

**ESTUDIO NUMÉRICO DE ASENTAMIENTOS EN UN SUELO ESTRATIFICADO**

**JUAN NICOLÁS ANGARITA CORONEL**

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

**2012**

**ESTUDIO NUMÉRICO DE ASENTAMIENTOS EN UN SUELO ESTRATIFICADO**

**JUAN NICOLÁS ANGARITA CORONEL**

**Trabajo de grado modalidad Investigativa para optar al título de:  
Ingeniero Civil**

**Director:  
VLADIMIR ERNESTO MERCHAN JAIMES  
I.C., M.I.-G, D.I.**

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

**2012**

## DEDICATORIA

*Nada de esto hubiera sido posible sin la presencia de Dios, quien puso en mi camino una maravillosa mujer, que con su constante esfuerzo e incondicional amor y apoyo, estuvo al tanto de alentarme en los momentos de crisis que implicaron este gran triunfo, gracias madre.*

*Mi hermano, en quien encontré siempre esa palabra sabia que me aconsejaba y orientaba por caminos de esperanza y plenitud.*

*Mi tía, segunda mamá quien estuvo pendiente de ayudarme en las dificultades a lo largo del camino.*

*A Liliana, gracias por tanta compañía, amor y colaboración.*

*Finalmente mis amigos, con quienes compartí tantos momentos y sonrisas inolvidables.*

**JUAN NICOLÁS ANGARITA CORONEL**

## **AGRADECIMIENTOS.**

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirme crecer académica, ética y personalmente.

A la Escuela de Ingeniería Civil y su cuerpo docente, por su influencia positiva en nuestra formación profesional.

Al Ing, M. Sc Vladimir Merchán Jaimes, director de proyecto, quien gracias a su constante disposición, tiempo y asesoría contribuyeron en el desarrollo de este trabajo de grado.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	12
OBJETIVO GENERAL .....	14
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
1. ASPECTOS FUNDAMENTALES: CAPACIDAD DE CARGA Y ASENTAMIENTOS ADMISIBLES.....	15
1.1 INCREMENTO DEL ESFUERZO VERTICAL EN UNA MASA DE SUELO CAUSADO POR CARGA DE CIMENTACIÓN.....	15
1.1.1 Incremento de esfuerzo vertical debido a una carga concentrada.....	15
1.1.2 Incremento de esfuerzo verticales debido a un área cargada circularmente .....	17
1.1.3 Incremento de esfuerzo vertical debajo de un área rectangular .....	18
1.2 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS BASADOS EN LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD .....	24
2. MANEJO DE LOS PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS CODE_BRIGHT Y GiD .....	29
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN SUELOS HOMOGENEOS Y ESTRATIFICADOS.....	45
3.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....	45
CONCLUSIONES .....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	70

## TABLA DE ILUSTRACIONES

	<b>Pág.</b>
Ilustración 1. Esfuerzo vertical en un punto A, causado por una carga puntual sobre la superficie.....	16
Ilustración 2. Incremento de la presión bajo una superficie flexible circular cargada uniformemente.....	17
Ilustración 3: Determinación del esfuerzo debajo de una esquina de una superficie flexible rectangular cargada.....	19
Ilustración 4: variación de $I$ con $m$ y $n$ , ecs. (5), (6), (6a). ....	22
Ilustración 5: Esfuerzo debajo de cualquier punto de una superficie flexible rectangular cargada.....	23
Ilustración 6. Método 2.1 para encontrar el incremento de esfuerzo debajo de una cimentación.....	24
Ilustración 7: Asentamiento elástico de cimentación superficial .....	25
Ilustración 8: Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas .....	26
Ilustración 9: Valores de $\alpha$ , $\alpha_{prom}$ , $\alpha_r$ ; Ecs (16), (17), (20), (21).....	27
Ilustración 10: Variación de $F1/HB$ .....	28
Ilustración 11: Variación de $F2/HB$ .....	28
Ilustración 12: Ilustración del ejercicio planteado.....	30
Ilustración 13: Geometría del código de elementos finitos para un suelo estratificado de 3 capas. CODE_BRIGHT .....	31
Ilustración 14: Superficie formada por medio de nodos .....	31
Ilustración 15: Datos del problema (Datos Generales) .....	32
Ilustración 16: Datos del problema (Ecuaciones a resolver) .....	32
Ilustración 17: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	33
Ilustración 18: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	33
Ilustración 19: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	34
Ilustración 20: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	34
Ilustración 21: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	35
Ilustración 22: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	35
Ilustración 23: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	36
Ilustración 24: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	36
Ilustración 25: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	37
Ilustración 26: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	38
Ilustración 27: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	38
Ilustración 28: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	39
Ilustración 29: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	40

Ilustración 30: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	40
Ilustración 31: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	41
Ilustración 32: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	41
Ilustración 33: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	42
Ilustración 34: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	43
Ilustración 35: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	43
Ilustración 36: Propiedades del material (Modelo Mecánico).....	44
Ilustración 37: Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico). ....	48
Ilustración 38: Incremento de esfuerzos verticales (Modelo Mecánico). ....	49
Ilustración 39: Análisis de asentamientos totales inmediatos (Modelo Mecánico). ....	50
Ilustración 40: Incremento de esfuerzos verticales (Modelo Mecánico). ....	51
Ilustración 41: Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico). ....	52
Ilustración 42: Análisis de asentamientos totales inmediatos (Modelo Mecánico). ....	52
Ilustración 43: Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico). ....	53
Ilustración 44: Análisis de asentamientos totales inmediatos (Modelo Mecánico). ....	54
Ilustración 45: Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico). ....	55
Ilustración 46: Análisis de asentamientos totales inmediatos (Modelo Mecánico). ....	56
Ilustración 47: Análisis de asentamientos (Modelo Mecánico).....	57
Ilustración 48: Análisis de asentamientos (Modelo Mecánico).....	58
Ilustración 49: Análisis de asentamientos (Modelo Mecánico).....	58
Ilustración 50: Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).....	59
Ilustración 51: Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).....	60
Ilustración 52: Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).....	60
Ilustración 53: Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico). ....	61
Ilustración 54: Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico). ....	62
Ilustración 55: Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).....	63
Ilustración 56: Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).....	63
Ilustración 57: Incremento de esfuerzos carga en banda (2D) .....	64

## RESUMEN

### TÍTULO:

ESTUDIO NUMÉRICO DE ASENTAMIENTOS EN UN SUELO ESTRATIFICADO

### AUTOR:

JUAN NICOLÁS ANGARITA CORONEL

### PALABRAS CLAVES:

ASENTAMIENTOS INMEDIATOS, INCREMENTOS DE ESFUERZOS VERTICALES, MÓDULO DE RIGIDEZ E, ZAPATAS SUPERFICIALES.

### CONTENIDO:

El presente trabajo busca analizar por medio de simulaciones numéricas, los asentamientos inmediatos elásticos que se producen en el momento o después de la construcción de una estructura cargada previamente y los incrementos de esfuerzo verticales en suelos homogéneos y estratificados de hasta tres capas, al variar el módulo de rigidez E en las diferentes capas que componen este. Es importante resaltar, que para atacar estos tipos de problemas se subdivide el análisis en tres fases, la primera consiste en considerar los asentamientos inmediatos que se presentan por la gravedad eliminándolos seguidamente, la segunda consiste en considerar los desplazamientos verticales inmediatos que la sobrecarga aporta al suelo mediante la conformación del terreno a lo largo del tiempo volviendo estos valores cero y en la tercera se analizan los desplazamientos verticales inmediatos elásticos producidos por la carga de la estructura.

Para dicho análisis fue utilizado el código de elementos finitos acoplados termo-hidromecánicamente CODE\_BRIGHT, el cual permitió nos permitió obtener resultados que indican la independencia lineal del módulo de rigidez E, con los incrementos de esfuerzos verticales y el comportamiento inversamente proporcional de los asentamientos inmediatos, con el módulo de rigidez E.

Seguido, se hace un profundo análisis de la influencia del ancho de base B en las cimentaciones superficiales, ampliando este, y comparándolo con los resultados que fueron arrojados previamente por el software.

