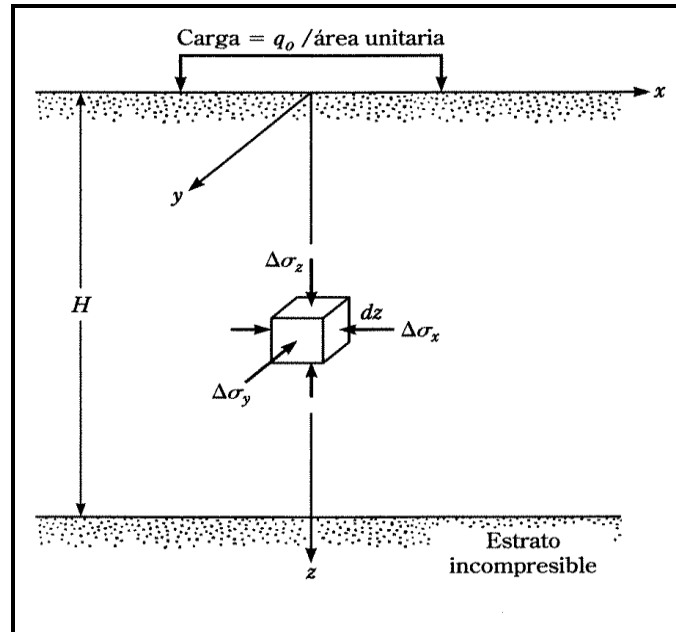
$\Delta\sigma_z, \Delta\sigma_x, \Delta\sigma_y$ = incremento del esfuerzo debido a la carga neta aplicada a la

cimentación, en las direcciones x, y, z, respectivamente.

Teóricamente, si la cimentación es perfectamente flexible, el asentamiento puede expresarse como:

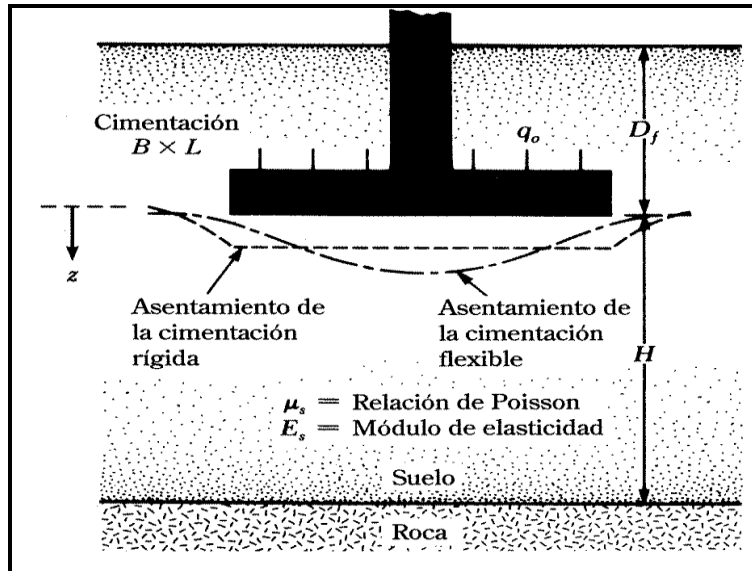
$$S_e = q_o (\alpha B') \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_s I_f$$

Figura 1. Asentamiento elástico de una cimentación superficial



Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

Figura 2. Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas



Fuente: Principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

Dónde:

q_0 = Presión neta aplicada sobre la cimentación

μ_s = Relación de Poisson del suelo

E_s = Módulo de elasticidad promedio del suelo bajo la cimentación, medido de $z=0$

a $z=4B$

B' = $B/2$ para el centro de la cimentación

= B para una esquina de la cimentación

I_s = Factor de forma (Steinbrenner, 1934)

$$= F_1 + \frac{1-2\mu_s}{1-\mu_s} F_2$$

$$F_1 = \frac{1}{\pi} (A_0 + A_1)$$

$$F_2 = \frac{n'}{2\pi} \tan^{-1} A_2$$

$$A_0 = m' \ln \frac{(1 + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{m'^2 + n'^2}}{m'(1 + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1})}$$

$$A_1 = \ln \frac{(m' + \sqrt{m'^2 + 1})\sqrt{1 + n'^2}}{m' + \sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

$$A_2 = \frac{m'}{n'\sqrt{m'^2 + n'^2 + 1}}$$

$$I_f = \text{Factor de profundidad (Fox, 1948)} = f\left(\frac{D_f}{B}, \mu_s, y, \frac{L}{S}\right)$$

α = Factor que depende de la posición de la cimentación donde el asentamiento está siendo calculado.

Para calcular el asentamiento en el centro de la cimentación, usamos

$$\alpha = 4$$

$$m' = \frac{L}{B}$$

$$n' = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)}$$

Para calcular el asentamiento en una esquina de la cimentación,

$$\alpha = 1$$

$$m' = \frac{L}{B}$$

$$n' = \frac{H}{B}$$

Las variaciones de F_1 y F_2 , con m' y n' son dadas en la tabla 1. La variación de I_f con D_f/B y μ_s está dada en la tabla 1. Observe que cuando $D_f = 0$, el valor de $I_f = 1$ en todos los casos.

El asentamiento elástico de una cimentación rígida puede estimarse con:

$$S_{e(\text{rígida})} \sim 0,93 * S_{e(\text{flexible, centro})}$$

Tabla 1. Variación de F_1 y F_2 con m' y n'

n'	m'									
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
0.5										
F_1	0.049	0.046	0.044	0.042	0.041	0.040	0.038	0.038	0.037	0.037
F_2	0.074	0.077	0.080	0.081	0.083	0.084	0.085	0.086	0.087	0.087
0.8										
F_1	0.104	0.100	0.096	0.093	0.091	0.089	0.086	0.084	0.083	0.082
F_2	0.083	0.090	0.095	0.098	0.101	0.103	0.107	0.109	0.110	0.111
1.0										
F_1	0.142	0.138	0.134	0.130	0.127	0.125	0.121	0.118	0.116	0.115
F_2	0.083	0.091	0.098	0.102	0.106	0.109	0.114	0.117	0.119	0.120
2.0										
F_1	0.285	0.290	0.292	0.292	0.291	0.289	0.284	0.279	0.275	0.271
F_2	0.064	0.074	0.083	0.090	0.097	0.102	0.114	0.121	0.127	0.131
4.0										
F_1	0.408	0.431	0.448	0.460	0.469	0.476	0.484	0.487	0.486	0.484
F_2	0.037	0.044	0.051	0.057	0.063	0.069	0.082	0.093	0.102	0.110
6.0										
F_1	0.457	0.489	0.514	0.534	0.550	0.563	0.585	0.598	0.606	0.609
F_2	0.026	0.031	0.036	0.040	0.045	0.050	0.060	0.070	0.079	0.087
8.0										
F_1	0.482	0.519	0.549	0.573	0.594	0.611	0.643	0.664	0.678	0.688
F_2	0.020	0.023	0.027	0.031	0.035	0.038	0.047	0.055	0.063	0.071
10.0										
F_1	0.498	0.537	0.570	0.597	0.621	0.641	0.679	0.707	0.726	0.740
F_2	0.016	0.019	0.022	0.025	0.028	0.031	0.038	0.046	0.052	0.059
12.0										
F_1	0.508	0.550	0.585	0.614	0.639	0.661	0.704	0.736	0.760	0.777
F_2	0.013	0.016	0.018	0.021	0.024	0.026	0.032	0.038	0.044	0.050
100.0										
F_1	0.555	0.605	0.649	0.688	0.722	0.753	0.819	0.872	0.918	0.956
F_2	0.002	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.004	0.005	0.006	0.006
1 000.0										
F_1	0.560	0.612	0.657	0.697	0.733	0.765	0.833	0.890	0.938	0.979
F_2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001

^aSegún Bowles (1987)

(Continúa)

Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

Tabla 2. Continuación

<i>n'</i>	<i>m'</i>									
	4.5	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	25.0	50.0	100.0
0.5										
<i>F</i> ₁	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
<i>F</i> ₂	0.087	0.087	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088	0.088
0.8										
<i>F</i> ₁	0.081	0.081	0.080	0.080	0.080	0.079	0.079	0.079	0.079	0.079
<i>F</i> ₂	0.112	0.112	0.113	0.113	0.113	0.113	0.114	0.114	0.114	0.114
1.0										
<i>F</i> ₁	0.114	0.113	0.112	0.112	0.112	0.111	0.111	0.110	0.110	0.110
<i>F</i> ₂	0.121	0.122	0.123	0.123	0.124	0.124	0.124	0.125	0.125	0.125
2.0										
<i>F</i> ₁	0.269	0.267	0.264	0.262	0.261	0.260	0.259	0.257	0.256	0.256
<i>F</i> ₂	0.134	0.136	0.139	0.141	0.143	0.144	0.145	0.147	0.147	0.148
4.0										
<i>F</i> ₁	0.482	0.479	0.474	0.470	0.466	0.464	0.462	0.453	0.451	0.451
<i>F</i> ₂	0.116	0.121	0.129	0.135	0.139	0.142	0.145	0.154	0.155	0.156
6.0										
<i>F</i> ₁	0.611	0.610	0.608	0.604	0.601	0.598	0.595	0.579	0.576	0.575
<i>F</i> ₂	0.094	0.101	0.111	0.120	0.126	0.131	0.135	0.153	0.157	0.157
8.0										
<i>F</i> ₁	0.694	0.697	0.700	0.700	0.698	0.695	0.692	0.672	0.666	0.665
<i>F</i> ₂	0.077	0.084	0.095	0.104	0.112	0.118	0.124	0.151	0.156	0.158
10.0										
<i>F</i> ₁	0.750	0.758	0.766	0.770	0.770	0.770	0.768	0.745	0.738	0.735
<i>F</i> ₂	0.065	0.071	0.082	0.091	0.099	0.106	0.112	0.147	0.156	0.158
12.0										
<i>F</i> ₁	0.791	0.801	0.815	0.823	0.826	0.828	0.828	0.806	0.796	0.793
<i>F</i> ₂	0.056	0.061	0.071	0.080	0.088	0.095	0.102	0.143	0.154	0.158
100.0										
<i>F</i> ₁	0.990	1.020	1.072	1.114	1.150	1.182	1.209	1.408	1.489	1.499
<i>F</i> ₂	0.007	0.008	0.010	0.011	0.013	0.014	0.016	0.039	0.071	0.113
1 000.0										
<i>F</i> ₁	1.016	1.049	1.106	1.154	1.196	1.233	1.266	1.548	1.752	1.941
<i>F</i> ₂	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.002	0.004	0.008	0.016

Fuente: Principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

Debido a la naturaleza no homogénea de los depósitos de suelo, la magnitud de E_s puede variar con la profundidad. Por esta razón Bowles (1987) se recomienda usar un promedio ponderado de E_s , o

$$E_s = \frac{\sum E_{s(i)} \Delta z}{\bar{z}}$$

Dónde:

$E_{s(i)}$ = Módulo de elasticidad del suelo en una profundidad Δz

\bar{z} = H o 5B, la que sea más pequeña

Tabla 3. Factor de profundidad de Fox

D_i/B	L/B						
	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	5.0
Relación de Poisson = 0.00 = μ_s							
0.05	0.950	0.954	0.957	0.959	0.961	0.963	0.973
0.10	0.904	0.911	0.917	0.922	0.925	0.928	0.948
0.20	0.825	0.838	0.847	0.855	0.862	0.867	0.903
0.40	0.710	0.727	0.740	0.752	0.761	0.769	0.827
0.60	0.635	0.652	0.666	0.678	0.689	0.698	0.769
0.80	0.585	0.600	0.614	0.626	0.637	0.646	0.723
1.00	0.549	0.563	0.576	0.587	0.598	0.607	0.686
2.00	0.468	0.476	0.484	0.492	0.499	0.506	0.577
Relación de Poisson = 0.10 = μ_s							
0.05	0.958	0.962	0.965	0.967	0.968	0.970	0.978
0.10	0.919	0.926	0.930	0.934	0.938	0.940	0.957
0.20	0.848	0.859	0.868	0.875	0.881	0.886	0.917
0.40	0.739	0.755	0.768	0.779	0.788	0.795	0.848
0.60	0.665	0.682	0.696	0.708	0.718	0.727	0.793
0.80	0.615	0.630	0.644	0.656	0.667	0.676	0.749
1.00	0.579	0.593	0.606	0.618	0.628	0.637	0.714
2.00	0.496	0.505	0.513	0.521	0.528	0.535	0.606
Relación de Poisson = 0.30 = μ_s							
0.05	0.979	0.981	0.982	0.983	0.984	0.985	0.990
0.10	0.954	0.958	0.962	0.964	0.966	0.968	0.977
0.20	0.902	0.911	0.917	0.923	0.927	0.930	0.951
0.40	0.808	0.823	0.834	0.843	0.851	0.857	0.899
0.60	0.738	0.754	0.767	0.778	0.788	0.796	0.852
0.80	0.687	0.703	0.716	0.728	0.738	0.747	0.813
1.00	0.650	0.665	0.678	0.689	0.700	0.709	0.780
2.00	0.562	0.571	0.580	0.588	0.596	0.603	0.675
Relación de Poisson = 0.40 = μ_s							
0.05	0.989	0.990	0.991	0.992	0.992	0.993	0.995
0.10	0.973	0.976	0.978	0.980	0.981	0.982	0.988
0.20	0.932	0.940	0.945	0.949	0.952	0.955	0.970
0.40	0.848	0.862	0.872	0.881	0.887	0.893	0.927
0.60	0.779	0.795	0.808	0.819	0.828	0.836	0.886
0.80	0.727	0.743	0.757	0.769	0.779	0.788	0.849
1.00	0.689	0.704	0.718	0.730	0.740	0.749	0.818
2.00	0.596	0.606	0.615	0.624	0.632	0.640	0.714
Relación de Poisson = 0.50 = μ_s							
0.05	0.997	0.997	0.998	0.998	0.998	0.998	0.999
0.10	0.988	0.990	0.991	0.992	0.993	0.993	0.996
0.20	0.960	0.966	0.969	0.972	0.974	0.976	0.985
0.40	0.886	0.899	0.908	0.916	0.922	0.926	0.953
0.60	0.818	0.834	0.847	0.857	0.866	0.873	0.917
0.80	0.764	0.781	0.795	0.807	0.817	0.826	0.883
1.00	0.723	0.740	0.754	0.766	0.777	0.786	0.852
2.00	0.622	0.633	0.643	0.653	0.662	0.670	0.747

^aFox (1948), según Bowles (1987)

Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

2.2.2 Asentamiento de suelo arenoso. Uso del factor de influencia de la deformación unitaria. El asentamiento de suelos granulares también se evalúa usando un factor de influencia de la deformación unitaria semi-empírico propuesto por Schmertmann y Hartman (1978). Según este método, el asentamiento es:

$$S_s = C_1 C_2 (\bar{q} - q) \sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} * \Delta z$$

Dónde:

I_z = factor de influencia de la deformación unitaria

C_1 = un factor de correlación para la profundidad del empotramiento de la cimentación = $1 - 0.5 [q / (\bar{q} - q)]$

C_2 = un factor de corrección para tomar en cuenta el flujo plástico en el suelo $1 + 0.2 \log (\text{tiempo en años}/0.1)$

\bar{q} = esfuerzo al nivel de la cimentación

$q = \gamma D_f$

La variación del factor de influencia de la deformación unitaria con la profundidad debajo de la cimentación lo muestra la figura 3. Observar que, para cimentaciones cuadradas o circulares,

$I_z = 0.1$ en $z = 0$

$I_z = 0.5$ en $z = z_1 = 0.5B$

$I_z = 0$ en $z = z_2 = 2B$

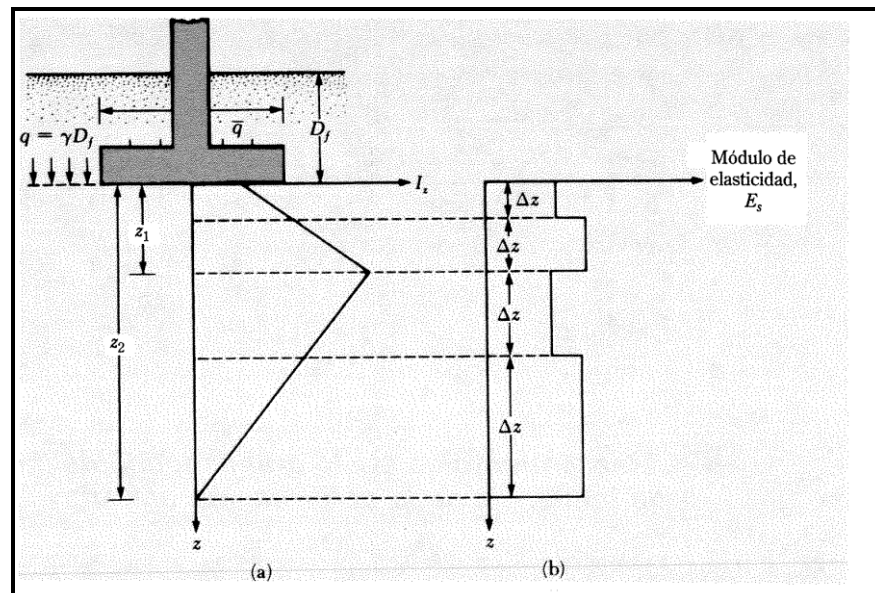
Similarmente, para cimentaciones con $L/B \geq 10$,

$I_z = 0.2$ en $z = 0$

$I_z = 0.5$ en $z = z_1 = B$

$I_z = 0$ en $z = z_2 = 4B$

Figura 3. Cálculo del asentamiento elástico usando el factor de influencia de la deformación unitaria.



Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

Donde B = ancho de la cimentación y L = longitud de la cimentación

Puede interpolarse los valores de L/B entre 1 y 10.

Para usar la ecuación de asentamiento propuesta por (Schmertmann y Hartman 1978), se requiere primero la evaluación de la variación aproximada del módulo de elasticidad con la profundidad (figura 3). La evaluación puede realizarse con los números de penetración estándar o resistencias de penetración de cono. El suelo se divide en varios estratos hasta una profundidad de $z = z_2$, y se calcula el asentamiento elástico de cada una. La suma de los asentamientos de todos los estratos es igual a S_e .

2.3 RANGO DE LOS PARÁMETROS DEL MATERIAL PARA CALCULAR ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS.

Las secciones anteriores, se presentaron las ecuaciones para calcular el asentamiento elástico de cimentaciones, que contienen los parámetros elásticos, tales como E_s y μ_s . Si los resultados de pruebas de laboratorio para esos parámetros no están disponibles, deben hacerse varias hipótesis realistas. La tabla 4, muestra el rango aproximado de los parámetros elásticos para diferentes suelos.