Finalmente, se verifica la validez de los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas, con los métodos de cálculo empíricos utilizados en la práctica.

\*Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

## SUMMARY

### TITLE:

NUMERICAL STUDY OF IMMEDIATE SETTLEMENT IN LAYERED SOIL SYSTEMS

### AUTHOR:

JUAN NICOLÁS ANGARITA CORONEL

### KEYWORDS:

IMMEDIATE SETTLEMENT, VERTICAL STRESS INCREMENT, ELASTIC MODULUS, SHALLOW FOUNDATIONS.

### CONTENT:

This document analyzes through numerical simulations, the immediate elastic settlement caused at the same moment or after the building of a structure and the vertical stress increment in homogeneous and layered soils since three layers, varying the elastic module in each layer. It's very important to know that these problems are solved dividing the problem in three steps. The first step consists to eliminate the vertical settlements caused by gravity; the second step consists to eliminate again the vertical settlement caused by the soil load and the final step consists to analyze the vertical displacements produced by the load building.

For this analysis we used the finite element code coupled thermo-hydro CODE\_BRIGHT, which yielded results that indicate the linear independence of the elastic modulus  $E$  with the vertical stress increment and inversely proportional behavior of immediate settlement with the elastic modulus  $E$ .

After that, it analyzes the influence of the width of base  $B$  in shallow foundations, expanding this, and comparing those results with the other calculated by software.

Finally, it verifies the validity of the results obtained by numerical simulations with empirical calculation methods used in practice.

\* Degree Work

\*\* Physical-Faculty of Engineering, School of Civil Engineering, Director Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

## INTRODUCCIÓN

La ingeniería civil abarca muchos campos de acción, entre estos tenemos la mecánica de suelos, cuyo objetivo principal es estudiar el comportamiento de estos, para ser usados como materiales de construcción, o como bases de sustentación en obras de ingeniería.

La importancia de esta ciencia radica en tener presente, que si se sobrepasan los límites de la capacidad resistente del suelo, o aún sin llegar a ellos, se pueden producir deformaciones considerables, llegando a generar esfuerzos secundarios en los miembros estructurales, quizá sin ser considerados previamente en el diseño, produciendo asentamientos importantes, fisuras, grietas, alabeo o desplomos que pueden producir en casos extremos, el colapso de la obra o su inutilización y abandono radical.

A pesar de numerosos estudios experimentales y analíticos disponibles en la literatura técnica sobre asentamientos e incrementos de esfuerzo en suelos homogéneos y estratificados, sometidos a cargas verticales, todavía existe la necesidad de modelos más especializados en donde se pueda analizar los resultados con mayor precisión y exactitud.

La razón principal por la que este estudio fue llevado a cabo, fue dar a conocer un software, y su respectivo funcionamiento, pretendiendo analizar los incrementos de esfuerzos y los asentamientos inmediatos, en diferentes estratos, variando los módulos elásticos de las capas.

En el primer capítulo se presenta un marco teórico, referente a los incrementos de esfuerzos y asentamientos inmediatos en cimientos circulares, trapezoidales y rectangulares.

En el segundo capítulo, se presenta una breve descripción de todo el proceso que se llevó a cabo para realizar las simulaciones numéricas con el programa del código de elementos finitos acoplados termo-hidromecánicamente CODE\_BRIGHT, desde el preproceso hasta el posproceso.

En el tercer capítulo, se presenta el análisis de resultados gráficos y numéricos arrojados por el software.

En el capítulo cuatro, se encuentran las conclusiones de este estudio y algunas recomendaciones que pueden mejorar la calidad del trabajo en futuras investigaciones.

## **OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la influencia de distintos factores en el cálculo de asentamientos para suelos estratificados desde una perspectiva numérica.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Estudiar la dependencia de la rigidez (Modelo de deformación E) en la distribución de los incrementos de esfuerzos verticales para un tipo de zapata aislada.
- Estudiar la influencia de la rigidez (E) en los asentamientos inmediatos para un medio estratificado.
- Comparar resultados numéricos con métodos utilizados en la práctica.

## **1. ASPECTOS FUNDAMENTALES: CAPACIDAD DE CARGA Y ASENTAMIENTOS ADMISIBLES**

El asentamiento de una cimentación se divide en dos categorías principales: (a) asentamiento elástico o inmediato y (b) asentamiento por consolidación. El inmediato o elástico de una cimentación tiene lugar durante o inmediatamente después de la construcción de una estructura. El asentamiento por consolidación ocurre a lo largo del tiempo. El agua de los poros es expulsada de los espacios vacíos de los suelos arcillosos saturados sumergidos en agua. El asentamiento total de una cimentación es la suma de los asentamientos elásticos y por consolidación.

El asentamiento por consolidación comprende dos fases: primaria y secundaria. El asentamiento por consolidación secundaria ocurre después que terminó la consolidación primaria y es causado por deslizamiento y reorientación de las partículas del suelo bajo carga sostenida. El asentamiento por consolidación primaria es más importante que el asentamiento por consolidación secundaria en suelos arcillosos y limosos orgánicos. Sin embargo, en suelos orgánicos, el asentamiento por consolidación secundaria es más importante.

Para el cálculo de asentamiento de cimentaciones (elástico y por consolidación) se requiere estimar el incremento en esfuerzo vertical en la masa del suelo debido a la carga neta aplicada sobre la cimentación. Por tanto, este capítulo se divide en cuatro partes, que son:

1. Procedimiento para el cálculo del incremento del esfuerzo vertical
2. Cálculo del asentamiento (elástico y por consolidación))
3. Capacidad de carga admisible basada en el asentamiento elástico
4. Cimentaciones con suelo reforzado

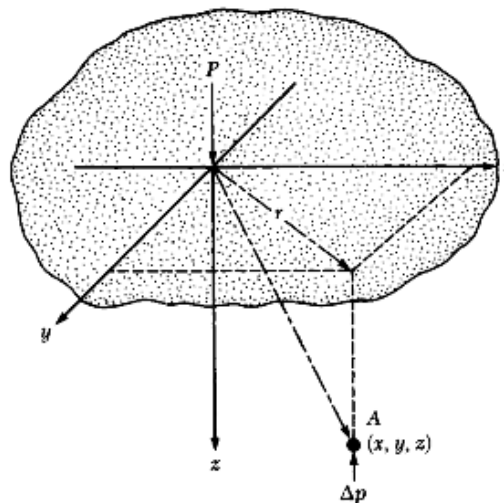
### **1.1 INCREMENTO DEL ESFUERZO VERTICAL EN UNA MASA DE SUELO CAUSADO POR CARGA DE CIMENTACIÓN**

#### **1.1.1 Incremento de esfuerzo vertical debido a una carga concentrada**

En 1985, Boussinesq desarrolló las relaciones matemáticas para la determinación de esfuerzos normal y de corte en un punto cualquiera dentro de medios *homogéneos, elásticos e isotrópicos* debido a una *carga puntual concentrada* localizada en la superficie. De acuerdo con su análisis, el incremento del esfuerzo vertical ( $\Delta p$ ) en el punto A (figura1) causado por la carga puntual de magnitud P es:

$$\Delta P = \frac{3P}{2\pi r^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}, \quad (1)$$

**Ilustración 1.** Esfuerzo vertical en un punto A, causado por una carga puntual sobre la superficie.



**Fuente:** Braja M. Das

$$\Delta P = \frac{3P}{2\pi r^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}, \quad \text{Ecuación de Boussinesq (1)}$$

Donde  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$

x, y, z = coordenadas del punto A.

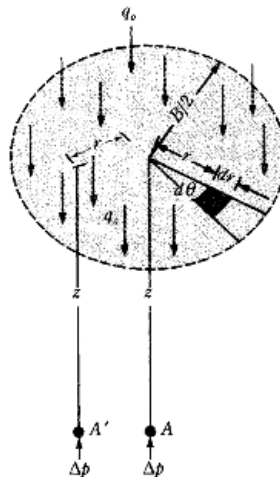
Note que la ecuación no es una función de la relación de Poisson del suelo.

### 1.1.2 Incremento de esfuerzo verticales debido a un área cargada circularmente

La ecuación de Boussinesq, también se usa para determinar el esfuerzo vertical bajo el centro de una superficie flexible cargada y  $q_0$  la carga uniformemente distribuida por unidad de área. Para determinar el incremento de esfuerzo en un punto A, localizado a una profundidad  $z$  bajo el centro de la superficie circular, considere un área elemental sobre el círculo, como muestra la (Figura 2). La carga sobre esta área elemental puede considerarse como carga puntual y expresarse como  $q_0 r d\theta dr$ . El incremento del esfuerzo en el punto A es causado por esta carga que puede determinarse con la ecuación (1):

$$dp = \frac{3(q_0 d\theta dr)}{2\pi z^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}} \quad (2)$$

**Ilustración 2.** Incremento de la presión bajo una superficie flexible circular cargada uniformemente.



**Fuente:** Braja M. Das

El incremento total del esfuerzo causado por toda la superficie cargada, entonces se obtiene por integración de la ecuación (2).

$$\Delta p = \int dp \approx \int_{\theta=0}^{\theta=2\pi} \int_{r=0}^{r=B/2} \frac{3(q_0 d\theta dr)}{2\pi z^2 \left[1 + \left(\frac{r}{z}\right)^2\right]^{5/2}}$$

$$= q_0 \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{B}{2z}\right)^2\right]^{3/2}} \right\} \quad (3)$$

Integraciones similares se efectúan para obtener el incremento del esfuerzo vertical en A' localizado a una distancia r desde el centro de la superficie cargada a una profundidad z (ahlvín y Ulery, 1962). La tabla 4.1 da la variación de  $\Delta p/q_0$  con  $r/(B/2)$  y  $z/(B/2)$  [para  $0 \leq r/(B/2) \leq 1$ ]. Note que la variación de  $\Delta p/q_0$  con la profundidad a  $r/(B/2)=0$  se obtienen con la ecuación 3.

### 1.1.3 Incremento de esfuerzo vertical debajo de un área rectangular

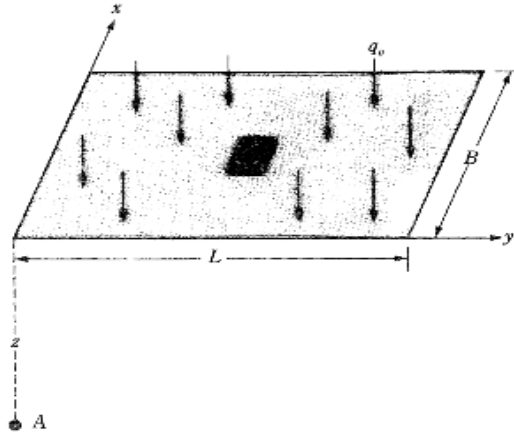
El procedimiento de integración de la ecuación de Boussinesq también permite la evaluación del esfuerzo vertical en cualquier punto A debajo de una esquina de una superficie flexible rectangular cargada (figura3). Para esto, considere un área elemental  $dA = dx dy$  sobre la superficie cargada.

**Tabla 1.** Variación de  $\Delta p/q_0$  para una superficie flexible circular cargada uniformemente

$z/(B/2)$	$r/(B/2)$					
	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.1	0.999	0.999	0.998	0.996	0.976	0.484
0.2	0.992	0.991	0.987	0.970	0.890	0.468
0.3	0.976	0.973	0.963	0.922	0.793	0.451
0.4	0.949	0.943	0.920	0.860	0.712	0.435
0.5	0.911	0.902	0.869	0.796	0.646	0.417
0.6	0.864	0.852	0.814	0.732	0.591	0.400
0.7	0.811	0.798	0.756	0.674	0.545	0.367
0.8	0.756	0.743	0.699	0.619	0.504	0.366
0.9	0.701	0.688	0.644	0.570	0.467	0.348
1.0	0.646	0.633	0.591	0.525	0.434	0.332
1.2	0.546	0.535	0.501	0.447	0.377	0.300
1.5	0.424	0.416	0.392	0.355	0.308	0.256
2.0	0.286	0.286	0.268	0.248	0.224	0.196
2.5	0.200	0.197	0.191	0.180	0.167	0.151
3.0	0.146	0.145	0.141	0.135	0.127	0.118
4.0	0.087	0.086	0.085	0.082	0.080	0.075

Fuente: Braja M. Das

**Ilustración 3:** Determinación del esfuerzo debajo de una esquina de una superficie flexible rectangular cargada



**Fuente:** Braja M. Das

Si la superficie cargada por unidad de área es  $q_o$ , la carga total sobre el área elemental es:

$$dP = q_o dx dy \quad (4)$$

Esta carga elemental,  $dP$ , debe tratarse como una carga puntual. El incremento del esfuerzo vertical en el punto A causado por  $dP$  se evalúa usando la ecuación (1). Sin embargo, note la necesidad de sustituir  $dP=q_o dx dy$  por  $P$ , y  $x^2 + y^2$  por  $r^2$ , en la ecuación (1). Entonces

El incremento del esfuerzo en A causado por  $dp = \frac{3(q_o dx dy)z^3}{2\pi[x^2 + y^2 + z^2]^{5/2}}$

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

$$dp = \int_{y=0}^L \int_{x=0}^B \frac{3(q_o dx dy)z^3}{2\pi[x^2 + y^2 + z^2]^{5/2}} = q_o I \quad (5)$$

Donde  $\Delta p =$  incremento del esfuerzo en A

$I =$  factor de influencia

$$I = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{2mn \sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2 n^2 + 1} \cdot \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \frac{2mn \sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 - m^2 n^2} \right) \quad (6)$$

Cuando m y n son pequeños, el argumento de tan-1 es negativo. En este caso,

$$I = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{2mn \sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + m^2 n^2 + 1} \cdot \frac{m^2 + n^2 + 2}{m^2 + n^2 + 1} + \tan^{-1} \left( \pi - \frac{2mn \sqrt{m^2 + n^2 + 1}}{m^2 + n^2 + 1 - m^2 n^2} \right) \right) \quad (6a)$$

$$m = \frac{B}{z} \quad (7)$$

$$n = \frac{L}{z} \quad (8)$$

Las variaciones de los valores de influencia con m y n se dan en la tabla 2. Por conveniencia, éstos también están graficados en la figura 4

**Tabla 2.** Factor de Influencia, I

m	n											
	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	0.03612	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

\* Según Newmark (1935)

Fuente: Braja M. Das

El incremento del esfuerzo en cualquier punto debajo de una superficie rectangular cargada también se encuentra usando la ecuación (5) junto con la ilustración 5.

Para determinar el esfuerzo a profundidad z debajo del punto O, divida la superficie cargada en rectángulos. El punto O es la esquina común a cada rectángulo, luego use la ecuación (5) para calcular el incremento del esfuerzo a la profundidad z debajo de punto O causado por cada superficie rectangular. El incremento total del esfuerzo es causado por toda la superficie cargada que se expresa como:

$$\Delta p = q_o(I_1 + I_2 + I_3 + I_4) \quad (9)$$

Donde  $I_1, I_2, I_3$  e  $I_4$ = valores de influencia de los rectángulos 1, 2,3 y 4, respectivamente.