Tabla 4. Parámetros elásticos para diferentes suelos

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad, E_s		Relación de Poisson, μ_s
	MN/m ²	lb/pulg ²	
Arena suelta	10.5-24.0	1 500-3 500	0.20-0.40
Arena densa media	17.25-27.60	2 500-4 000	0.25-0.40
Arena densa	34.50-55.20	5 000-8 000	0.30-0.45
Arena limosa	10.35-17.25	1 500-2 500	0.20-0.40
Arena y grava	69.00-172.50	10 000-25 000	0.15-0.35
Arcilla suave	4.1-20.7	600-3 000	
Arcilla media	20.7-41.4	3 000-6 000	0.20-0.50
Arcilla firme	41.4-96.6	6 000-14 000	

Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

Varios investigadores correlacionan los valores del módulo de elasticidad E_s , con el número de penetración estándar en campo, N_{60} y con la resistencia a la penetración de cono, q_c , Mitchell y Gardner (1975) compilaron una lista de esas correlaciones. Schmertmann (1970) indicó que el módulo de elasticidad de la arena se da por:

$$\frac{E_s}{P_a} = 8N_{60}$$

Donde:

N_{60} = Resistencia a la penetración estándar

P_a = Presión atmosférica ~ 100kN/m² (~2000lb/pie²)

Del mismo modo,

$$E_s = 2q_c$$

Donde q_c = resistencia a la penetración estática de cono

Schmertmann y Harman (1978) sugirieron además que la siguiente correlación se puede usar con los factores de influencia de deformación unitaria.

$$E_s = 2.5q_c \quad (\text{para cimentaciones cuadradas y circulares}) \quad \text{y}$$

$$E_s = 3.5q_c \quad (\text{para cimentaciones corridas})$$

2.4 INCREMENTO DEL ESFUERZOS VERTICAL EN UNA MASA DE SUELO CAUSADO POR CARGA DE CIMENTACIÓN.

2.4.1 Esfuerzo debajo de un área rectangular. El procedimiento de integración de la ecuación de Boussinesq, también permite la evaluación del esfuerzo vertical en cualquier punto A, debajo de una esquina de una superficie flexible rectangular cargada. Para esto, se considera una área elemental $dA = dx dy$ sobre la superficie cargada. Si la carga por unidad de área es q_0 la carga total sobre el área elemental es:

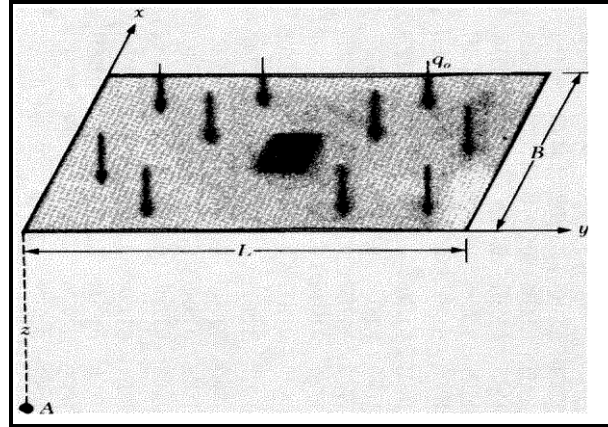
$$dP = q_0 dx dy$$

Esta carga elemental dP , puede tratarse como una carga puntual. El incremento del esfuerzo vertical en el punto A, causado por dP puede ser evaluada usando la ecuación anterior. Sin embargo, observe la necesidad de sustituir $dP = q_0 dx dy$ por P , y x^2+y^2 por r^2 en esa ecuación. Entonces

$$\text{El incremento del esfuerzo en A causado por } dP = \frac{3q_0(dx dy)z^3}{2\pi(x^2+y^2+z^2)^{\frac{5}{2}}}$$

El incremento total del esfuerzo $\Delta\sigma$ causado por el área total cargada en el punto A, se obtiene ahora integrando la ecuación anterior:

Figura 4. Determinación del esfuerzo debajo de una esquina de una superficie flexible rectangular cargada



Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

$$\Delta\sigma = \int_{y=0}^L \int_{x=0}^B \frac{3q_0(dx dy)z^3}{(x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{5}{2}}} = q_0 I$$

Aquí,

$I =$ factor de influencia

$$= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \cdot \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 - m^2n^2} \right)$$

Cuando $m^2 + n^2 + 1 < m^2n^2$, el argumento de \tan^{-1} es negativo. En ese caso,

$I =$ factor de influencia

$$= \frac{1}{4\pi} \left(\frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2n^2 + 1} \cdot \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \pi + \tan^{-1} \frac{2mn\sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 - m^2n^2} \right)$$

Donde $m = \frac{B}{z}$ y $n = \frac{L}{z}$

Las variaciones de los valores de influencia con m y n se dan en las tablas 5 y 6.

Tabla 5. Variación del valor del factor de influencia, I

m	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4
0.1	0.00470	0.00917	0.01323	0.01678	0.01978	0.02223	0.02420	0.02576	0.02698	0.02794	0.02926	0.03007
0.2	0.00917	0.01790	0.02585	0.03280	0.03866	0.04348	0.04735	0.05042	0.05283	0.05471	0.05733	0.05894
0.3	0.01323	0.02585	0.03735	0.04742	0.05593	0.06294	0.06858	0.07308	0.07661	0.07938	0.08323	0.08561
0.4	0.01678	0.03280	0.04742	0.06024	0.07111	0.08009	0.08734	0.09314	0.09770	0.10129	0.10631	0.10941
0.5	0.01978	0.03866	0.05593	0.07111	0.08403	0.09473	0.10340	0.11035	0.11584	0.12018	0.12626	0.13003
0.6	0.02223	0.04348	0.06294	0.08009	0.09473	0.10688	0.11679	0.12474	0.13105	0.13605	0.14309	0.14749
0.7	0.02420	0.04735	0.06858	0.08734	0.10340	0.11679	0.12772	0.13653	0.14356	0.14914	0.15703	0.16199
0.8	0.02576	0.05042	0.07308	0.09314	0.11035	0.12474	0.13653	0.14607	0.15371	0.15978	0.16843	0.17389
0.9	0.02698	0.05283	0.07661	0.09770	0.11584	0.13105	0.14356	0.15371	0.16185	0.16835	0.17766	0.18357
1.0	0.02794	0.05471	0.07938	0.10129	0.12018	0.13605	0.14914	0.15978	0.16835	0.17522	0.18508	0.19139
1.2	0.02926	0.05733	0.08323	0.10631	0.12626	0.14309	0.15703	0.16843	0.17766	0.18508	0.19584	0.20278
1.4	0.03007	0.05894	0.08561	0.10941	0.13003	0.14749	0.16199	0.17389	0.18357	0.19139	0.20278	0.21020
1.6	0.03058	0.05994	0.08709	0.11135	0.13241	0.15028	0.16515	0.17739	0.18737	0.19546	0.20731	0.21510
1.8	0.03090	0.06058	0.08804	0.11260	0.13395	0.15207	0.16720	0.17967	0.18986	0.19814	0.21032	0.21836
2.0	0.03111	0.06100	0.08867	0.11342	0.13496	0.15326	0.16856	0.18119	0.19152	0.19994	0.21235	0.22058
2.5	0.03138	0.06155	0.08948	0.11450	0.13628	0.15483	0.17036	0.18321	0.19375	0.20236	0.21512	0.22364
3.0	0.03150	0.06178	0.08982	0.11495	0.13684	0.15550	0.17113	0.18407	0.19470	0.20341	0.21633	0.22499
4.0	0.03158	0.06194	0.09007	0.11527	0.13724	0.15598	0.17168	0.18469	0.19540	0.20417	0.21722	0.22600
5.0	0.03160	0.06199	0.09014	0.11537	0.13737	0.15612	0.17185	0.18488	0.19561	0.20440	0.21749	0.22632
6.0	0.03161	0.06201	0.09017	0.11541	0.13741	0.15617	0.17191	0.18496	0.19569	0.20449	0.21760	0.22644
8.0	0.03162	0.06202	0.09018	0.11543	0.13744	0.15621	0.17195	0.18500	0.19574	0.20455	0.21767	0.22652
10.0	0.03162	0.06202	0.09019	0.11544	0.13745	0.15622	0.17196	0.18502	0.19576	0.20457	0.21769	0.22654
∞	0.03162	0.06202	0.09019	0.11544	0.13745	0.15623	0.17197	0.18502	0.19577	0.20458	0.21770	0.22656

Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

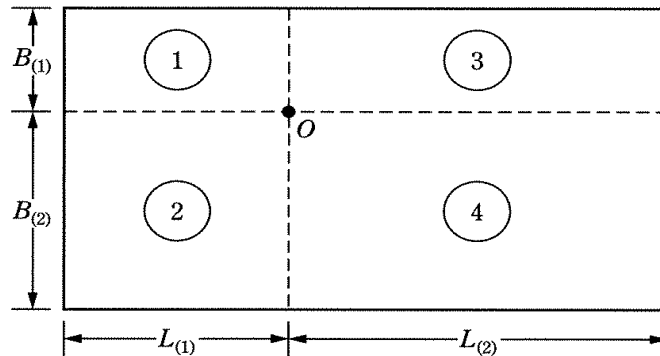
Tabla 6. (Continuación)

m	n											
	1.6	1.8	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0	6.0	8.0	10.0	∞	
0.1	0.03058	0.03090	0.03111	0.03138	0.03150	0.03158	0.03160	0.03161	0.03162	0.03162	0.03162	0.03162
0.2	0.05994	0.06058	0.06100	0.06155	0.06178	0.06194	0.06199	0.06201	0.06202	0.06202	0.06202	0.06202
0.3	0.08709	0.08804	0.08867	0.08948	0.08982	0.09007	0.09014	0.09017	0.09018	0.09019	0.09019	0.09019
0.4	0.11135	0.11260	0.11342	0.11450	0.11495	0.11527	0.11537	0.11541	0.11543	0.11544	0.11544	0.11544
0.5	0.13241	0.13395	0.13496	0.13628	0.13684	0.13724	0.13737	0.13741	0.13744	0.13745	0.13745	0.13745
0.6	0.15028	0.15207	0.15326	0.15483	0.15550	0.15598	0.15612	0.15617	0.15621	0.15622	0.15623	0.15623
0.7	0.16515	0.16720	0.16856	0.17036	0.17113	0.17168	0.17185	0.17191	0.17195	0.17196	0.17197	0.17197
0.8	0.17739	0.17967	0.18119	0.18321	0.18407	0.18469	0.18488	0.18496	0.18500	0.18502	0.18502	0.18502
0.9	0.18737	0.18986	0.19152	0.19375	0.19470	0.19540	0.19561	0.19569	0.19574	0.19576	0.19577	0.19577
1.0	0.19546	0.19814	0.19994	0.20236	0.20341	0.20417	0.20440	0.20449	0.20455	0.20457	0.20458	0.20458
1.2	0.20731	0.21032	0.21235	0.21512	0.21633	0.21722	0.21749	0.21760	0.21767	0.21769	0.21770	0.21770
1.4	0.21510	0.21836	0.22058	0.22364	0.22499	0.22600	0.22632	0.22644	0.22652	0.22654	0.22656	0.22656
1.6	0.22025	0.22372	0.22610	0.22940	0.23088	0.23200	0.23236	0.23249	0.23258	0.23261	0.23263	0.23263
1.8	0.22372	0.22736	0.22986	0.23334	0.23495	0.23617	0.23656	0.23671	0.23681	0.23684	0.23686	0.23686
2.0	0.22610	0.22986	0.23247	0.23614	0.23782	0.23912	0.23954	0.23970	0.23981	0.23985	0.23987	0.23987
2.5	0.22940	0.23334	0.23614	0.24010	0.24196	0.24344	0.24392	0.24412	0.24425	0.24429	0.24432	0.24432
3.0	0.23088	0.23495	0.23782	0.24196	0.24394	0.24554	0.24608	0.24630	0.24646	0.24650	0.24654	0.24654
4.0	0.23200	0.23617	0.23912	0.24344	0.24554	0.24729	0.24791	0.24817	0.24836	0.24842	0.24846	0.24846
5.0	0.23236	0.23656	0.23954	0.24392	0.24608	0.24791	0.24857	0.24885	0.24907	0.24914	0.24919	0.24919
6.0	0.23249	0.23671	0.23970	0.24412	0.24630	0.24817	0.24885	0.24916	0.24939	0.24946	0.24952	0.24952
8.0	0.23258	0.23681	0.23981	0.24425	0.24646	0.24836	0.24907	0.24939	0.24964	0.24973	0.24980	0.24980
10.0	0.23261	0.23684	0.23985	0.24429	0.24650	0.24842	0.24914	0.24946	0.24973	0.24981	0.24989	0.24989
∞	0.23263	0.23686	0.23987	0.24432	0.24654	0.24846	0.24919	0.24952	0.24980	0.24989	0.25000	0.25000

^aSegún Newmark (1935)

Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

Figura 5. Esfuerzo debajo de cualquier punto de una superficie flexible rectangular cargada.



Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

Para determinar el esfuerzo a la profundidad z debajo del punto O, se divide la superficie cargada en cuatro rectángulos. El punto O, es la esquina común a cada rectángulo. Luego se usa la ecuación para calcular el incremento del esfuerzo a la profundidad z , debajo del punto O causado por cada superficie rectangular. El incremento total de esfuerzo causado por toda la superficie cargada se expresa ahora como:

$$\Delta\sigma = q_o (I_1 + I_2 + I_3 + I_4)$$

Dónde: $I_1 + I_2 + I_3 + I_4$ = los valores de influencia de los rectángulo 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

En la mayoría de los casos, el esfuerzo vertical debajo del centro de una superficie rectangular es de importancia, y se da por la siguiente relación:

$$\Delta\sigma = q_o I_c$$

Dónde:

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left[\frac{m_1 n_1}{\sqrt{1 + m_1^2 + n_1^2}} \cdot \frac{1 + m_1^2 + 2n_1^2}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right) \right]$$

$$m_1 = \frac{L}{B}$$

$$n_1 = \frac{z}{\left(\frac{B}{2}\right)}$$

La variación de I_c con m_1 y n_1 se da en la tabla 7.

Los ingenieros en cimentaciones usan a menudo un método aproximado para determinar el incremento del esfuerzo con la profundidad causado por la construcción de una cimentación, denominado método 2:1. Según éste, el incremento del esfuerzo a la profundidad z es:

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

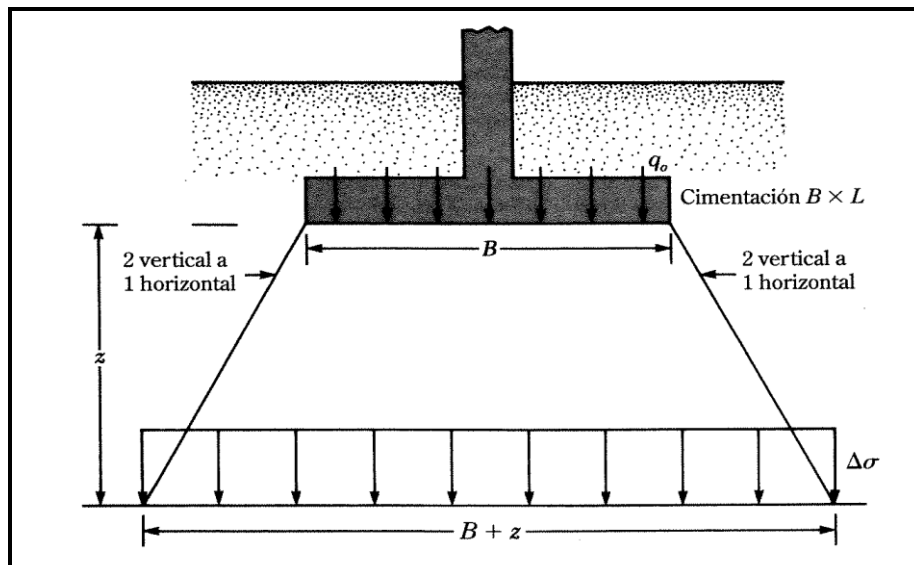
Observe que la ecuación se basa en la hipótesis de que el esfuerzo se dispersa desde la cimentación a lo largo de líneas con una pendiente de 2 vertical a 1 horizontal.

Tabla 7. Variación de I_c con m_1 y n_1

n_1	m_1									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.20	0.994	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997	0.997
0.40	0.960	0.976	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977	0.977
0.60	0.892	0.932	0.936	0.936	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937	0.937
0.80	0.800	0.870	0.878	0.880	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881	0.881
1.00	0.701	0.800	0.814	0.817	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818	0.818
1.20	0.606	0.727	0.748	0.753	0.754	0.755	0.755	0.755	0.755	0.755
1.40	0.522	0.658	0.685	0.692	0.694	0.695	0.695	0.696	0.696	0.696
1.60	0.449	0.593	0.627	0.636	0.639	0.640	0.641	0.641	0.641	0.642
1.80	0.388	0.534	0.573	0.585	0.590	0.591	0.592	0.592	0.593	0.593
2.00	0.336	0.481	0.525	0.540	0.545	0.547	0.548	0.549	0.549	0.549
3.00	0.179	0.293	0.348	0.373	0.384	0.389	0.392	0.393	0.394	0.395
4.00	0.108	0.190	0.241	0.269	0.285	0.293	0.298	0.301	0.302	0.303
5.00	0.072	0.131	0.174	0.202	0.219	0.229	0.236	0.240	0.242	0.244
6.00	0.051	0.095	0.130	0.155	0.172	0.184	0.192	0.197	0.200	0.202
7.00	0.038	0.072	0.100	0.122	0.139	0.150	0.158	0.164	0.168	0.171
8.00	0.029	0.056	0.079	0.098	0.113	0.125	0.133	0.139	0.144	0.147
9.00	0.023	0.045	0.064	0.081	0.094	0.105	0.113	0.119	0.124	0.128
10.00	0.019	0.037	0.053	0.067	0.079	0.089	0.097	0.103	0.108	0.112

Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

Figura 6. Método 2:1 para encontrar el incremento de esfuerzo debajo de una cimentación



Fuente: principio de ingeniería de cimentaciones (Braja M. Das)

2.5 INFORMACIÓN DEL SOFTWARE UTILIZADO PLAXIS.

PLAXIS 3D es un paquete de elementos finitos destinado a tres dimensiones de análisis de la deformación y la estabilidad en la ingeniería geotécnica. Está equipado con funciones que se ocupan de diversos aspectos de las complejas estructuras geotécnicas y procesos constructivos utilizando sólidos y teóricamente los procedimientos de cálculo de sonido.

Con PLAXIS 3D, la geometría compleja de las estructuras del suelo y se puede definir en dos modos diferentes. Estos modos se definen específicamente para suelo o el modelado estructural.

El modo de etapas construcción permite una simulación realista de los procesos de construcción y excavación mediante la activación y desactivación de agrupaciones de volumen del suelo y los objetos estructurales, la aplicación de las cargas, y el cambio de los niveles freáticos, etc.

La salida consiste en un conjunto completo de herramientas de visualización, para comprobar los detalles de la compleja estructura interna de un completo 3D suelo-estructura del modelo.

PLAXIS 3D, es un programa fácil de usar que ofrece geotecnia 3D, geometría flexible e interoperable, la simulación realista de las etapas de construcción, un núcleo de cálculo robusto, fiable, amplio y detallado, post-procesamiento, por lo que es una solución completa para el diseño de un diario análisis geotécnico.

2.5.1 Plaxis 3D foundation. Es un paquete de elementos finitos destinado al análisis de la deformación tridimensional de estructuras de cimentación.