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

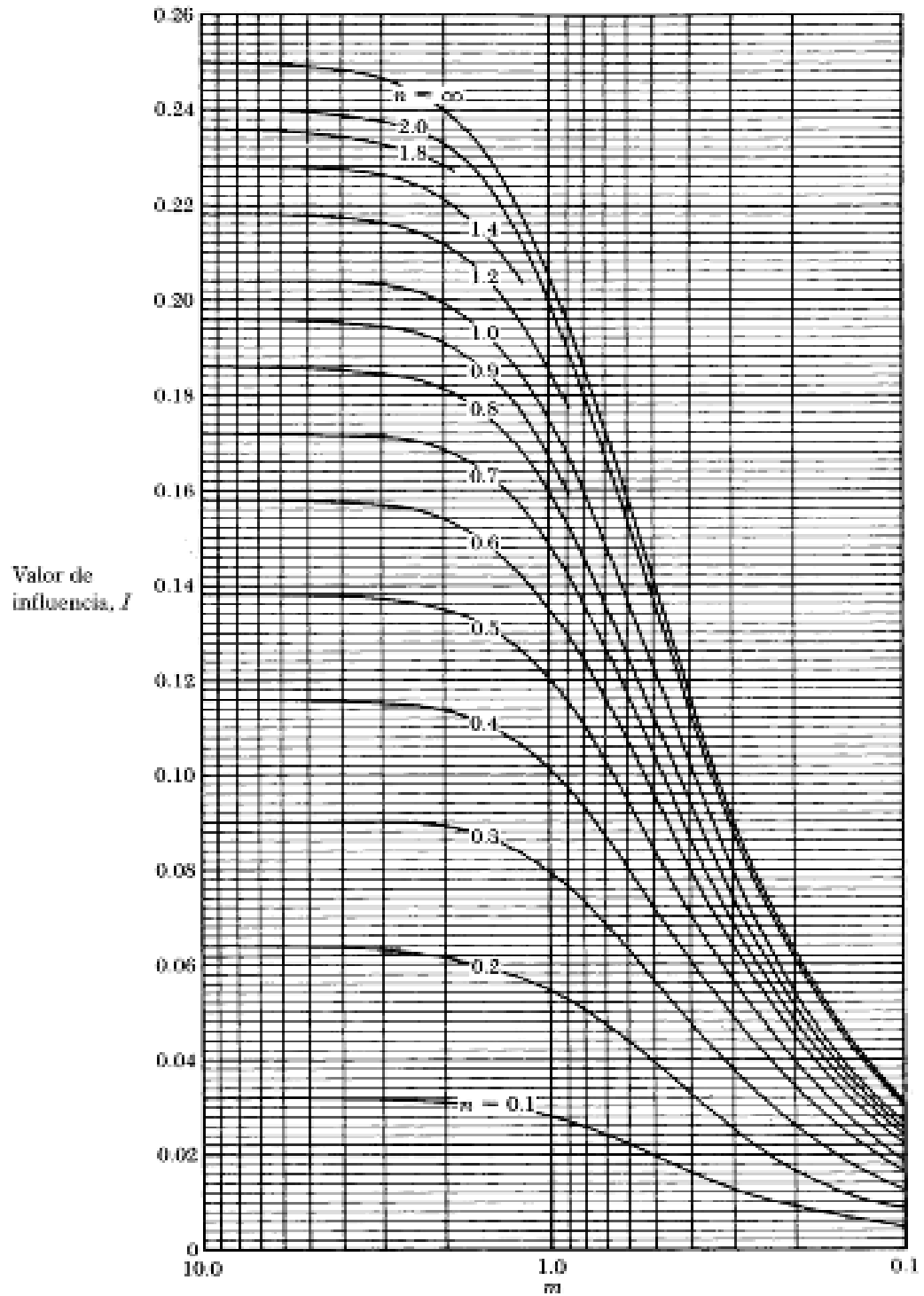
$$\Delta p = q_o I_c \quad (10)$$

**Tabla 3.** Continuación tabla 2

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
0.2	0.05994	0.06058	0.06100	0.06155	0.06178	0.06194	0.06199	0.06201	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
0.4	0.11135	0.11260	0.11342	0.11450	0.11495	0.11527	0.11537	0.11541	0.11543	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
0.6	0.15028	0.15207	0.15236	0.15483	0.15550	0.15598	0.15612	0.15617	0.15621	0.15622	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
0.8	0.17739	0.17967	0.18119	0.18321	0.18407	0.18469	0.18488	0.18496	0.18500	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
1.0	0.19546	0.19814	0.19994	0.20236	0.20341	0.20417	0.20440	0.20449	0.20455	0.20457	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
1.4	0.21510	0.21836	0.22058	0.22364	0.22499	0.22600	0.22632	0.22644	0.22652	0.22654	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
1.8	0.22372	0.22736	0.22986	0.23334	0.23495	0.23617	0.23656	0.23671	0.23681	0.23684	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
2.5	0.22940	0.23334	0.23614	0.24010	0.24196	0.24344	0.24392	0.24412	0.24425	0.24429	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
4.0	0.23200	0.23617	0.23912	0.24344	0.24554	0.24729	0.24791	0.24817	0.24836	0.24842	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
6.0	0.23249	0.23671	0.23970	0.24412	0.24630	0.24817	0.24885	0.24916	0.24939	0.24946	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
10.0	0.23261	0.23684	0.23985	0.24429	0.24650	0.24842	0.24914	0.24946	0.24973	0.24981	0.24989
∞	0.23263	0.23686	0.23987	0.24432	0.24654	0.24846	0.24919	0.24952	0.24980	0.24989	0.25000

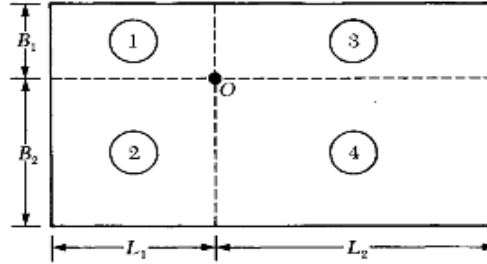
Fuente: Braja M. Das

**Ilustración 4:** variación de  $I$  con  $m$  y  $n$ , ecs. (5), (6), (6a).



Fuente: Braja M. Das

**Ilustración 5:** Esfuerzo debajo de cualquier punto de una superficie flexible rectangular cargada



**Fuente:** Braja M. Das

Donde

$$I_c = \frac{2}{\pi} \left( \left[ \frac{m_1 n_1}{\sqrt{m_1^2 + m_1^2 + 1}} \cdot \frac{m_1^2 + 2n_1^2 + 1}{(1+n_1^2)(m_1^2 + n_1^2)} \right] + \sin^{-1} \frac{m_1}{\sqrt{m_1^2 + n_1^2} \sqrt{1+n_1^2}} \right) \quad (11)$$

$$m_1 = \frac{L}{B} \quad (12)$$

$$n_1 = \frac{z}{\frac{B}{2}} \quad (13)$$

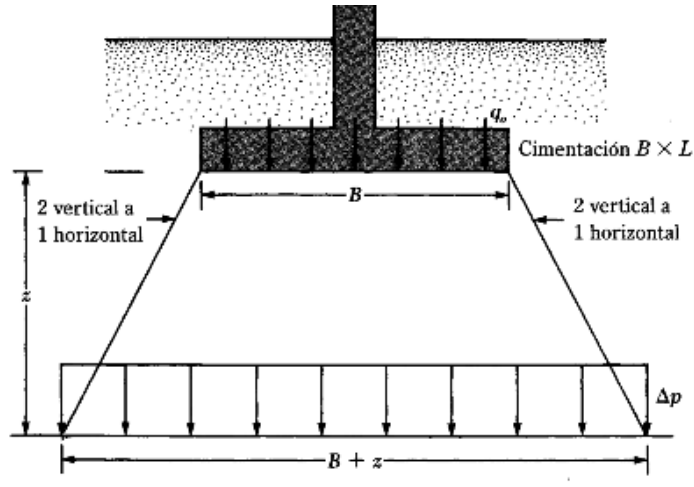
La variación de  $I_c$ , con  $m_1$  y  $n_1$  se da con la tabla 3.