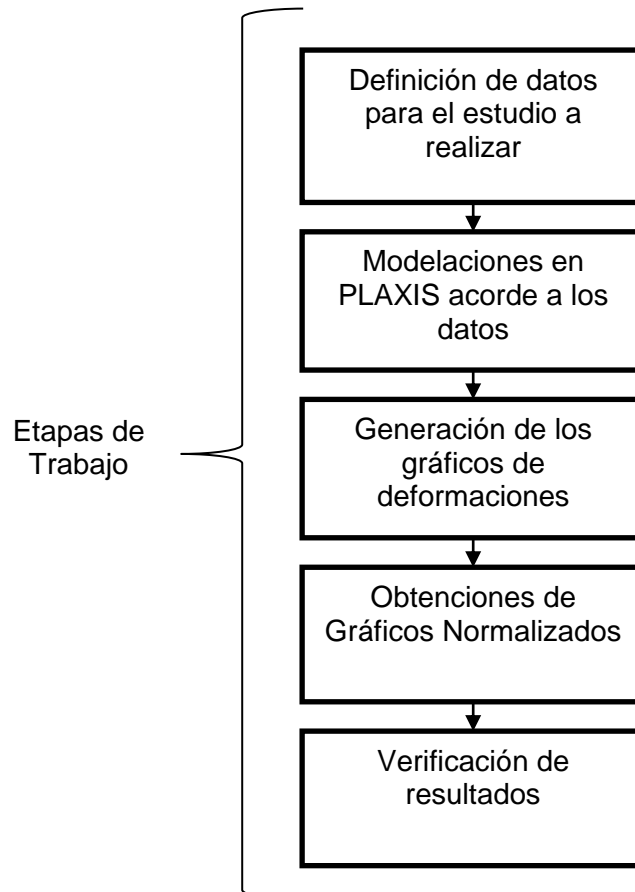
Cimientos constituyen la interacción entre una estructura superior y el suelo. Los asentamientos dependerá de las condiciones locales del suelo y en del método de construcción.

Especialmente para cimentaciones plataforma - pilote hay una importante interacción entre el pilote, la plataforma y el suelo para soportar las fuerzas de la estructura superior. En esta interacción las deformaciones son un factor clave. Esta situación sólo se puede analizar efectivamente por medio de cálculos tridimensionales de elementos finitos en el que se incorporan los modelos adecuados para simular el comportamiento del suelo e interacción suelo-estructura.

3. METODOLOGÍA DE CÁLCULO

3.1 DIAGRAMA DE TRABAJO.

Figura 7. Diagrama de trabajo



Fuente: autores del proyecto

3.2 CALCULO DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS MEDIANTE PLAXIS.

Se generaran gráficos normalizados para el cálculo de asentamientos inmediatos en arenas acorde a los datos tomados a partir de las sugerencias dadas en algunos libros para estas, y se realizaran las respectivas modelaciones en PLAXIS teniendo en cuenta que se trabajaran tres parámetros los cuales son: Modulo de

Young, Coeficiente de Poisson y la Carga aplicada sobre un cimiento cuadrado de 3x3. Los datos de deformaciones generados por PLAXIS se compararán con las metodologías tradicionales, verificando que el error este dentro de los parámetros admisibles, luego se procederá a generar los respectivos ábacos. Además se verificaran los esfuerzos con el fin de que este también sea un dato comparativo entre PLAXIS y los métodos teóricos.

3.2.1 Datos para modelaciones en plaxis. A continuación se muestran las tablas sugerencias en algunos libros, con base en las cuales se tomaron algunos datos para las modelaciones en PLAXIS.

Tabla 8. Valores de peso volumétrico

<i>Descripción del suelo</i>	<i>Pesos volumétricos</i>		
	<i>Seco</i>	<i>Saturado</i>	<i>Sumergido</i>
	γ_s , en Tm/m ³	γ_{sat} , en Tm/m ³	γ_{sum} , en Tm/m ³
Grava húmeda	1.70	2.00	1.00
Arena uniforme suelta	1.43	1.89	0.89
Arena uniforme densa	1.75	2.09	1.09
Arena graduada suelta	1.59	1.99	0.99
Arena graduada densa	1.89	2.16	1.16
Material de acarreo, muy bien graduado	2.12	2.32	1.32
Arcilla suave		1.77	0.77
Arcilla rígida		2.07	1.07
Arcilla orgánica suave		1.58	0.58
Arcilla orgánica muy suave	1.	1.43	0.43
Bentonita suave		1.27	0.27

Fuente: mecánica de suelos y cimentaciones. Crespo Villalaz

Tabla 9. Relaciones aproximadas y del ángulo de fricción interna para arenas

N_{corr}	En arenas		ϕ Ángulo de fricción interna	$E \text{ kg/cm}^2$
	Descripción	Compacidad relativa		
0 — 4	Muy floja	0 — 15 %	28°	100
5 — 10	Floja	16 — 35 %	28 — 30	100 — 250
11 — 30	Media	36 — 65 %	30 — 36	250 — 500
31 — 50	Densa	66 — 85 %	36 — 41	500 — 1000
> 50	Muy densa	86 — 100 %	> 41	> 1000

Fuente: mecánica de suelos y cimentaciones. Crespo Villalaz

Tabla 10. Peso específico seco para algunos suelos

Tipo de suelo	Relación de vacíos e	Contenido de agua natural en condición saturada (%)	Peso específico seco, γ_d	
			(kN/m ³)	(lb/pie ³)
Arena uniforme suelta	0.8	30	14.5	92
Arena uniforme densa	0.45	16	18	115
Arena limosa suelta de grano anguloso	0.65	25	16	102
Arena limosa densa de grano anguloso	0.4	15	19	120
Arcilla dura	0.6	21	17	108
Arcilla blanda	0.9-1.4	30-50	11.5-14.5	73-92
Loess	0.9	25	13.5	86
Arcilla orgánica blanda	2.5-3.2	90-120	6-8	38-51
Depósito glacial	0.3	10	21	134

Fuente: Principio de ingeniería de Cimentaciones – Braja M. Das

Tabla 11. Parámetros Elásticos para diferentes suelos.

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad, E_s		Relación de Poisson, μ_s
	MN/m ²	lb/pulg ²	
Arena suelta	10.5-24.0	1 500-3 500	0.20-0.40
Arena densa media	17.25-27.60	2 500-4 000	0.25-0.40
Arena densa	34.50-55.20	5 000-8 000	0.30-0.45
Arena limosa	10.35-17.25	1 500-2 500	0.20-0.40
Arena y grava	69.00-172.50	10 000-25 000	0.15-0.35
Arcilla suave	4.1-20.7	600-3 000	
Arcilla media	20.7-41.4	3 000-6 000	0.20-0.50
Arcilla firme	41.4-96.6	6 000-14 000	

Fuente: principio de ingeniería de Cimentaciones – Braja M. Das

A partir de las tablas anteriores se establecieron los respectivos parámetros y demás valores para las modelaciones en PLAXIS.

Tabla 12. Datos arena suelta

Modelo Material	Elástico-Lineal	
Tipo de Material	Drenado	
$\gamma_{no\ sat}$	15	[KN/m ³]
γ_{sat}	19	[KN/m ³]
k_x	1	[m/dia]
k_y	1	[m/dia]
k_z	1	[m/dia]
E	15000	[KN/m ²]
μ	0.0-0.49	

Fuente: autores del Proyecto

Tabla 13. Datos arena densa media

Modelo Material	Elástico-Lineal	
Tipo de Material	Drenado	
$\gamma_{no\ sat}$	17	[KN/m ³]
γ_{sat}	20	[KN/m ³]
k_x	1	[m/dia]
k_y	1	[m/dia]
k_z	1	[m/dia]
E	25000	[KN/m ²]
μ	0.0-0.49	

Fuente: autores del Proyecto

Tabla 14. Datos arena densa

Modelo Material	Elástico-Lineal	
Tipo de Material	Drenado	
$\gamma_{no\ sat}$	17	[KN/m ³]
γ_{sat}	20	[KN/m ³]
k_x	1	[m/dia]
k_y	1	[m/dia]
k_z	1	[m/dia]
E	35000	[KN/m ²]
μ	0.0-0.49	

Fuente: autores del Proyecto

Tabla 15. Datos Zapata

Modelo Material	Lineal	
Tipo de Material	Isotrópico	
f'c	21	[Mpa]
E	17872045.21	[KN/m ²]
γ	24	[KN/m ³]
B	3	[m]
L	3	[m]
d	0.5	[m]
μ	0.2	

Fuente: autores del Proyecto

Dónde:

γ_{no sat} = Peso Específico no Saturado.

γ_{sat} = Peso Específico Saturado.

γ = Peso Específico.

k_x = Permeabilidad en x.

k_y = Permeabilidad en y.

k_z = Permeabilidad en z.

E = Modulo de Elasticidad.

μ = Coeficiente de Poisson.

f'c = Esfuerzo del concreto.

B = Base de la zapata.

L = Longitud de la zapata.

d = Espesor de la Zapata.

Con los datos establecidos anteriormente se procede a realizar las modelaciones en PLAXIS 3D Foundation, teniendo en cuenta que para cada tipo de arena se debe realizar 18 modelaciones, es decir, variando el Coeficiente de Poisson y teniendo en cuenta las tres relaciones de “Modulo de Elasticidad/Carga” ($E/q_0=100, 150$ y 200), para un total de 54 modelaciones.

Para ver el proceso de modelamiento en PLAXIS se anexa un ejercicio paso a paso para obtener tanto la curva de Esfuerzos como la de Deformación. Ver Anexo A.

Una vez realizados los diferentes modelos en PLAXIS, es necesario tabular de cada uno de éstos datos de deformación con respecto a la profundidad, con el fin de verificar el margen de error de deformación entre cada uno de los tipos de arenas, para así proceder a realizar los ábacos.

Para poder realizar los ábacos es necesario que los parámetros para graficar estén normalizados. Conociendo los diferentes datos necesarios para la modelaciones en PLAXIS 3D Foundation, se establece las siguientes relaciones para generar las gráficas normalizadas.

Para el eje Y: se establece la relación $\frac{Z}{B}$ la cual cumple que sea adimensional.

Para el eje X: se establece la relación $\frac{S \cdot E}{q_0 \cdot B}$ la cual cumple que sea adimensional.

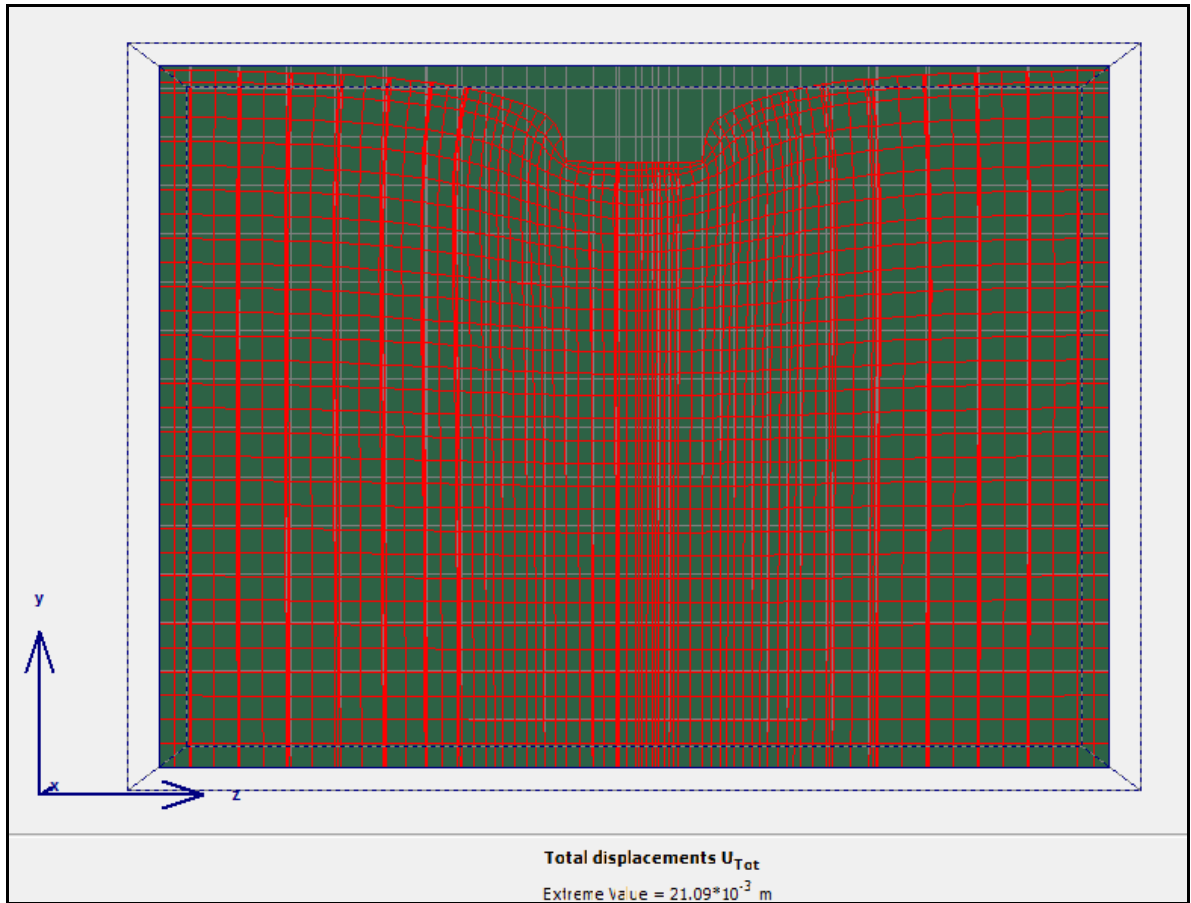
Ahora con estos dos parámetros se genera el ábaco para el cálculo de asentamientos en arenas.

A continuación se mostrara el procedimiento realizado para obtener 1 de los 6 ábacos, los cuales fueron generados clasificándolos según los Coeficientes de Poisson y los datos graficados se generaron de acuerdo a las diferentes relaciones de E/q_0 .

3.2.2 PROCESO DE OBTENCIÓN DEL ÁBACO $\mu = 0.3$

a. Una vez establecidos los valores del modelo a realizar en PLAXIS y realizados los cálculos, se procede a visualizar los resultados obtenidos que interesan para este caso como es el grafico de deformaciones.

Figura 8. Sección transversal de deformaciones



Fuente: PLAXIS

b. Extracción de datos de PLAXIS. A partir del gráfico de deformaciones se extraen los resultados que se visualizan a través de una tabla, el cual se debe ajustar para para poder obtener los datos debajo de la placa y en el punto medio de esta.

Tabla 16. Datos extraídos de PLAXIS relación $E/q_0=100$

Profundidad Z [m]	Asentamiento S [m]
0.0	0.01917
1.0	0.01502
2.0	0.01126
3.0	0.00848
4.0	0.00650
5.0	0.00506
6.0	0.00399
7.0	0.00317
8.0	0.00252
9.0	0.00198
10.0	0.00154
11.0	0.00115
12.0	0.00081
13.0	0.00051
14.0	0.00024
15.0	0.00000

Fuente: PLAXIS

Tabla 17. Datos extraídos de PLAXIS relación $E/q_0=150$

Profundidad Z [m]	Asentamiento S [m]
0.0	0.01308
1.0	0.01025
2.0	0.00768
3.0	0.00578
4.0	0.00443
5.0	0.00345
6.0	0.00272
7.0	0.00216
8.0	0.00172
9.0	0.00135

10.0	0.00105
11.0	0.00079
12.0	0.00055
13.0	0.00035
14.0	0.00016
15.0	0.00000

Fuente: PLAXIS

Tabla 18. Datos extraídos de PLAXIS relación $E/q_0=200$

Profundidad Z [m]	Asentamiento S [m]
0.0	0.01003
1.0	0.00786
2.0	0.00589
3.0	0.00443
4.0	0.00340
5.0	0.00265
6.0	0.00209
7.0	0.00166
8.0	0.00132
9.0	0.00104
10.0	0.00080
11.0	0.00060
12.0	0.00043
13.0	0.00027
14.0	0.00013
15.0	0.00000

Fuente: PLAXIS

c. Con las tablas anteriores y los datos de Carga, Modulo de Elasticidad y Base de la zapata se procede a calcular los parámetros antes mencionados para poder realizar la respectiva gráfica.

Datos para relación $E/q_0=100$

B	3	[m]
E	25000	[KN/m ²]
q₀	250	[KN/m ²]

Tabla 19. Datos para graficar curva normalizada $\mu = 0.3$ relación $E/q_0=100$

Z	S	Z/B	S*E/q ₀ *B
0.0	0.01917	0.0000	0.639
1.0	0.01502	0.3333	0.501
2.0	0.01126	0.6667	0.375
3.0	0.00848	1.0000	0.283
4.0	0.00650	1.3333	0.217
5.0	0.00506	1.6667	0.169
6.0	0.00399	2.0000	0.133
7.0	0.00317	2.3333	0.106
8.0	0.00252	2.6667	0.084
9.0	0.00198	3.0000	0.066
10.0	0.00154	3.3333	0.051
11.0	0.00115	3.6667	0.038
12.0	0.00081	4.0000	0.027
13.0	0.00051	4.3333	0.017
14.0	0.00024	4.6667	0.008
15.0	0.00000	5.0000	0.000

Fuente: autores del Proyecto

Datos para relación $E/q_0=150$

B	3	[m]
E	25000	[KN/m ²]
q₀	166.7	[KN/m ²]

Tabla 20. Datos para graficar curva normalizada $\mu = 0.3$ relación $E/q_0=150$

Z	S	Z/B	S*E/q ₀ *B
0.0	0.01308	0.0000	0.436
1.0	0.01025	0.3333	0.342
2.0	0.00768	0.6667	0.256
3.0	0.00578	1.0000	0.193
4.0	0.00443	1.3333	0.148
5.0	0.00345	1.6667	0.115
6.0	0.00272	2.0000	0.091
7.0	0.00216	2.3333	0.072
8.0	0.00172	2.6667	0.057
9.0	0.00135	3.0000	0.045
10.0	0.00105	3.3333	0.035

11.0	0.00079	3.6667	0.026
12.0	0.00055	4.0000	0.018
13.0	0.00035	4.3333	0.012
14.0	0.00016	4.6667	0.005
15.0	0.00000	5.0000	0.000

Fuente: autores del proyecto

Datos para relación $E/q_0=200$

B	3	[m]
E	25000	[KN/m ²]
q₀	125	[KN/m ²]

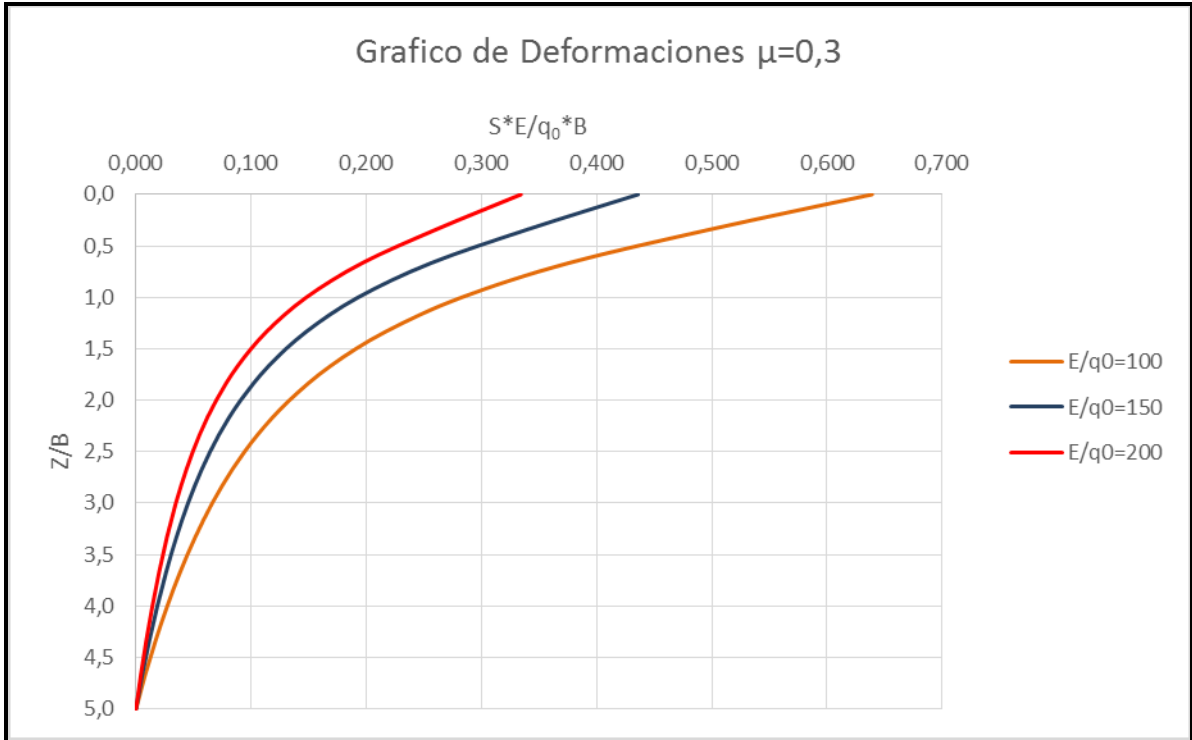
Tabla 21. Datos para graficar curva normalizada $\mu =0.3$ relación $E/q_0=200$

Z	S	Z/B	S*E/q₀*B
0.0	0.01003	0.0000	0.334
1.0	0.00786	0.3333	0.262
2.0	0.00589	0.6667	0.196
3.0	0.00443	1.0000	0.148
4.0	0.00340	1.3333	0.113
5.0	0.00265	1.6667	0.088
6.0	0.00209	2.0000	0.070
7.0	0.00166	2.3333	0.055
8.0	0.00132	2.6667	0.044
9.0	0.00104	3.0000	0.035
10.0	0.00080	3.3333	0.027
11.0	0.00060	3.6667	0.020
12.0	0.00043	4.0000	0.014
13.0	0.00027	4.3333	0.009
14.0	0.00013	4.6667	0.004
15.0	0.00000	5.0000	0.000

Fuente: autores del proyecto

Con las tablas anteriores y el software Excel se Grafica el respectivo ábaco de $\mu =0.3$

Gráfico 1. Abaco normalizado para $\mu = 0,3$



Fuente: autores del Proyecto

Todos los ábacos son calculados con el mismo procedimiento y pueden ser apreciados en el Anexo B.