**Tabla 4.** La variación de  $I_c$ , con  $m_1$  y  $n_1$

$m_1$	$n_1$									
	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:** Braja M. Das

**Ilustración 6.** Método 2.1 para encontrar el incremento de esfuerzo debajo de una cimentación



**Fuente:** Braja M. Das

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* (figura 4.6). De acuerdo con éste, el incremento del esfuerzo a la profundidad \$z\$ es:

$$\Delta p = \frac{q_0 \times B \times L}{(B+z)(L+z)} \quad (14)$$

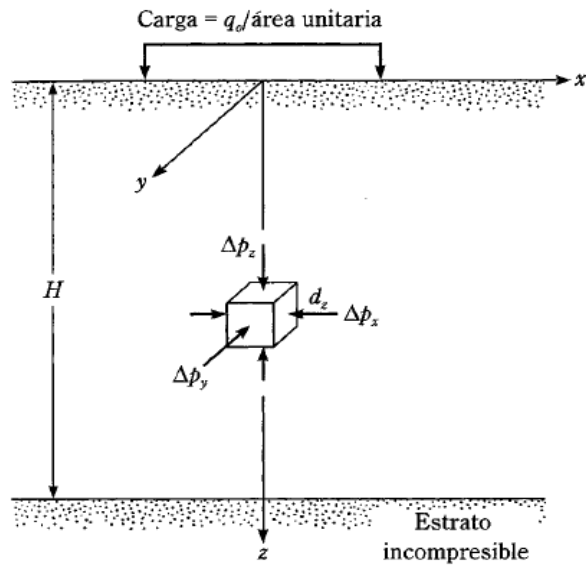
Note que la ecuación (14) se basa en la hipótesis de que el esfuerzo se difunde desde la cimentación a lo largo de líneas con una pendiente de 2 vertical a 1 horizontal.

## 1.2 CÁLCULO DE ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS BASADOS EN LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD

El asentamiento elástico de una cimentación superficial se estima usando la teoría de la elasticidad. Con referencia en la Figura 7 y aplicando la ley de Hooke,

$$S_e = \int_0^H \varepsilon_z dz = \frac{1}{E_s} \int_0^H (\Delta p_z - \mu_s \Delta p_x - \mu_s \Delta p_y) dz \quad (15)$$

**Ilustración 7:** Asentamiento elástico de cimentación superficial



Fuente: Braja M. Das

Donde  $S_e$ = asentamiento elástico

$E_s$ = módulo de elasticidad del suelo

$H$ = espesor del suelo

$\mu_s$ = Relación de Poisson de suelo

$\Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ = Incremento del esfuerzo debido a la carga neta aplicada a la cimentación en direcciones  $x, y, z$  respectivamente

Teóricamente, si la profundidad de la cimentación  $D_f=0$ ,  $H= \infty$ , y la cimentación es perfectamente flexible, de acuerdo con Harr (1996), el asentamiento se expresa como

$$S_e = \frac{Bq_0}{E_s} (1 - \mu_s^2) \frac{\alpha}{2} \text{ esquina de la cimentación flexible (16)}$$

$$S_e = \frac{Bq_0}{E_s} (1 - \mu_s^2) \alpha \text{ centro de la cimentación flexible (17)}$$

Donde

$$\alpha = \frac{1}{\pi} \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{1+m_1^2}+m_1}{\sqrt{1+m_1^2}-m_1} \right) + m \ln \left( \frac{\sqrt{1+m_1^2}+m_1}{\sqrt{1+m_1^2}-m_1} \right) \right] \quad (18)$$

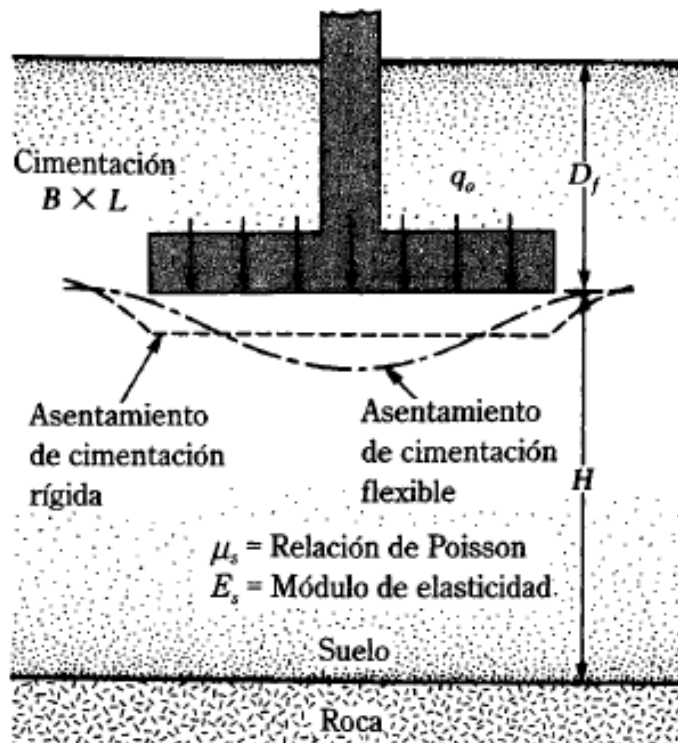
$$m_1 = L/B \quad (19)$$

B= ancho de la cimentación

L= longitud de la cimentación

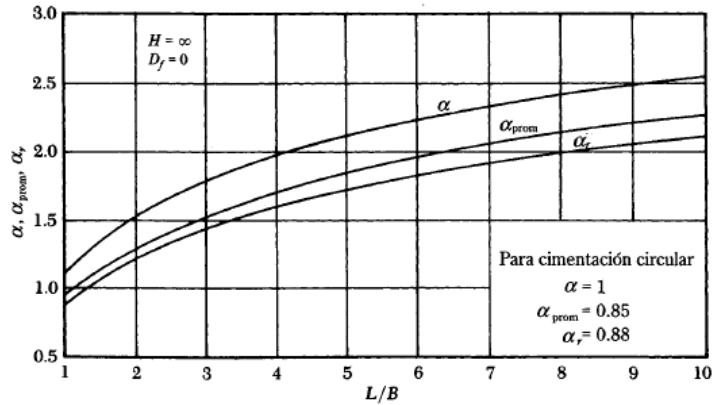
El asentamiento inmediato promedio también se expresa como:

**Ilustración 8:** Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas



Fuente: Braja M. Das

**Ilustración 9:** Valores de  $\alpha$ ,  $\alpha_{prom}$ ,  $\alpha_r$ ; Ecs (16), (17), (20), (21).



**Fuente:** Braja M. Das

$$S_e = \frac{Bq_0}{E_s} (1 - \mu_s^2) \alpha_{prom} \text{ (promedio para cimentación flexible)} \quad (20)$$

La (ilustración 9) muestra también los valores de  $\alpha_{prom}$  para varias relaciones L/B de una cimentación.

Sin embargo, si la cimentación mostrada en la ilustración 8 es rígida, el asentamiento inmediato será diferente y se expresa como

$$S_e = \frac{Bq_0}{E_s} (1 - \mu_s^2) \alpha_r \text{ (cimentación rígida)} \quad (21)$$

Los valores de  $\alpha_r$  para varias relaciones L/B de cimentaciones se muestra en la ilustración 9.

Si  $D_f = 0$  y  $H < \infty$  debido a la presencia de una capa rígida (incompresible), como muestra la ilustración 8.

$$S_e = \frac{Bq_0}{E_s} (1 - \mu_s^2) \left[ \frac{(1 - \mu_s^2)F_1 + (1 - \mu_s - 2\mu_s^2)F_2}{2} \right] \text{ esquina de la cimentación flexible} \quad (22)$$

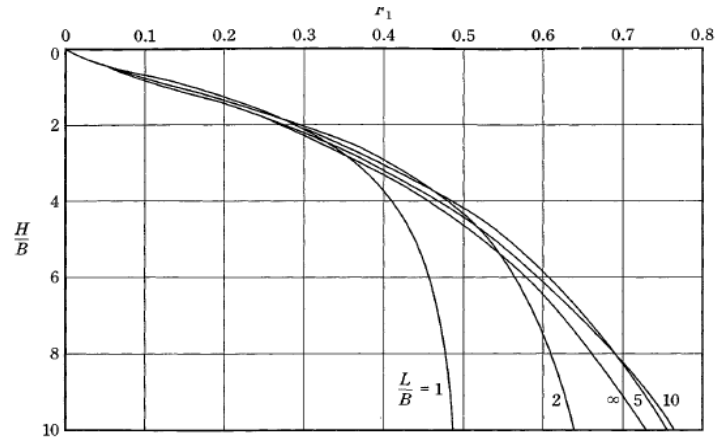
Y

$$S_e = \frac{Bq_0}{E_s} (1 - \mu_s^2) (1 - \mu_s^2)F_1 + (1 - \mu_s - 2\mu_s^2)F_2 \text{ esquina de la cimentación flexible} \quad (23)$$

Las variaciones de  $F_1$  y  $F_2$  con  $H/b$  se dan en las ilustración 10 y 11, respectivamente (Steinbrenner, 1934).

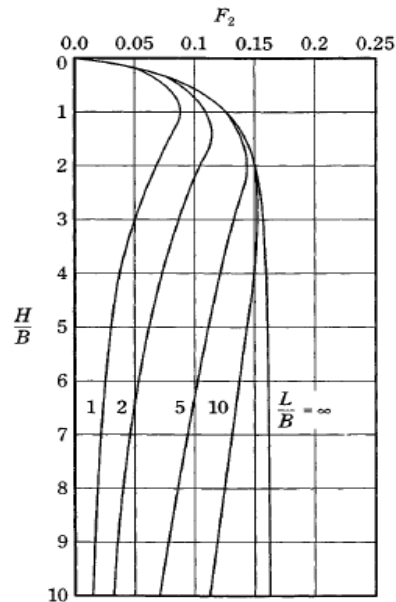
Es también importante ver que las relaciones anteriores para  $S_e$  suponen que la profundidad de la cimentación es igual a cero. Para  $D_f > 0$ , la magnitud  $S_e$  decrecerá.

**Ilustración 10:** Variación de  $F_1/HB$



**Fuente:** Braja M. Das

**Ilustración 11:** Variación de  $F_2/HB$



**Fuente:** Braja M. Das

## 2. MANEJO DE LOS PROGRAMAS DE ELEMENTOS FINITOS CODE\_BRIGHT Y GiD

El código de elementos finitos Code – Bright desarrollado por Olivella *et al.* (1996) requiere de un programa auxiliar para hacer más fácil el pre-proceso y post-proceso. Con el pre-proceso se define la geometría, condiciones de contorno, propiedades de los materiales, etapas de trabajo. GiD traduce estas entradas y las transforma en archivos de texto para el Code-Bright. Seguidamente GiD activa el cálculo y permite ver los resultados en un ambiente gráfico que se denomina el post-proceso.

### EJERCICIO RESUELTO.

Se pretende analizar los desplazamientos e incrementos de esfuerzos verticales, para una zapata aislada de  $B=1\text{m}$ , una carga  $P=200\text{KN/m}^2$ , y una sobrecarga de  $18\text{ KN/m}^2$ , en un suelo estratificado, compuesto por 3 capas, como se muestra en la ilustración 12.

#### Datos adicionales:

$$E1= 400 \text{ Mpa}$$

$$E2= 800 \text{ Mpa}$$

$$E3= 1200 \text{ Mpa}$$

$$\mu=0,3$$

$$\gamma= 18\text{KN/m}^3$$

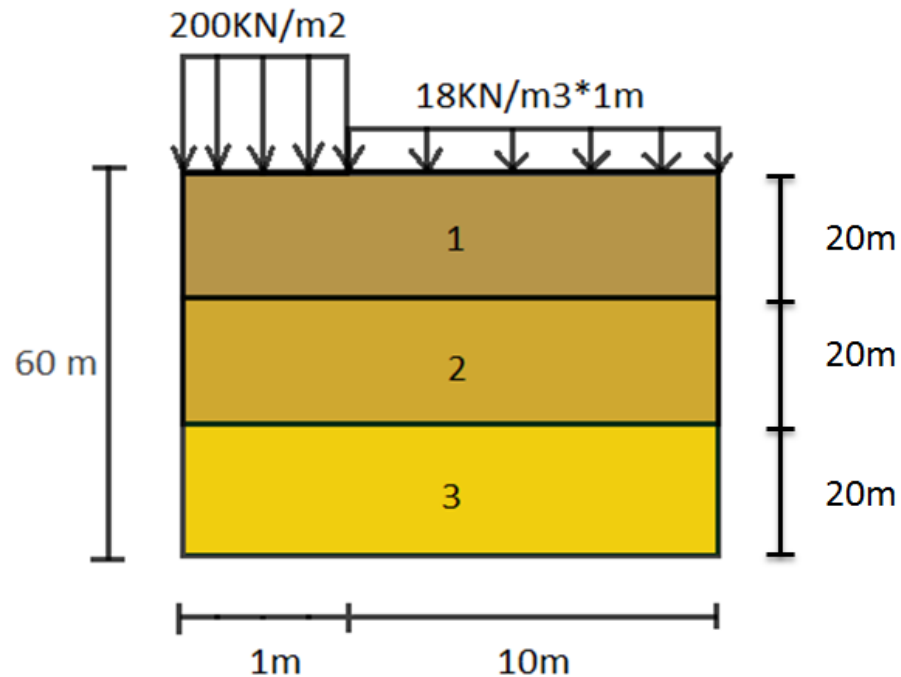
$$e = 0,55$$

$$n= \frac{e}{1+e}$$

$$h= 1\text{m}$$

$$Q \text{ sobrecarga} = \gamma * h = \frac{18 \text{ KN}}{\text{m}^3} * 1\text{m} = 18\text{KN/m}^2$$

**Ilustración 12.** Ilustración del ejercicio planteado.



**Fuente:** Registro Propio

## SOLUCIÓN

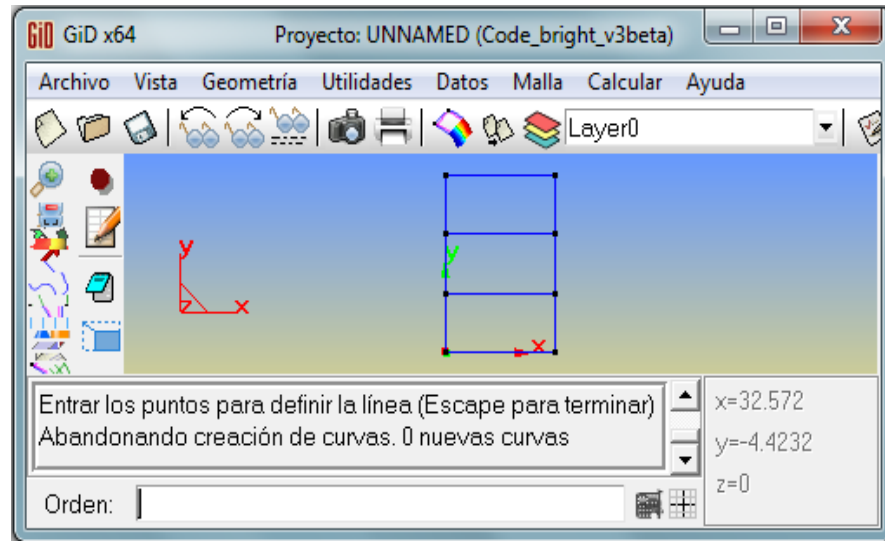
Dividimos el problema en 3 fases:

### FASE I

En la fase inicial se define la geometría del problema mediante nodos y sus respectivas coordenadas, después se procede a unir estos nodos por medio de líneas (Ilustración 13) y finalmente, a las líneas se les asigna un comando para crear las superficies, que corresponde a las capas estratificadas del suelo (ver Ilustración 14).

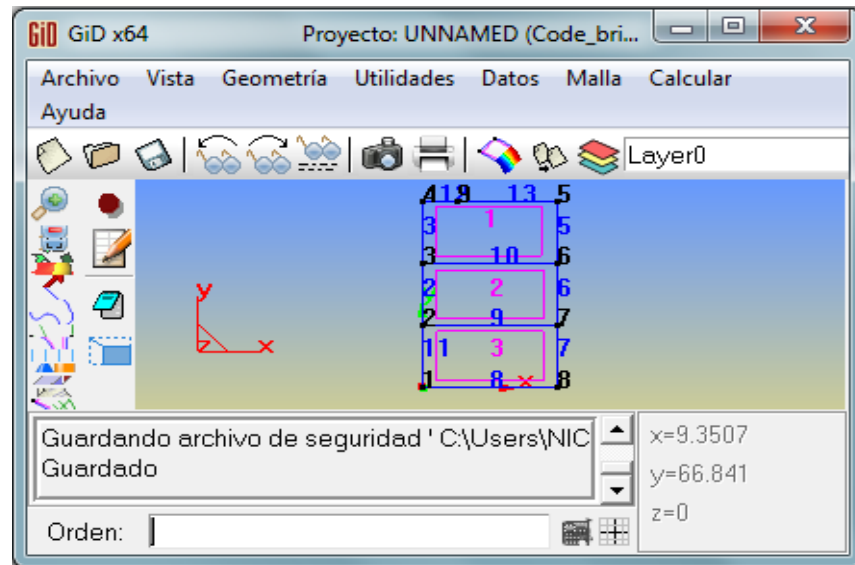
En esta primera fase no se tienen en cuenta la carga  $P$  de la edificación, ni la sobrecarga del suelo ( $\gamma \cdot h$ ), ya que se pretende eliminar los desplazamientos verticales que la gravedad ha ejercido en el proceso de conformación del suelo.