3.3 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS MEDIANTE TEORÍAS TRADICIONALES.

3.3.1 Cálculo de asentamientos inmediatos mediante la teoría de la elasticidad. Con base en esta teoría se calculará el asentamiento y a continuación se hace la relación: para este caso los datos que se toman, son la arena media densas con una relación de Poisson de $\mu_s = 0,3$ y un Módulo de Elasticidad de $E=25000$ [kN/m²].

$$S_e = q_o (\alpha B') \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_s I_f$$

Dónde:

q_0 = Presión neta aplicada sobre la cimentación

μ_s = Relación de Poisson del suelo

E_s = Módulo de elasticidad promedio del suelo bajo la cimentación, medido de $z=0$ a $z=4B$

B' = $B/2$ para el centro de la cimentación

I_s = Factor de forma (Steinbrenner, 1934)

$$= F_1 + \frac{1-2\mu_s}{1-\mu_s} F_2$$

F_1 y F_2 , se calcula mediante la tabla 1.

I_f = Factor de profundidad (Fox, 1948) = $f\left(\frac{D_f}{B}, \mu_s, y, \frac{L}{S}\right)$

El factor de profundidad se calculara mediante la tabla 3.

α = Factor que depende de la posición de la cimentación donde el asentamiento está siendo calculado.

Para calcular el asentamiento en el centro de la cimentación, se usa:

$\alpha = 4$

$$m' = \frac{L}{B}$$

$$n' = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)}$$

Las variaciones de F_1 y F_2 , con m' y n' son dadas en la tabla 1. La variación de I_f con D_f/B y μ_s está dada en la tabla 1. Se observa que: $D_f = 0$, el valor de $I_f = 1$ en todos los casos.

Entonces se tendrá:

$q_0 = 250$ [kN/m²]

$\mu_s = 0.3$

$E_s = 25000$ [kN/m²]

$$B' = 1.5 \text{ [m]}$$

Iterando por medio de la tabla 1. Obteniendo valores de F_1 y F_2

$$m' = \frac{L}{B} = \frac{3}{3} = 1$$

$$n' = \frac{H}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{15}{\left(\frac{3}{2}\right)} = 10$$

$$F_1 = 0.49800$$

$$F_2 = 0.01600$$

Con estos valores se calcula con la fórmula I_s :

$$I_s = F_1 + \frac{1 - 2\mu_s}{1 - \mu_s} F_2$$

$$I_s = 0.49800 + \frac{1 - (2 \times 0.3)}{1 - (0.3)} \times 0.01600$$

$$I_s = 0.5071$$

De igual forma, por medio de la tabla 3, se obtiene una iteración el valor de I_f

$$\frac{L}{B} = \frac{3}{3} = 1$$

$$\frac{D_f}{B} = \frac{0.5}{3} = 0.1667$$

Como ya se mencionó con un Poisson $\mu_s = 0.3$, se tiene que $I_f = 0.9193$.

Para calcular el asentamiento en el centro de la cimentación, se usa $\alpha=4$

Teniendo todos los valores calculados el asentamiento por medio de la teoría de elasticidad será:

$$S_e = q_o (\alpha B') \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} I_s I_f$$

$$S_e = 250(4 \times 1.5) \frac{1 - 0.3^2}{25000} 0.5071 \times 0.9193$$

$$S_e = 0.02545 [m]$$

El asentamiento elástico de una cimentación rígida puede estimarse con:

$$S_{e(\text{rígido})} = 0.93 \times S_{e(\text{flexible, centro})}$$

$$S_{e(\text{rígido})} = 0.93 \times 0.02545$$

$$S_{e(\text{rígido})} = S = 0.02367 [m]$$

3.3.2 Cálculo de asentamientos de suelo arenoso: uso del factor de influencia de la deformación unitaria. Mediante la teoría de Schmertmann y Hartman (1978). Esa teoría dice que el cálculo de asentamiento se realiza por la siguiente ecuación:

$$S_e = C_1 C_2 (\bar{q} - q) \sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} * \Delta z$$

Dónde:

I_z = factor de influencia de la deformación unitaria

C_1 = un factor de correlación para la profundidad del empotramiento de la cimentación = $1 - 0.5 [q / (\bar{q} - q)]$

C_2 = un factor de corrección para tomar en cuenta el flujo plástico en el suelo $1 + 0.2 \log$ (tiempo en años/0.1)

\bar{q} = esfuerzo al nivel de la cimentación = q_o

q = γD_f

Se observa que, para cimentaciones cuadradas o circulares,

$$\begin{aligned}
 l_z = 0.1 & \quad \text{en} \quad z = 0 \\
 l_z = 0.5 & \quad \text{en} \quad z = z_1 = 0.5B \\
 l_z = 0 & \quad \text{en} \quad z = z_2 = 2B
 \end{aligned}$$

Se tiene:

$$q = YD_f = 17 \times 0.5 = 8.5 \left(\frac{kN}{m^2} \right)$$

$$\bar{q} = 250 \left(\frac{kN}{m^2} \right)$$

$$E_s = 25000 \left(\frac{kN}{m^2} \right)$$

$$C_1 = 1 - 0.5 \left[\frac{q}{(\bar{q} - q)} \right]$$

$$C_1 = 1 - 0.5 \left[\frac{8.5}{(250 - 8.5)} \right]$$

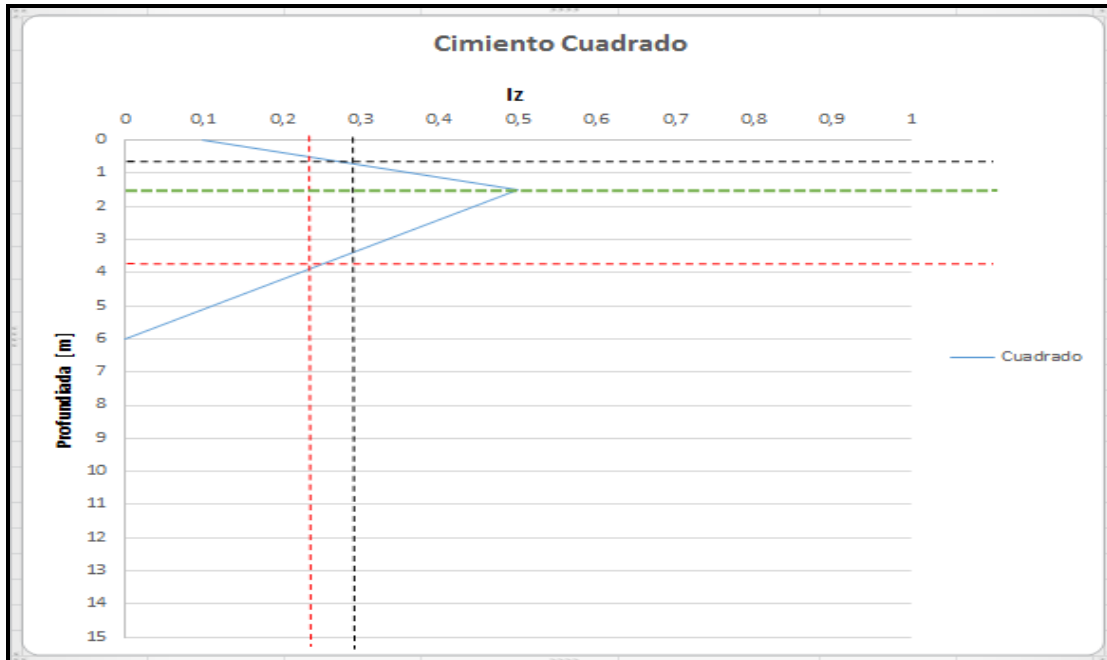
$$C_1 = 0.982$$

$$C_2 = 1 + 0.2 \times \log \left(\frac{t \text{ años}}{0.1} \right)$$

$$C_2 = 1 + 0.2 \times \log \left(\frac{2}{0.1} \right)$$

$$C_2 = 1.260$$

Gráfico 2. Variación del I_z con respecto a la profundidad



Fuente: autores del proyecto

Tabla 22. Calculo de la sumatoria $\sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} \Delta z$

Estrato	Δz	E_s	z centro Estrato	I_z centro Estrato	$(I_z/E_s)\Delta z$
1	1.5	25000	0.75	0.3	1.80E-05
2	4.5	25000	3.75	0.25	4.50E-05
				Σ	6.30E-05

Fuente: autores del proyecto

$$S_s = C_1 C_2 (\bar{q} - q) \sum_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} * \Delta z$$

$$S_s = 0.982 \times 1.260 \times (250 - 8.5) \sum_0^{z_2} 6.30 \times 10^{-5}$$

$$S_s = S = 0.01882 [m]$$

Después de realizar paso a paso los cálculos de asentamientos inmediatos, mediante una tabla se relacionaran los demás valores de asentamientos que puede generar una arena media densa cuando se varían los módulos de Poisson

y su relación de carga, recordar que este ejemplo se realizó para $\mu_s=0.3$ y una carga de $\bar{q} = 250$ [kN/m²].

De igual manera se encontrara en la tabla los demás tipos de arena, la arena suelta, la arena media densa y la densa, y de cada una de ellas su respectiva variación del módulo de Poisson y de carga.

3.4. TABLAS COMPARATIVAS DE CALCULO DE ASENTAMIENTOS

Tabla23. Asentamientos de arena suelta

Relación de Poisson = 0.0 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	150	15000	0.02442	0.01836	0.01993
150	100	15000	0.01628	0.01174	0.01378
200	75	15000	0.01221	0.00844	0.01070

Relación de Poisson = 0.1 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	150	15000	0.02466	0.01836	0.02032
150	100	15000	0.01644	0.01174	0.01405
200	75	15000	0.01233	0.00844	0.01091

Relación de Poisson = 0.2 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	150	15000	0.02446	0.01836	0.02027
150	100	15000	0.01631	0.01174	0.01401
200	75	15000	0.01223	0.00844	0.01089

Relación de Poisson = 0.3 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	150	15000	0.02367	0.01836	0.01968
150	100	15000	0.01578	0.01174	0.01360
200	75	15000	0.01184	0.00844	0.01057

Relación de Poisson = 0.4 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	Se Teoría Elasticidad	Se 'Schmertmann y Hartman'	Se PLAXIS
100	150	15000	0.02231	0.01836	0.01839
150	100	15000	0.01487	0.01174	0.01271
200	75	15000	0.01116	0.00844	0.00988

Relación de Poisson = 0.5 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	150	15000	0.02020	0.01836	0.01625
150	100	15000	0.01347	0.01174	0.01124
200	75	15000	0.01010	0.00844	0.00873

Fuente: autores del proyecto

Tabla 24. Asentamientos de arena densa media

Relación de Poisson = 0.0 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	250	25000	0.02442	0.01884	0.01940
150	166.7	25000	0.01628	0.01222	0.01323
200	125	25000	0.01221	0.00891	0.01015

Relación de Poisson = 0.1 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	250	25000	0.02466	0.01884	0.01979
150	166.7	25000	0.01645	0.01222	0.01350
200	125	25000	0.01233	0.00891	0.01035

Relación de Poisson = 0.2 = μ_s					
Rel. E/ q_0	q_0	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	250	25000	0.02446	0.01884	0.01974
150	166.7	25000	0.01631	0.01222	0.01347
200	125	25000	0.01223	0.00891	0.01032

Relación de Poisson = 0.3 = μ_s					
Rel. E/ q_0	q_0	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	250	25000	0.02367	0.01884	0.01917
150	166.7	25000	0.01579	0.01222	0.01308
200	125	25000	0.01184	0.00891	0.01003

Relación de Poisson = 0.4 = μ_s					
Rel. E/ q_0	q_0	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	250	25000	0.02231	0.01884	0.01793
150	166.7	25000	0.01488	0.01222	0.01223
200	125	25000	0.01116	0.00891	0.00938

Relación de Poisson = 0.5 = μ_s					
Rel. E/ q_0	q_0	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	250	25000	0.02020	0.01884	0.01587
150	166.7	25000	0.01347	0.01222	0.01083
200	125	25000	0.01010	0.00891	0.00830

Fuente: autores del proyecto

Tabla 25. Asentamientos de arena densa

Relación de Poisson = 0.0 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	S PLAXIS
100	350	35000	0.02442	0.01913	0.01921
150	233.4	35000	0.01628	0.01251	0.01302
200	175	35000	0.01221	0.00920	0.00992

Relación de Poisson = 0.1 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	Se PLAXIS
100	350	35000	0.02466	0.01913	0.01959
150	233.4	35000	0.01645	0.01251	0.01328
200	175	35000	0.01233	0.00920	0.01018

Relación de Poisson = 0.2 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	Se PLAXIS
100	350	35000	0.02447	0.01913	0.01955
150	233.4	35000	0.01632	0.01251	0.01325
200	175	35000	0.01223	0.00920	0.01010

Relación de Poisson = 0.3 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	Se PLAXIS
100	350	35000	0.02367	0.01913	0.01900
150	233.4	35000	0.01579	0.01251	0.01294
200	175	35000	0.01184	0.00920	0.00981

Relación de Poisson = 0.4 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	Se PLAXIS
100	350	35000	0.02231	0.01913	0.01778
150	233.4	35000	0.01488	0.01251	0.01205
200	175	35000	0.01116	0.00920	0.00919

Relación de Poisson = 0.5 = μ_s					
Rel. E/q ₀	q ₀	E	S Teoría Elasticidad	S 'Schmertmann y Hartman'	Se PLAXIS
100	350	35000	0.02020	0.01913	0.01576
150	233.4	35000	0.01347	0.01251	0.01069
200	175	35000	0.01010	0.00920	0.00814

Fuente: Autores del proyecto

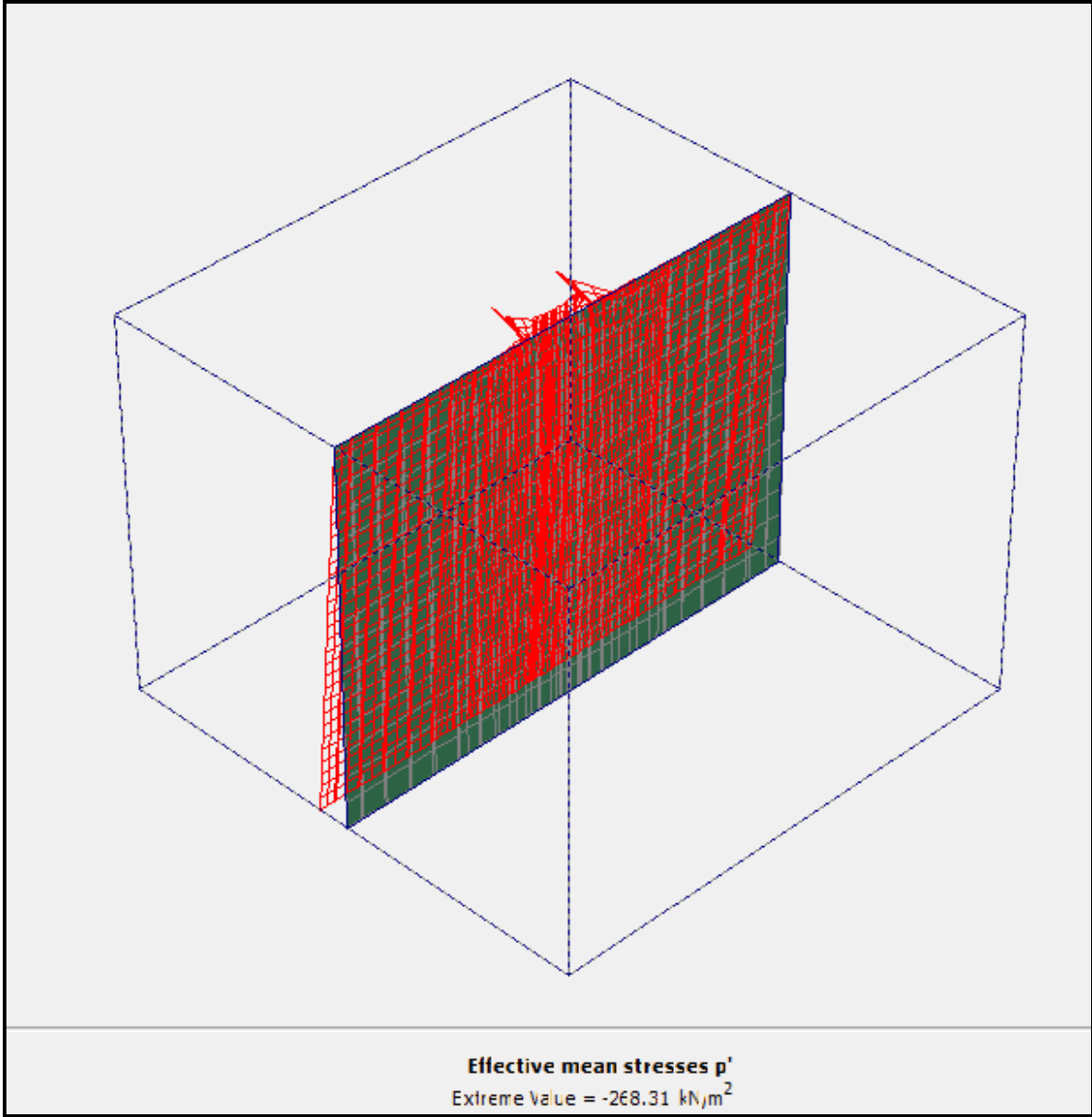
3.5 CÁLCULO DE ESFUERZOS MEDIANTE PLAXIS.