**Ilustración 13:** Geometría del código de elementos finitos para un suelo estratificado de 3 capas. CODE\_BRIGHT



**Fuente:** Registro Propio.

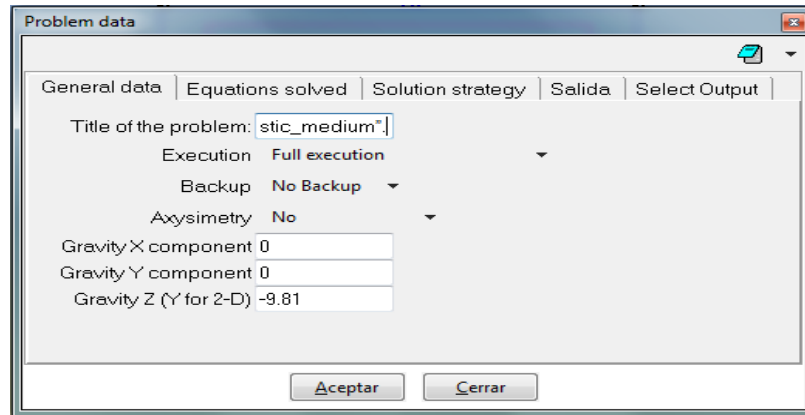
**Ilustración 14:** Superficie formada por medio de nodos



**Fuente:** Registro Propio.

En el siguiente paso se define el tipo de problema a resolver. Como se observa en la (Ilustración 15). En la casilla de datos generales se define si hay condición de axisimetría (zapatas circulares), y gravedad en los esfuerzos iniciales.

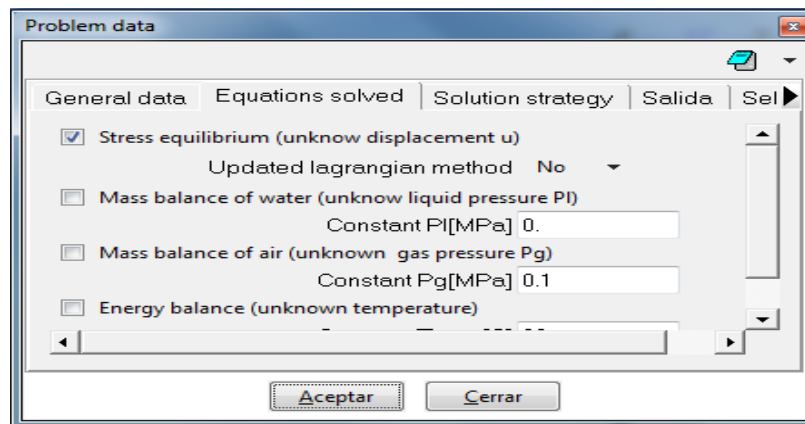
**Ilustración 15:** Datos del problema (Datos Generales)



**Fuente:** Registro Propio

En la Ilustración 16. Se define el equilibrio de los esfuerzos, los balances masivos de agua y en el balance de energía.

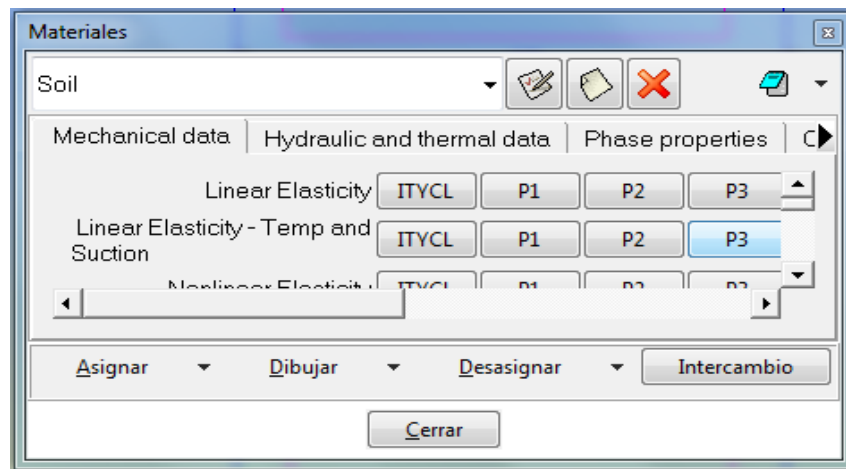
**Ilustración 16:** Datos del problema (Ecuaciones a resolver)



**Fuente:** Registro Propio

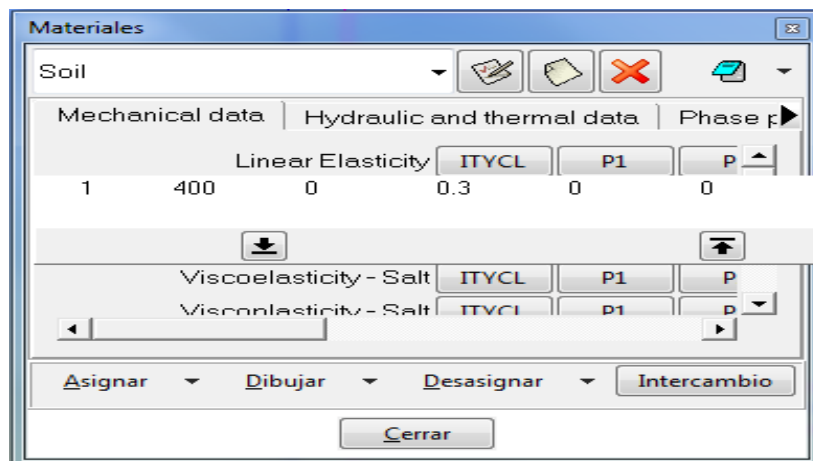
En la (Ilustración 17). Se definen los datos del material y el coeficiente de Poisson. En la (Ilustración 18,19 y 20). Notaremos los diferentes módulos de Elasticidad y coeficientes de Poisson, referentes a los tres estratos que utilizamos para el ejemplo citado, con módulos de elasticidad de 400,800 y 1200 Mpa.