Para el cálculo de esfuerzo en PLAXIS es necesario una vez realizada la modelación y hechos los cálculos cargar la ventana de visualización de resultados y a partir de esta generar una sección transversal que corte el centro de la placa.

Una vez realizado el corte aparecerá la sección transversal y en el menú Stress elegir la opción total mean stress, seleccionado esto aparecerá en la parte inferior de la pantalla del programa el valor del esfuerzo, para ver los esfuerzos en varios puntos se puede exportar una tabla de datos mediante el menú View y eligiendo Table.

A continuación se muestra una captura del valor del máximo esfuerzo calculado por PLAXIS.

Figura 9. Sección transversal de esfuerzos



Fuente: PLAXIS

3.6 CÁLCULO DE ESFUERZOS MEDIANTE TEORÍAS TRADICIONALES.

3.6.1. Cálculo de esfuerzos debajo de un área cuadrada. En la mayoría de los casos, el esfuerzo vertical debajo del centro de una superficie cuadrada es de importancia, y se da por la siguiente relación:

$$\Delta\sigma = q_0 I_c$$

Dónde:

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left[\frac{m_1 n_1}{\sqrt{1 + m_1^2 + n_1^2}} \cdot \frac{1 + m_1^2 + 2n_1^2}{(1 + n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} + \text{sen}^{-1} \left(\frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1 + n_1^2}} \right) \right]$$

$$m_1 = \frac{L}{B}$$

$$n_1 = \frac{z}{\left(\frac{B}{2}\right)}$$

El valor I_c también se puede calcular mediante la tabla 7. Entrando con los valores de m_1 y n_1 .

Para este caso se tomará una arena densa media y una relación de carga/módulo de elasticidad igual a 100, 150 y 200.

Para mirar la variación de PLAXIS con la teoría, al igual que con el caso de los asentamientos, relacionaremos una tabla con los demás valores de esfuerzo para arena suelta y densa.

Se tendrá la siguiente relación: $E/q_0 = 100$ arena densa media:

q₀	250	[KN/m ²]
B	3	[m]
L	3	[m]
Z	0	[m]
I_c	1.028	

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{3}{3} = 1$$

$$n_1 = \frac{z}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{0}{\left(\frac{3}{2}\right)} = 0$$

El I_c calculado con la tabla 7.

$$I_c = 1.028$$

El esfuerzo calculado será igual a:

$$\Delta\sigma = q_o I_c$$

$$\Delta\sigma = 250 \times 1.028$$

$$\Delta\sigma = 257 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Para una relación $E/q_o = 150$ arena densa media:

q_o	166,7	[KN/m ²]
B	3	[m]
L	3	[m]
Z	0	[m]
I_c	1.028	

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{3}{3} = 1$$

$$n_1 = \frac{z}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{0}{\left(\frac{3}{2}\right)} = 0$$

El I_c calculado con la tabla 7.

$$I_c = 1.028$$

El esfuerzo calculado será igual a:

$$\Delta\sigma = q_o I_c$$

$$\Delta\sigma = 166.7 \times 1.028$$

$$\Delta\sigma = 171.368 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

Para la, relación $E/q_0 = 200$ arena densa media:

q₀	125	[KN/m ²]
B	3	[m]
L	3	[m]
Z	0	[m]
I_c	1.028	

$$m_1 = \frac{L}{B} = \frac{3}{3} = 1$$

$$n_1 = \frac{z}{\left(\frac{B}{2}\right)} = \frac{0}{\left(\frac{3}{2}\right)} = 0$$

El I_c calculado con la tabla 7.

$$I_c = 1.028$$

El esfuerzo calculado será igual a:

$$\Delta\sigma = q_0 I_c$$

$$\Delta\sigma = 125 \times 1.028$$

$$\Delta\sigma = 128.5 \text{ [kN/m}^2\text{]}$$

A continuación, se enlista una tabla comparativa entre la Teoría Tradicional y PLAXIS con los valores de esfuerzo para los diferentes tipos de arena suelta, densa media y densa.

Tabla 26. Esfuerzos para arena suelta

Rel. E/q ₀	q ₀	E	I _c	$\Delta\sigma = q_0 \cdot I_c$	$\Delta\sigma$ PLAXIS
100	150	15000	1.028	166.536	166.04
150	100	15000	1.028	115.136	145.9
200	75	15000	1.028	89.436	100.7

Fuente: autores del proyecto

Tabla 27. Esfuerzos para arena densa media

Rel. E/q_o	q_o	E	I_c	Δσ = q_o*I_c	Δσ PLAXIS
100	250	25000	1.028	274.476	275.91
150	166.7	25000	1.028	183.704	191.69
200	125	25000	1.028	140.836	165.53

Fuente: autores del proyecto

Tabla 28. Esfuerzos para arena densa

Rel. E/q_o	q_o	E	I_c	Δσ = q_o*I_c	Δσ PLAXIS
100	350	35000	1.028	372.136	368.97
150	233.4	35000	1.028	252.271	303.27
200	175	35000	1.028	192.236	191.42

Fuente: autores del proyecto

CONCLUSIONES

Como fue establecido inicialmente el presente proyecto se trabajaría en “PLAXIS 2D”, una vez entendido el funcionamiento de este se observó que debido a que trabaja en un plano bidimensional la apreciación de las dimensiones de la zapata no son las esperadas, por tal razón se decidió optar por la utilización de un módulo avanzado del mismo: “PLAXIS 3D Foundation”, con el cual se tenía una mejor apreciación de las dimensiones de ésta, y se obtuvieron los resultados esperados que cumplieran con un margen de error mínimo estimado entre el 1% y el 12%, que equivaldría a un error expresado en milímetros.

Una vez realizada la revisión bibliográfica para el cálculo de asentamientos inmediatos en arenas, según el método de análisis elástico lineal, se concluyó que de las teorías planteadas la más apropiada para la verificación de resultados es la teoría propuesta por Schmertmann y Hartman ya que esta mejor diseñada para este tipo de suelos.

Al comparar los ábacos se puede apreciar que el cambio en el asentamiento para cualquier Coeficiente de Poisson es muy pequeño, por esta razón se concluye entonces, que la afectación del Coeficiente de Poisson es mínima en el resultado del asentamiento, esto también se evidencia al entender la teoría propuesta por Schmertmann y Hartman. También se puede concluir que la afectación en los cálculos al variar el Módulo de Elasticidad y la carga son muy significativos.

Con la realización de este proyecto, se puede concluir que la variación de los resultados es mínima. Si bien hay muy poca diferencia en los resultados obtenidos teóricamente con respecto a PLAXIS, hay que decir que aunque todos los parámetros son iguales los métodos de análisis pueden diferir.

Para la calibración de los ábacos y poder normalizar los datos, uno de los principales factores, fue basarse en la relación de “Modulo de Elasticidad y Carga” (E/q_0), con el fin de que funcionen en cualquier tipo de arena y que la carga este dentro de las estimaciones de un edificio de 5 pisos. Fue necesario la generación de aproximadamente 300 modelaciones de las cuales al final se tomaron en cuenta 54 ya que éstas cumplían con los requerimientos del proyecto. Los esfuerzos calculados mediante PLAXIS fueron comparados con la teoría verificando así que cumplieran y se encontraran dentro de un error admisible.

RECOMENDACIONES

Para un análisis de cálculo de asentamientos inmediatos todo puede ser factor de variación, la profundidad a la que se entierre la cimentación, si la placa se modela en PLAXIS rígida o flexible, el tipo de suelo que se analice, etc., por estas razones es indispensable hacer una investigación profunda de lo que se va a modelar para obtener los resultados esperados.

Con respecto a los valores arrojados por PLAXIS 3D Foundation, como es una herramienta que está siendo muy utilizada hoy en día, se observa, que por su método de análisis, aún se sigue renovando constantemente por las imprecisiones en algunos cálculos.

Para el cálculo de asentamientos inmediatos mediante los ábacos se recomienda obtener los valores a través de una iteración que con un cálculo manual usando una regla ya que la variación del Módulo de Elasticidad y carga no tiene un comportamiento lineal.

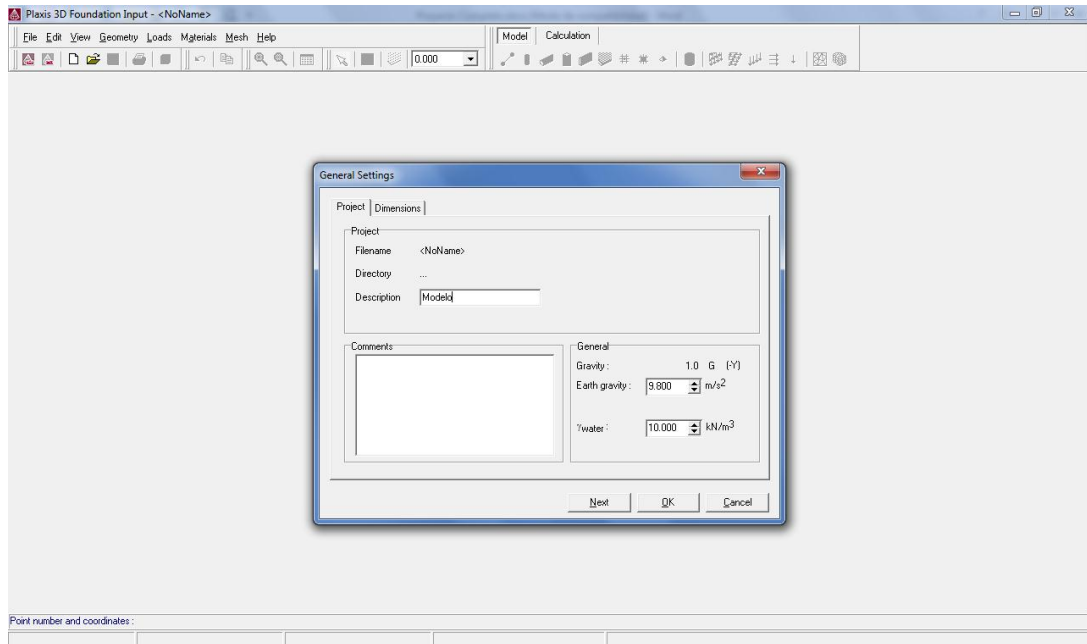
BIBLIOGRAFÍA

- ✓ DAS, Braja M. Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 5ª Edición 2004.
- ✓ BOWLES, Joseph E. Foundation Analysis and Design, 5ª Edición 1997.
- ✓ PLAXIS. General Information.
- ✓ PLAXIS. Reference Manual.
- ✓ PLAXIS. Tutorial Manual.
- ✓ Poulos and Davis, Elastic Solutions for Soil and Rock Mechanics, 1ª Edición 1974.
- ✓ VILLAZ, Crespo. Mecánica de suelos y Cimentaciones

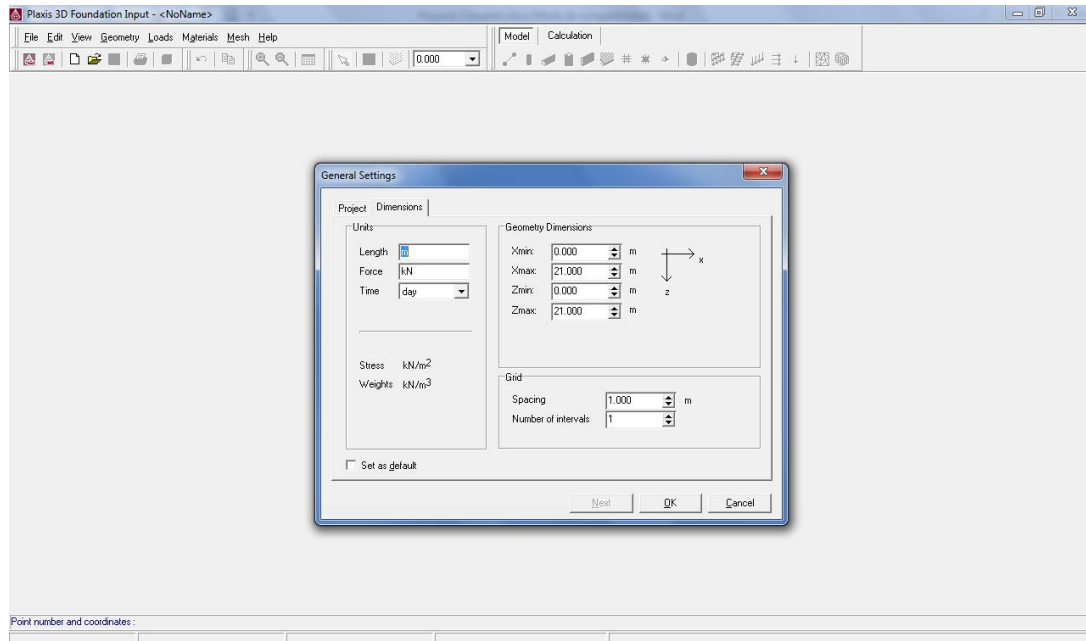
ANEXOS

Anexo A. Etapas para modelar un asentamiento en el software PLAXIS.

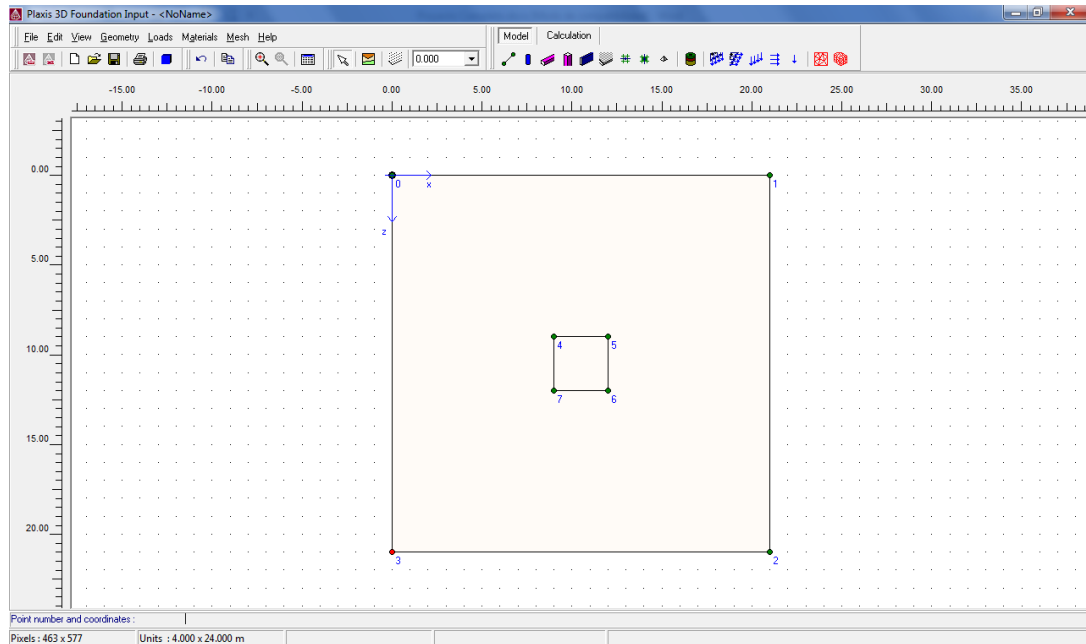
a-1 Definir nombre del modelo, gravedad y peso del agua.



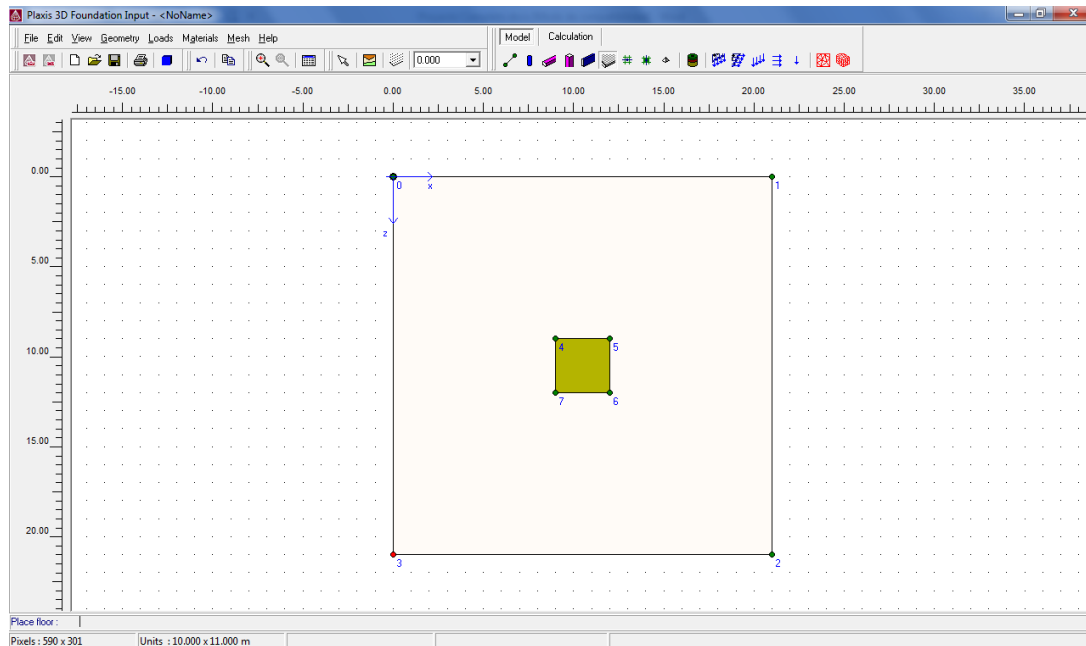
a-2 Definir unidades y tamaño del volumen de suelo a modelar.



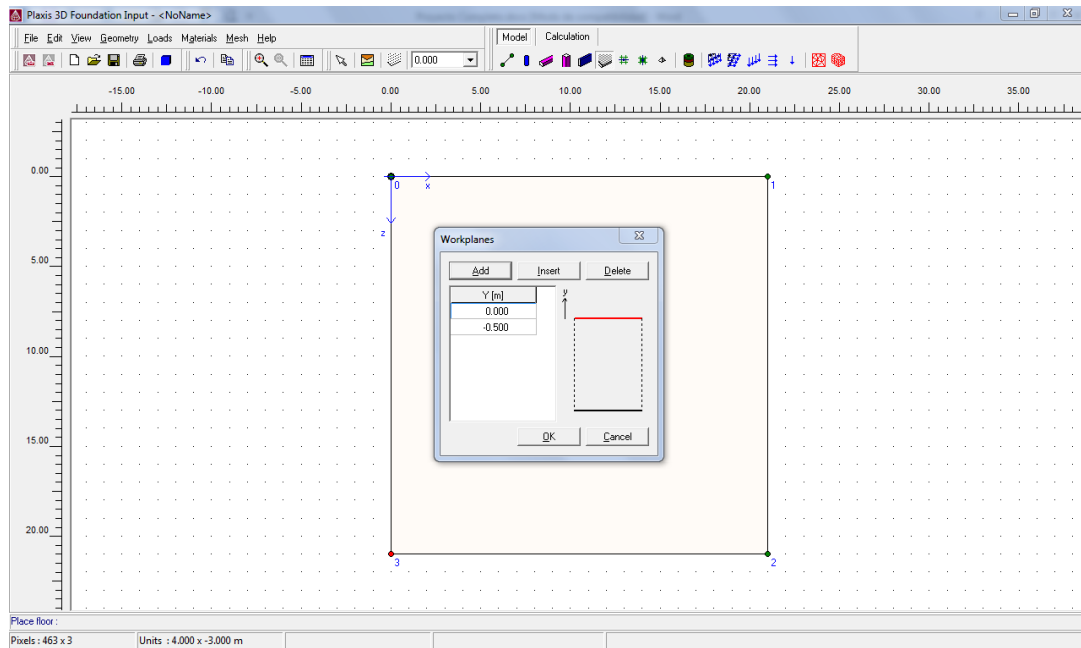
a-3 Definir la geometría de la Zapata en el volumen de suelo mediante la herramienta: Geometry Line.



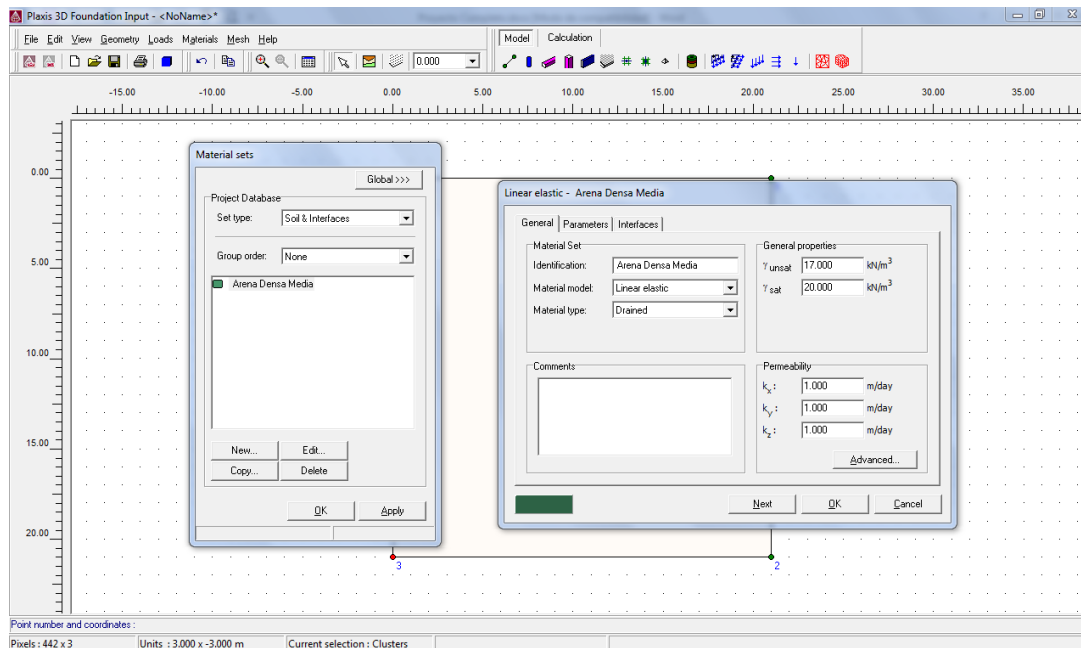
a-4 Asignar la zapata en la geometría ya definida mediante la herramienta: Floor.



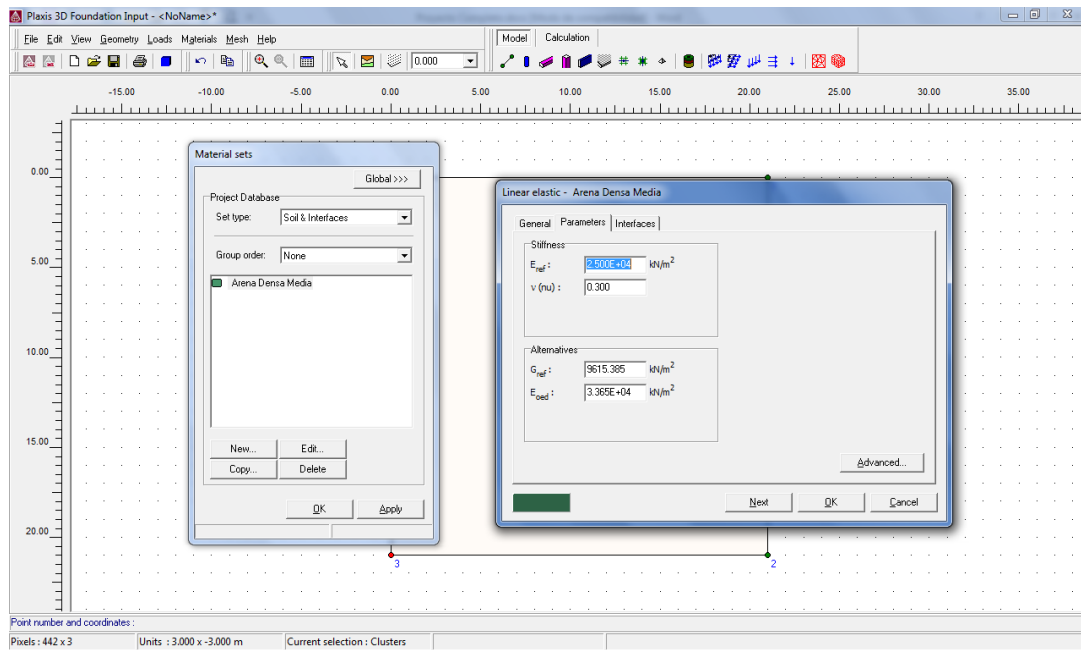
a-5 Definir los niveles correspondientes a cota cero y cambios de materiales mediante la herramienta: workplanes.



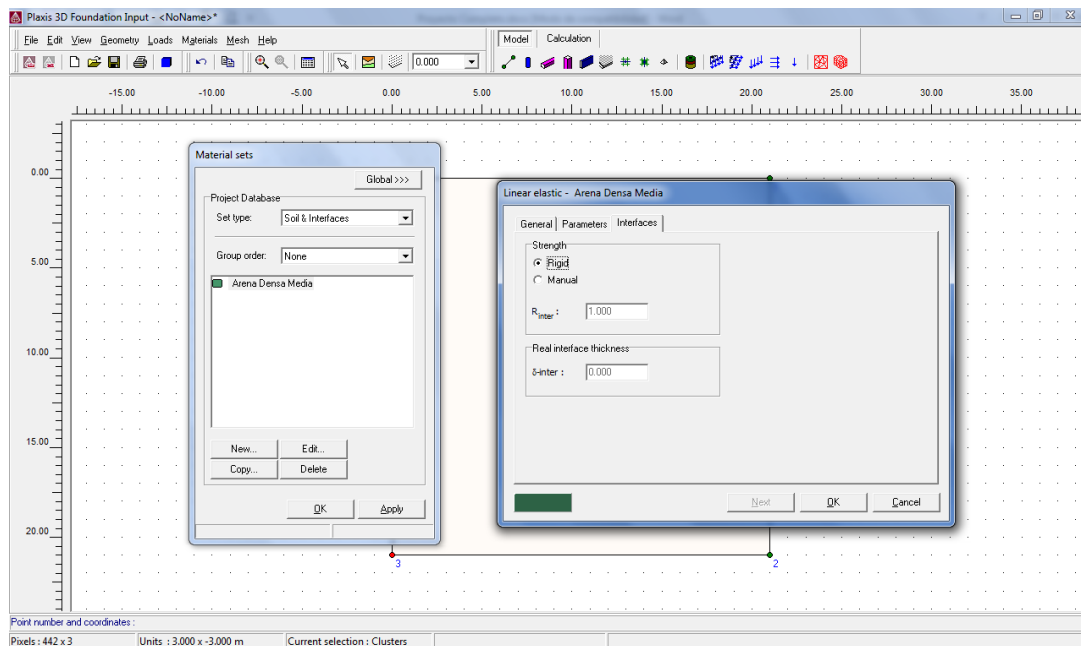
a-6 Definir las propiedades de los materiales a utilizar para el suelo mediante la herramienta: Materials. (1)



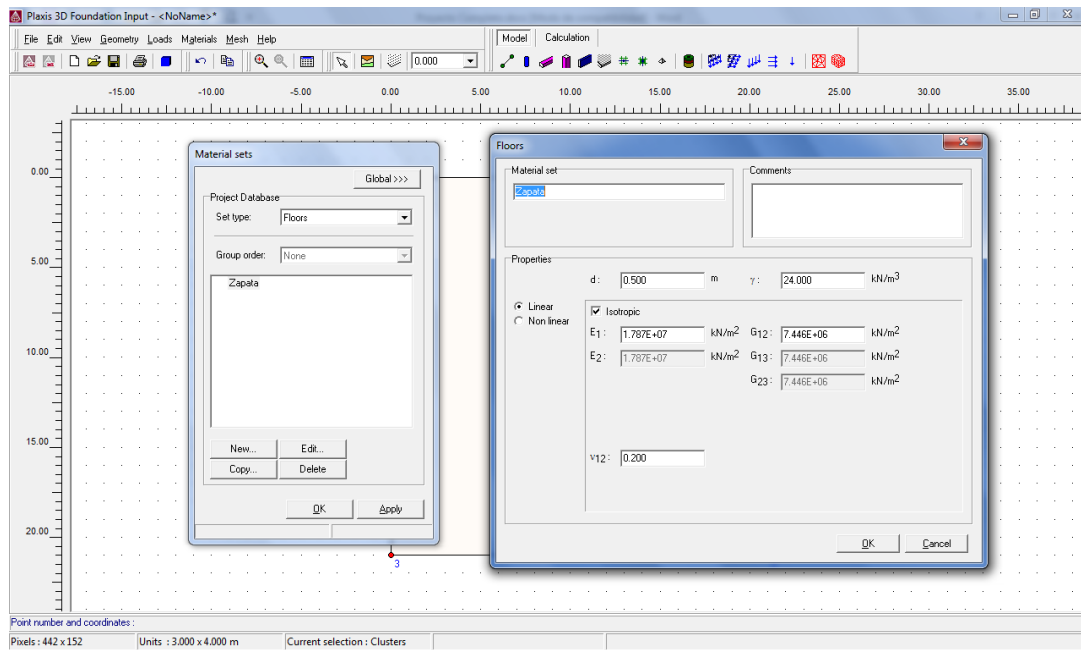
a-7 Definir las propiedades de los materiales a utilizar para el suelo mediante la herramienta: Materials. (2)



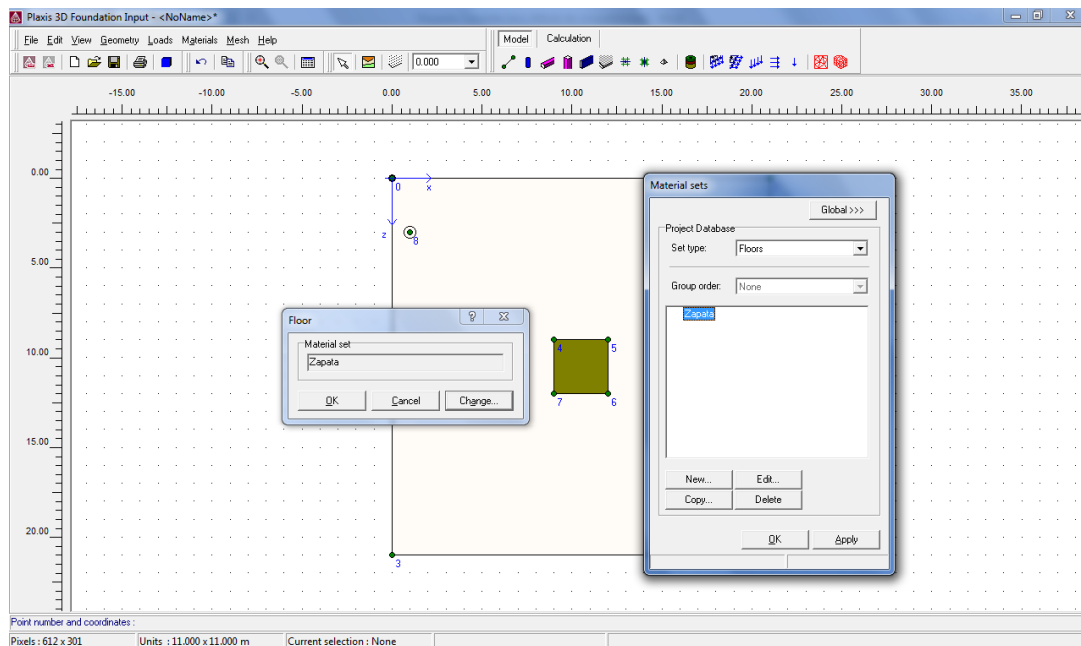
a-8 Definir las características de la interfaz entre la zapata y suelo.



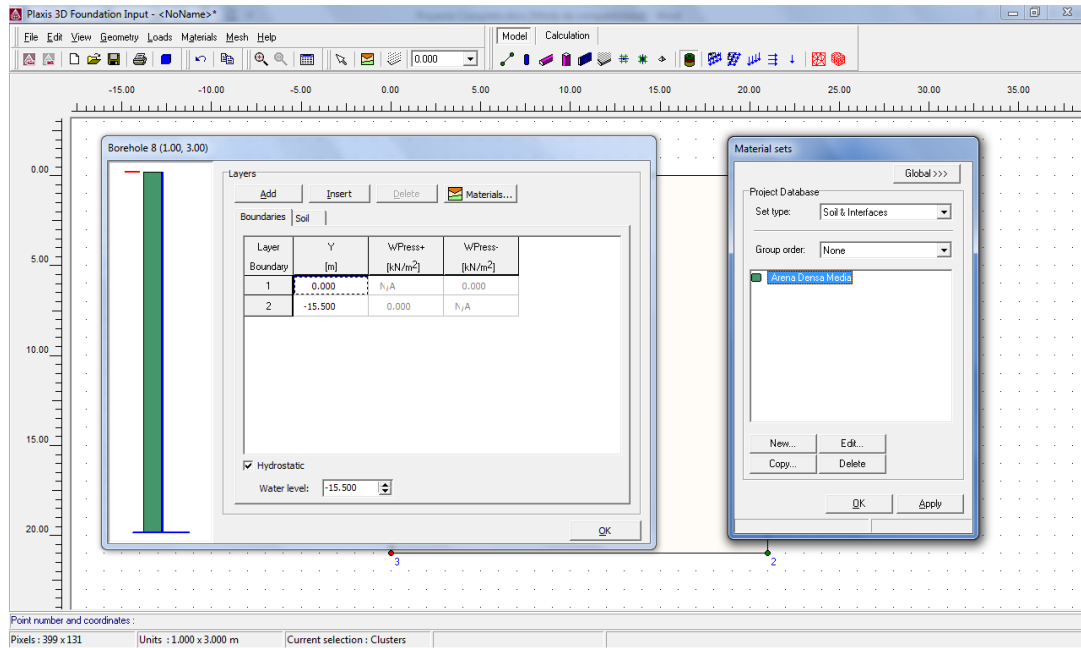
a-9 Definir las propiedades de los materiales a utilizar para la zapata mediante la herramienta: Materials.



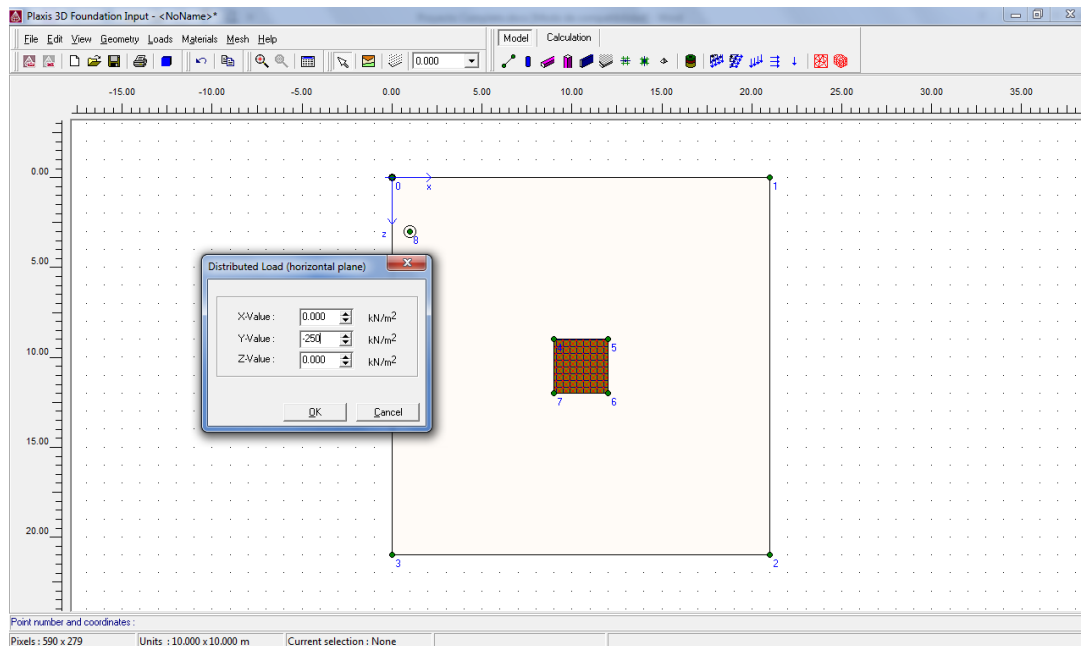
a-10 Asignar las propiedades de la zapata.



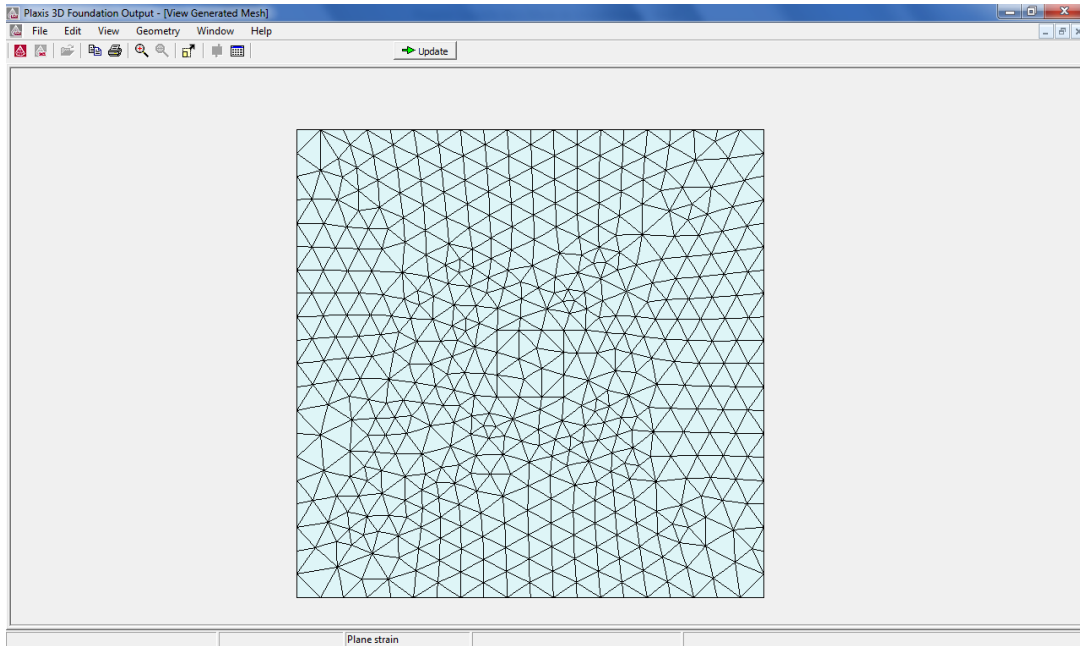
a-11 Definir la estratigrafía del suelo y nivel de agua mediante calicatas imaginarias usando la herramienta: Borehole.



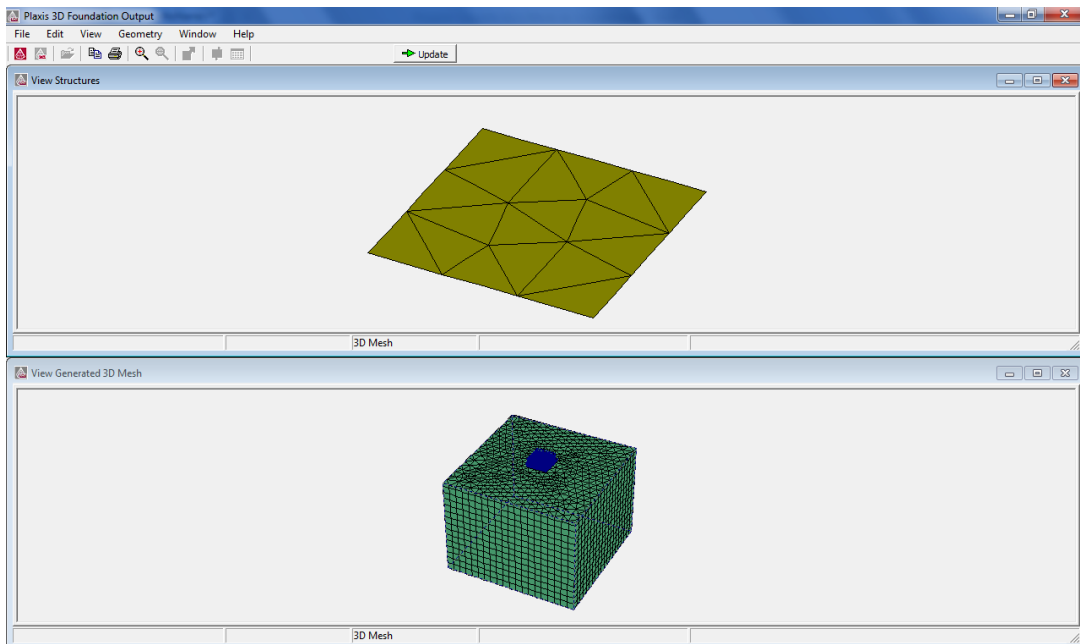
a-12 Asignar la carga distribuida sobre el área de la zapata usando la herramienta: Distributed load (horizontal planes).



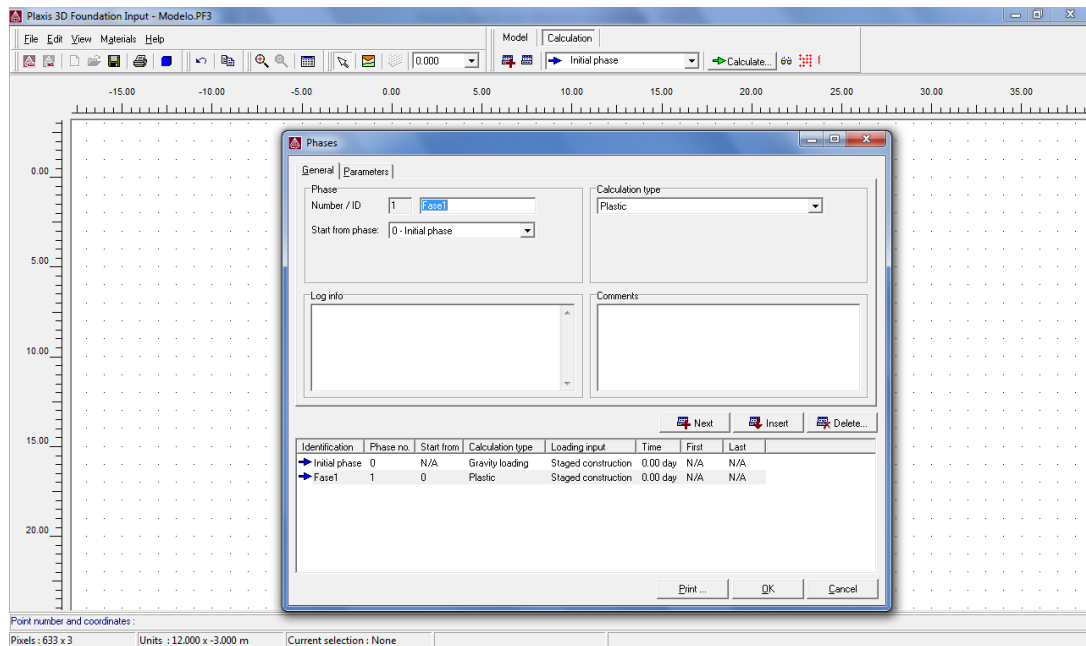
a-13 Generar la malla de elementos finitos en 2D a utilizar, pero teniendo en cuenta que se debe hacer una malla refinada.



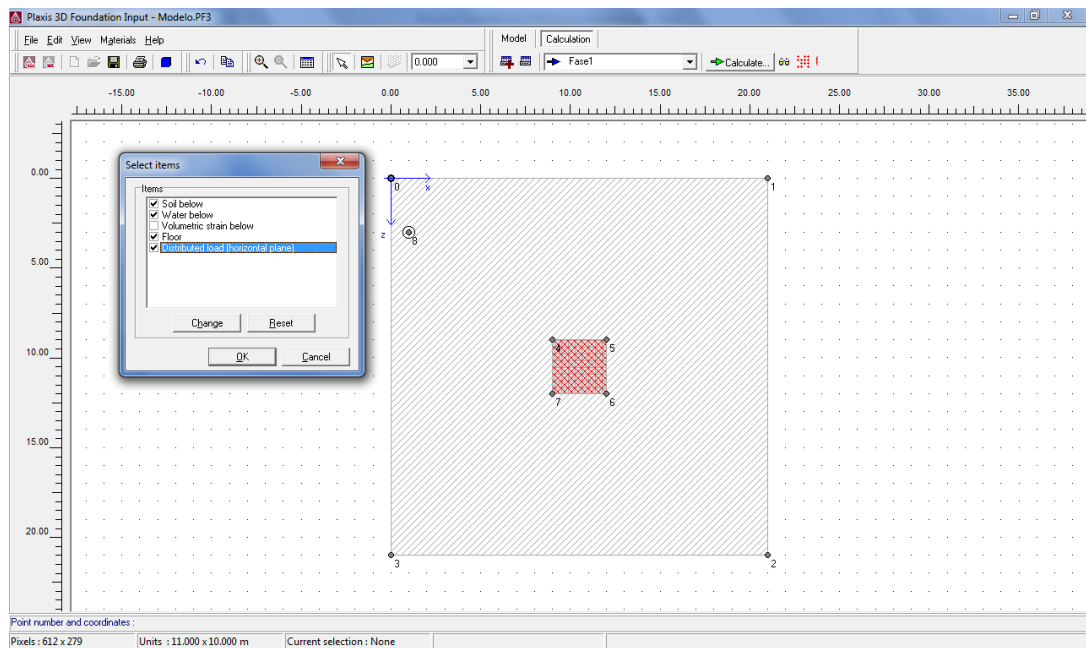
a-14 Generar la malla de elementos finitos en 2D a utilizar.



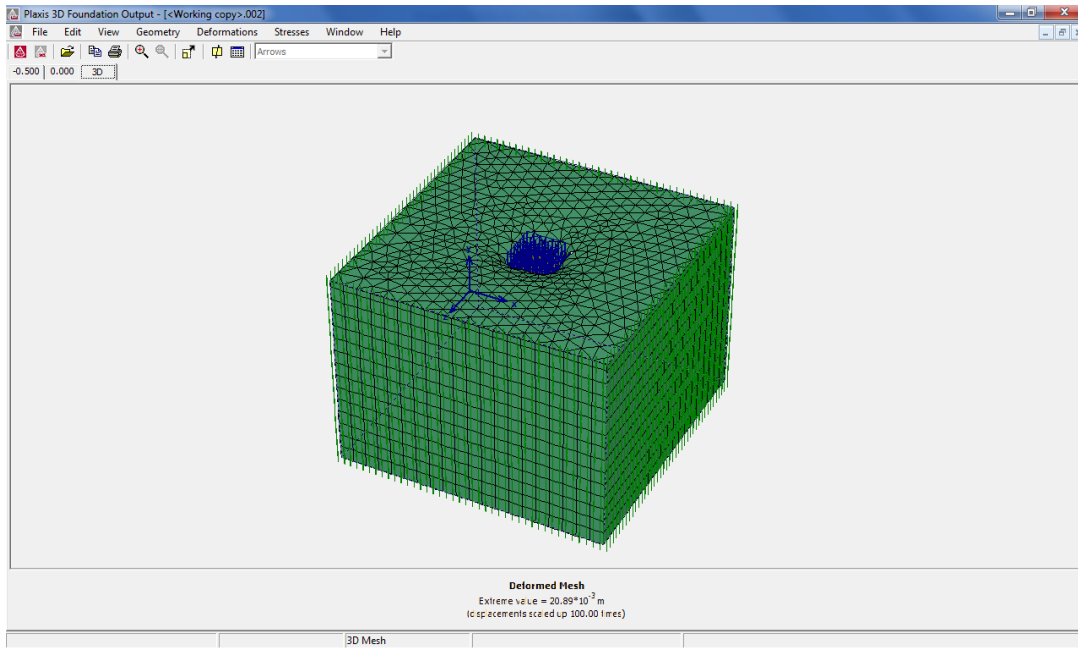
a-15 Pasar a la fase de cálculos y definir las fases de la modelación para el procesador FEM.



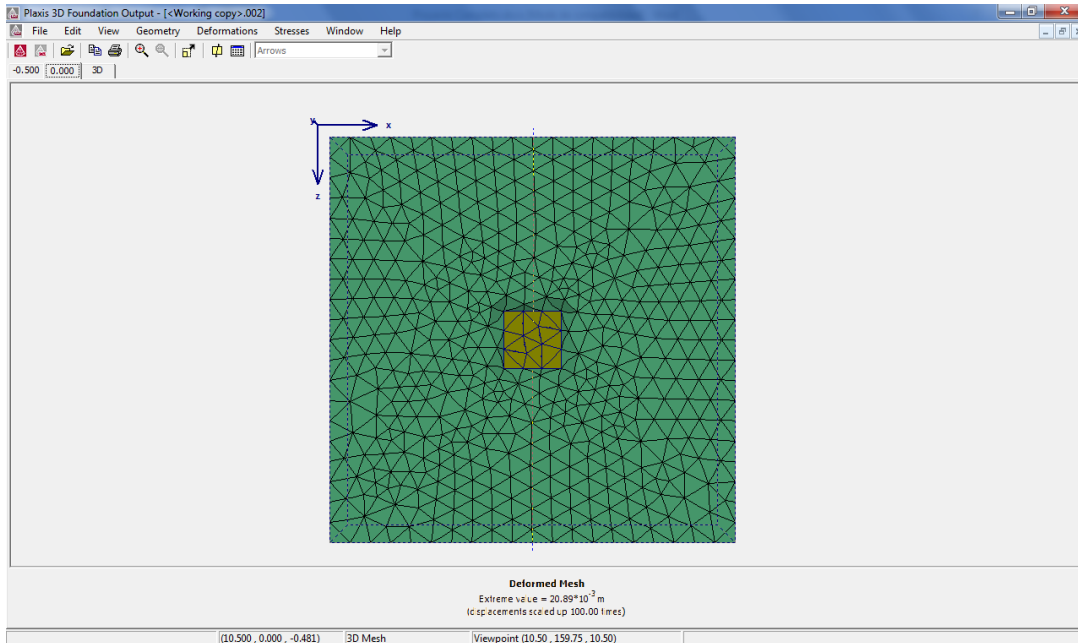
a-16 Habilitar para la Fase 1: la zapata y la carga sobre ésta, para luego proceder a realizar los cálculos.



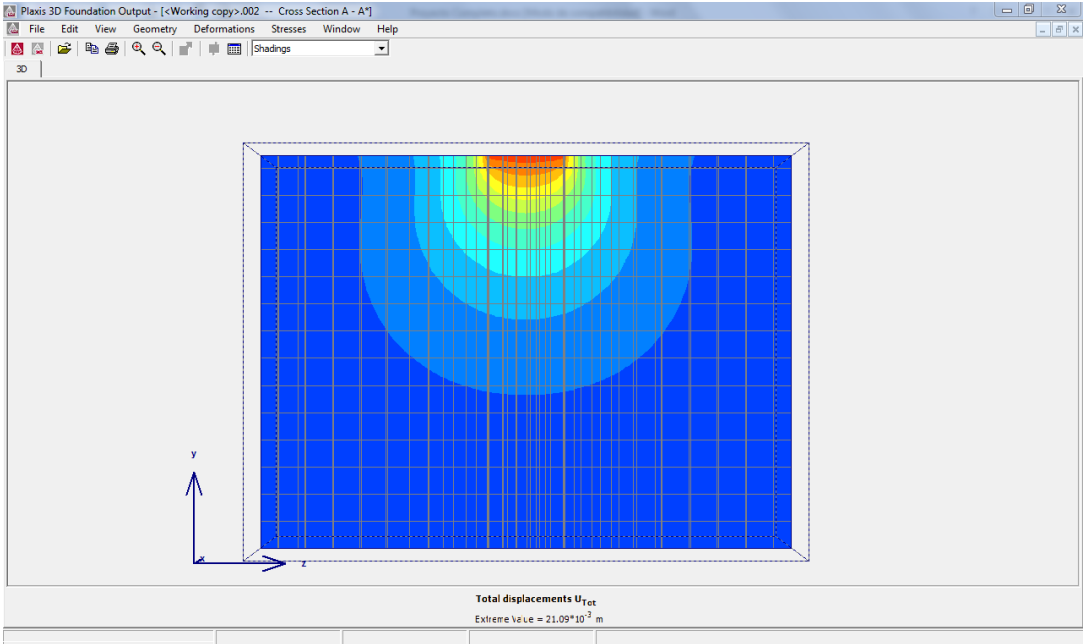
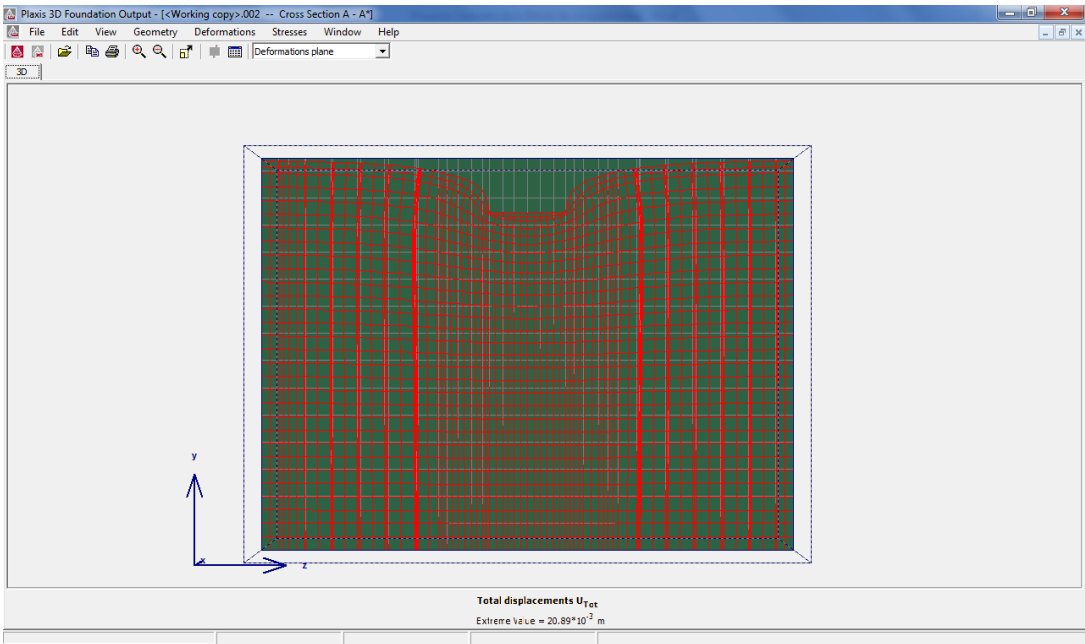
a-17 una vez realizados los cálculos procedemos a visualizar los datos obtenidos.



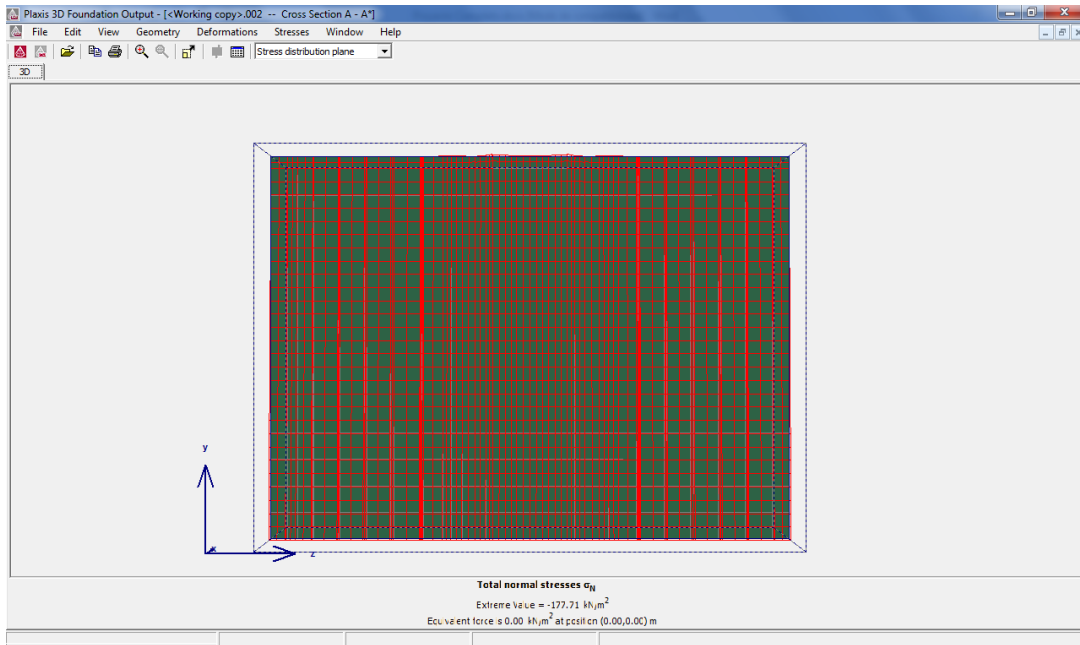
a-18 Enseguida realizamos un corte mediante la herramienta: Cross Section, para visualizar los resultados que nos interesan.



a-19 Uno de los gráficos que es de nuestro interés es el de Deformaciones Totales.



a-20 El otro grafico de nuestro interés es el de Esfuerzos.



a-21 Para obtener los datos de los casos anteriores se hace mediante la herramienta: Table, la cual nos arrojará una tabla con todos los datos de los puntos de la sección y deberán ser organizados y tabulados con Excel.

Soil Element	X [m]	Y [m]	Z [m]	U_{Tot} [10^{-3} m]
60	10.502	-0.500	20.336	1.041
	10.501	-0.500	21.000	1.016
	10.501	0.000	21.000	1.033
	10.502	0.000	20.336	1.061
	10.501	-0.500	20.668	1.022
	10.501	-0.250	21.000	1.024
	10.501	0.000	20.668	1.040
	10.502	-0.250	20.336	1.050
124	10.502	-0.500	20.308	1.043
	10.502	-0.500	20.336	1.041
	10.502	0.000	20.336	1.061
	10.502	0.000	20.308	1.063
	10.502	-0.500	20.322	1.042
	10.502	-0.250	20.336	1.050
	10.502	0.000	20.322	1.062
	10.502	-0.250	20.308	1.052
198	10.504	-0.500	19.305	1.180
	10.502	-0.500	20.308	1.043
	10.502	0.000	20.308	1.063
	10.504	0.000	19.305	1.214
	10.503	-0.500	19.806	1.097
	10.502	-0.250	20.308	1.052
	10.503	0.000	19.806	1.123
	10.504	-0.250	19.305	1.195
272	10.504	-0.500	19.238	1.194

Anexo B. Ábacos de asentamientos para arenas.

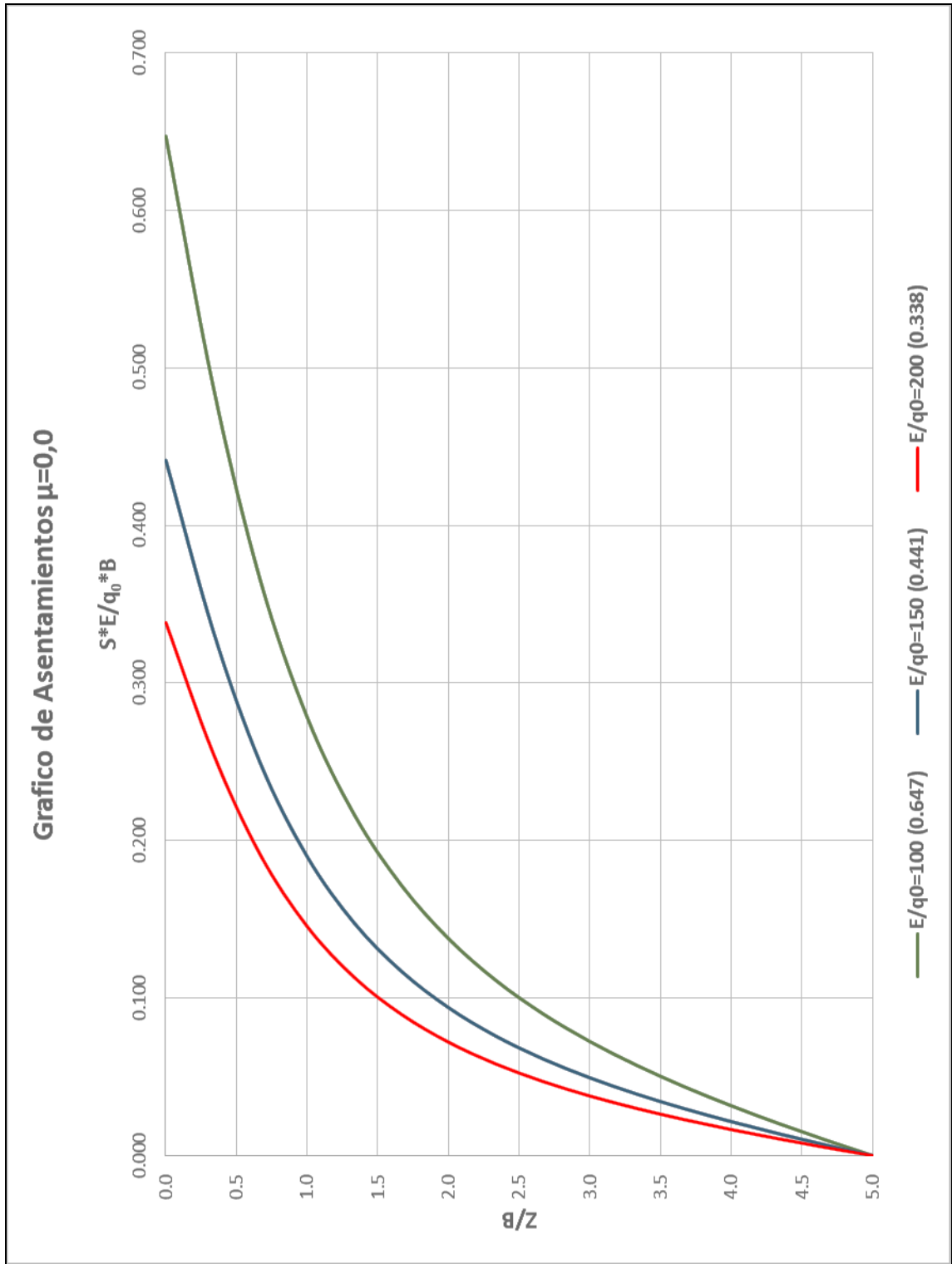


Grafico de Asentamientos $\mu=0,1$

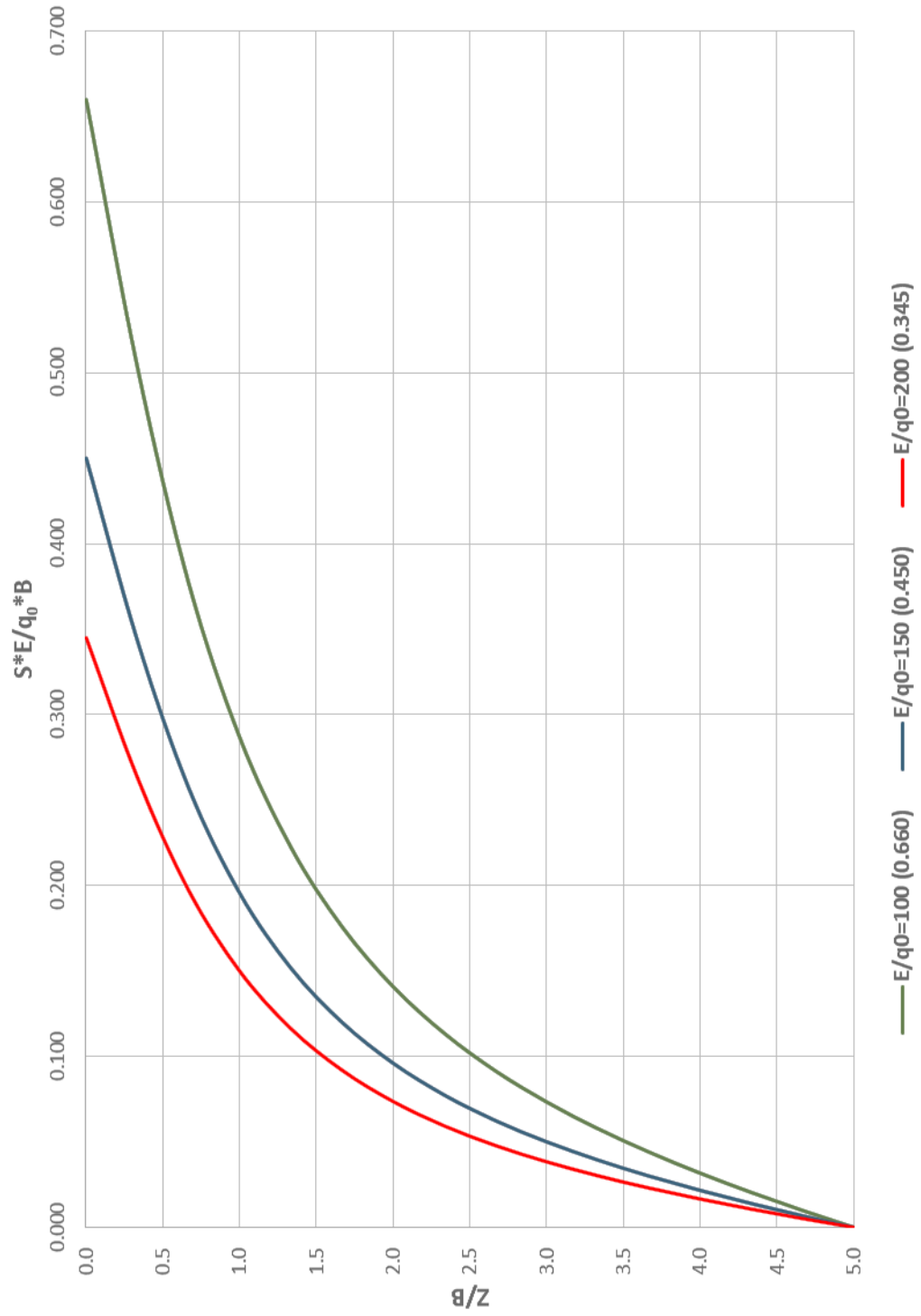


Grafico de Asentamientos $\mu=0,2$

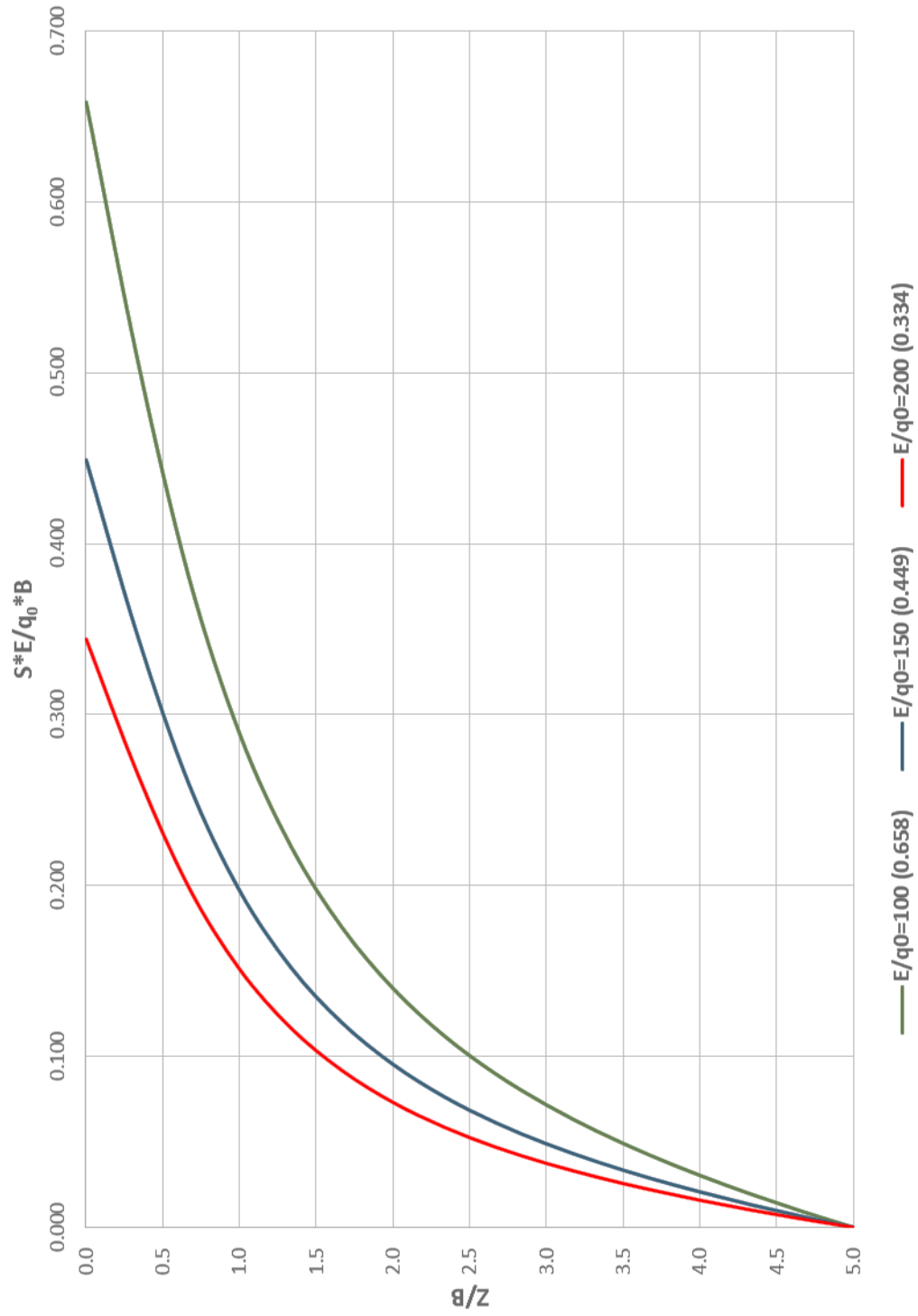


Grafico de Asentamientos $\mu=0,3$

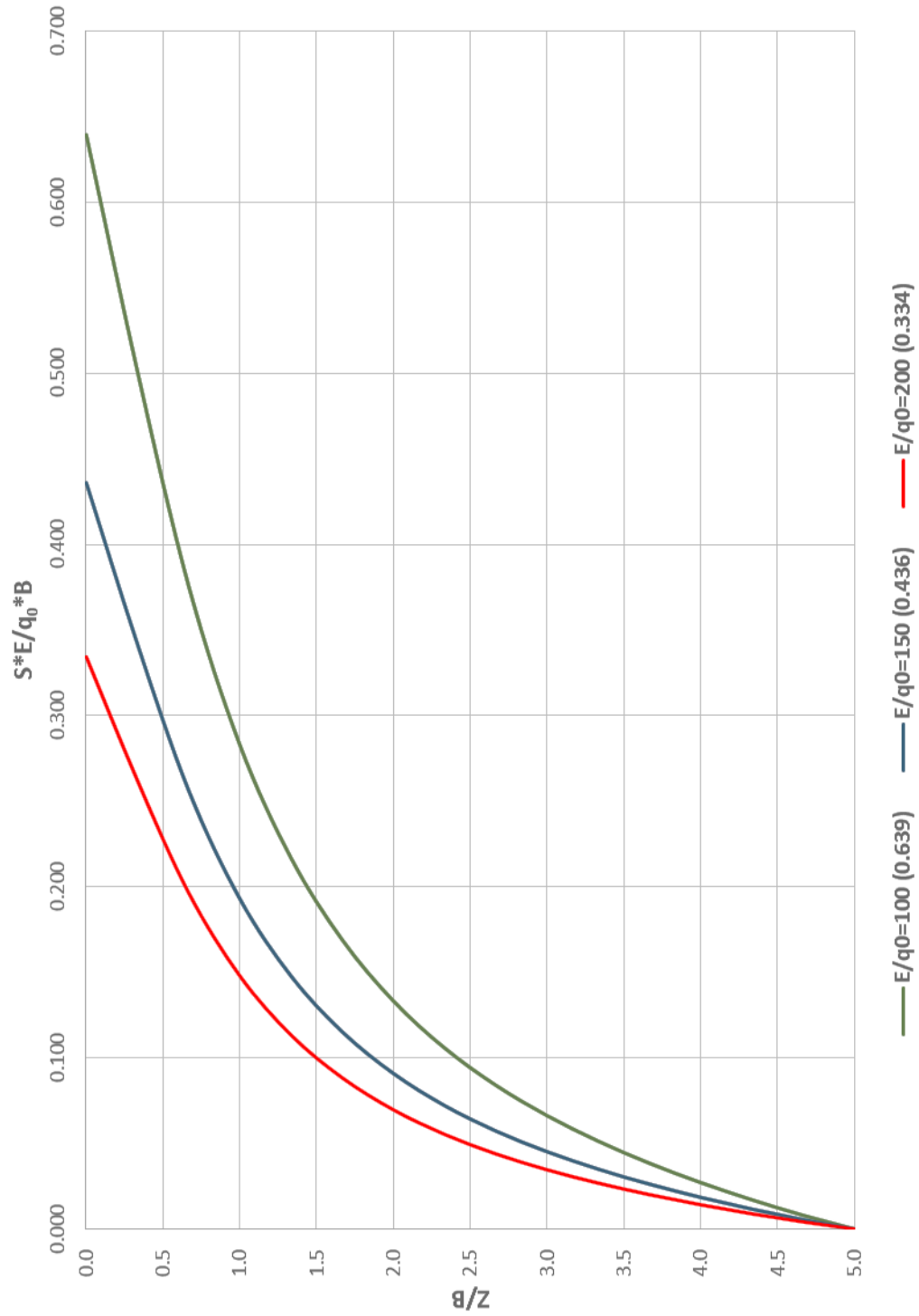


Grafico de Asentamientos $\mu=0,4$

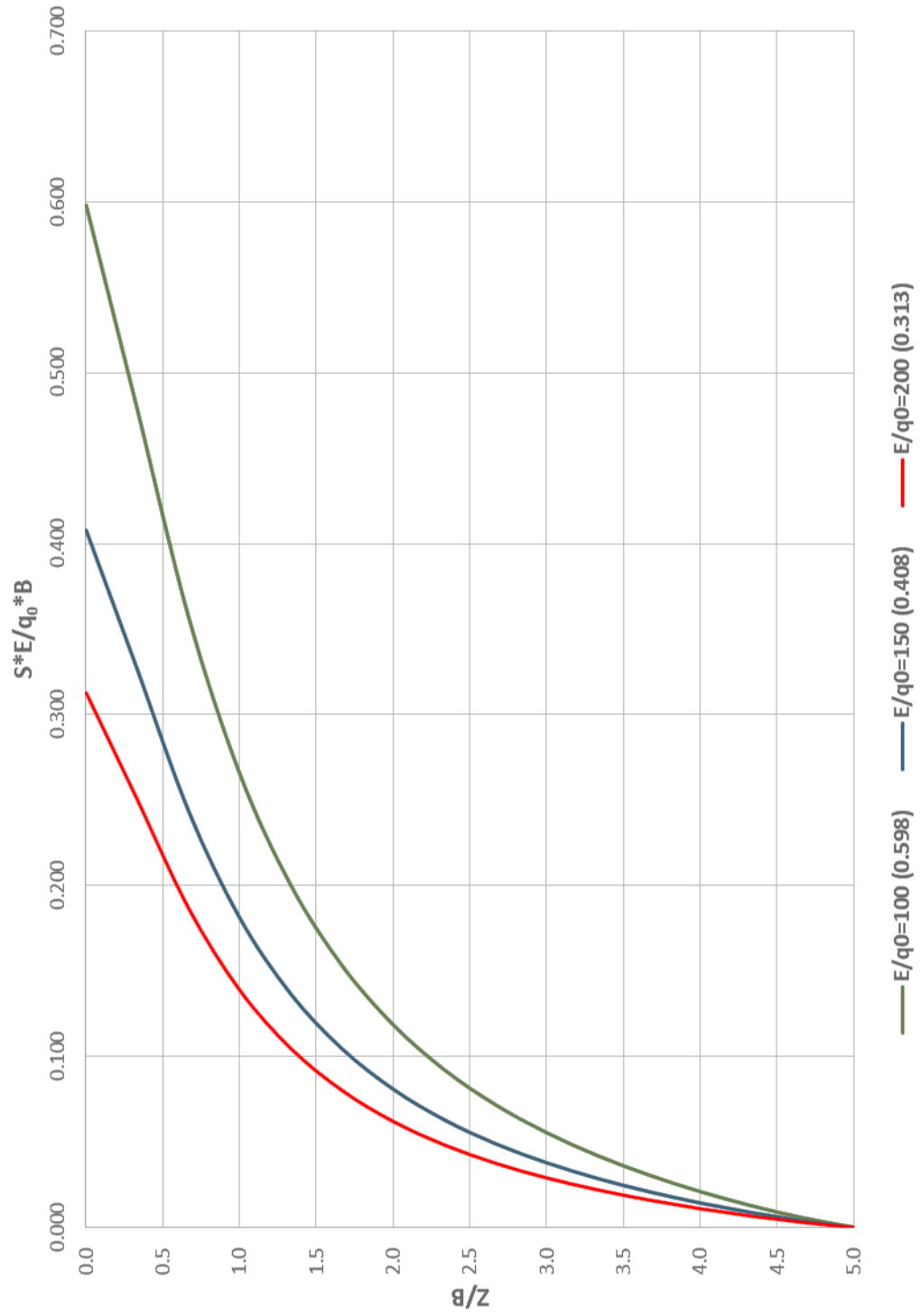


Grafico de Asentamientos $\mu=0,49$