**Ilustración 17:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



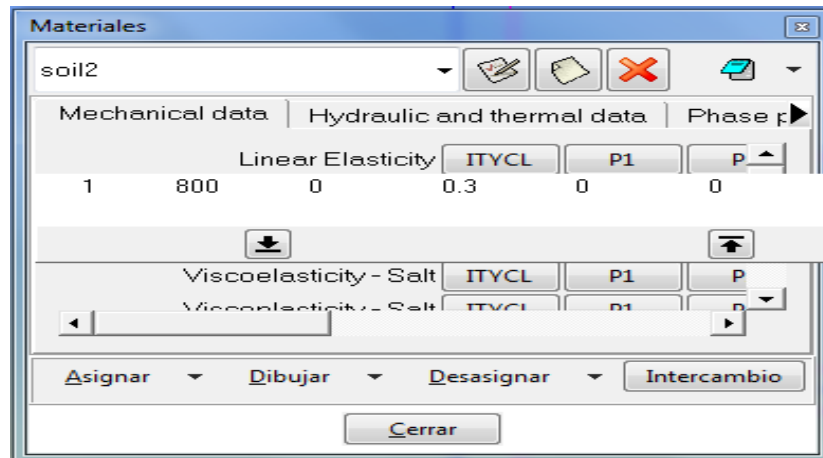
**Fuente:** Registro Propio

**Ilustración 18:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



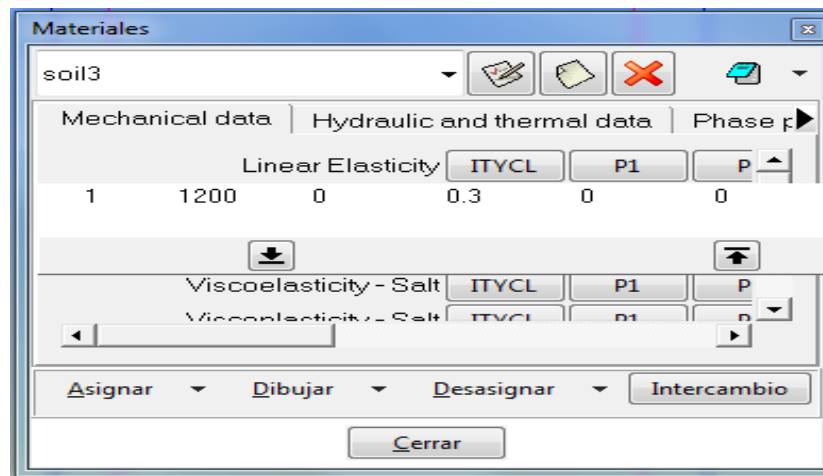
**Fuente:** Registro Propio

**Ilustración 19:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



**Fuente:** Registro Propio

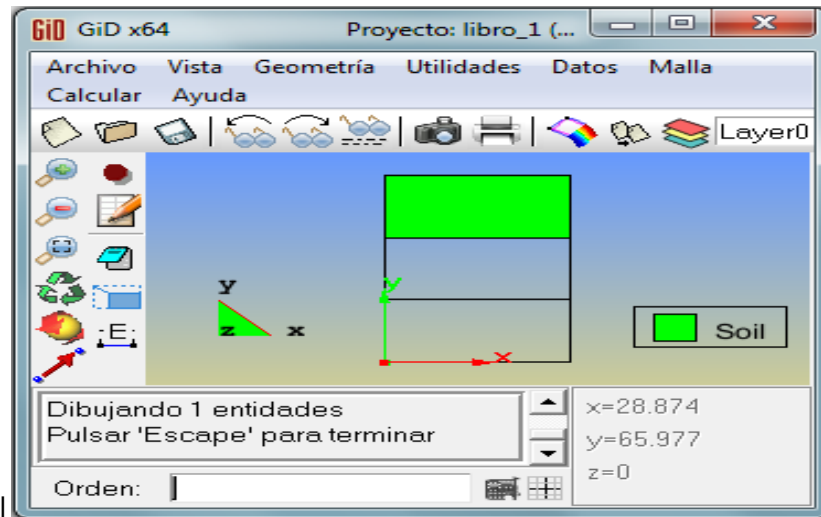
**Ilustración 20:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



**Fuente:** Registro Propio

Añadidas las propiedades de las 3 capas, se procede a seleccionar las superficies que cada una de estas conforma. Click en Dibujar, asignamos la capa y se muestran las 3 seguidamente, (Ilustración 21,22 y 23).

**Ilustración 21:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



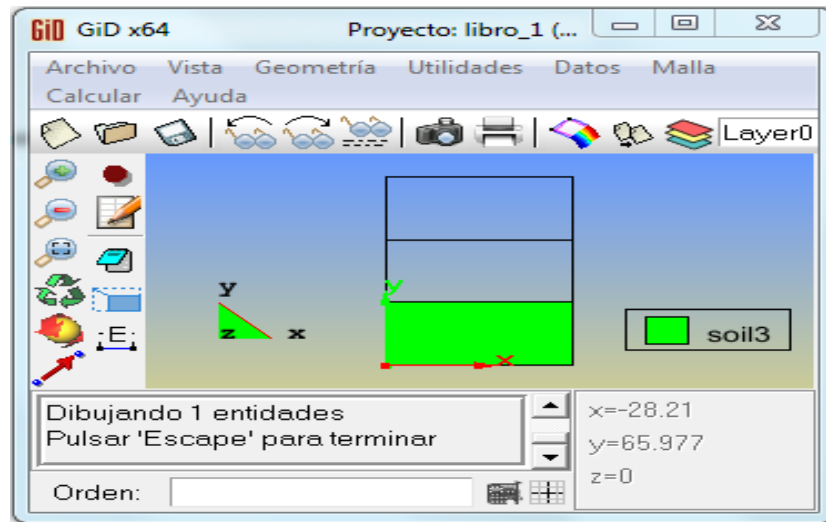
**Fuente:** Registro Propio

**Ilustración 22:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



**Fuente:** Registro Propio

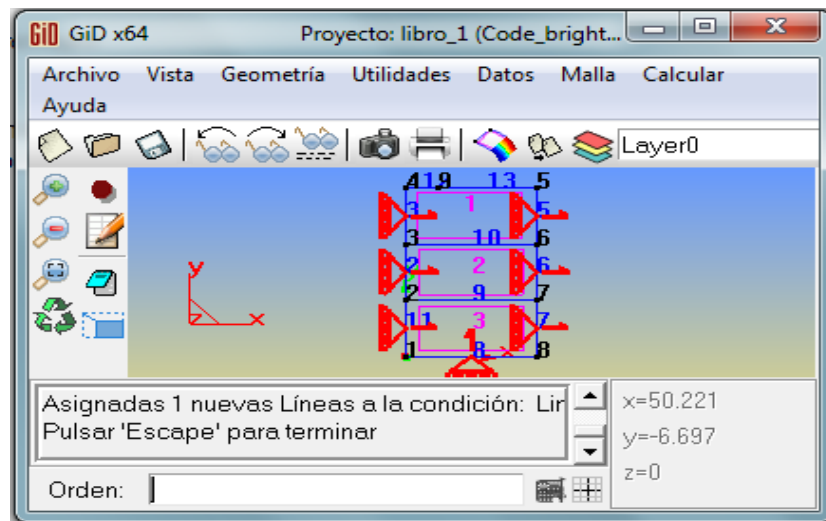
**Ilustración 23:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



**Fuente:** Registro Propio

Se introducen las restricciones de desplazamiento del suelo, en el eje X y el eje Y, evitando deformaciones ajenas al área que se quiere modelar. Ver (Ilustración 24).

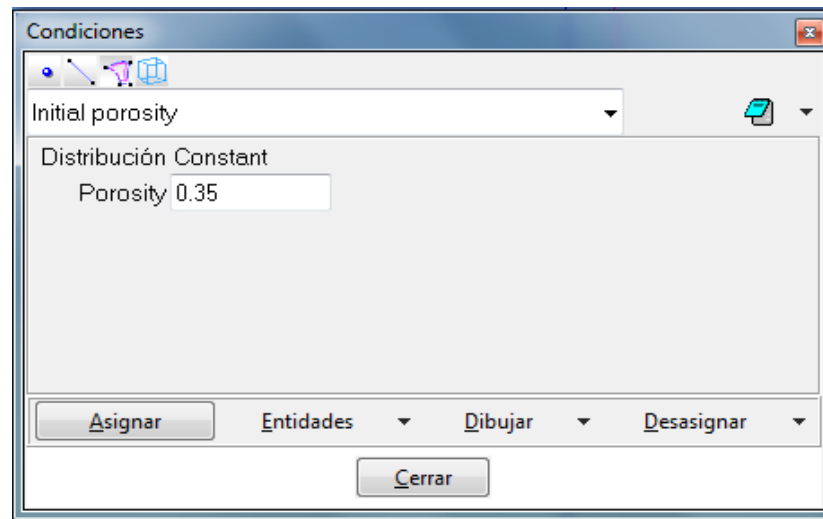
**Ilustración 24:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



**Fuente:** Registro Propio

Seguido, introducimos el valor de la Porosidad ( $n=0,35$ ), hallado al principio de la solución y se asignan las 3 superficies que corresponden a las capas del suelo estratificado, (Ilustración 25).

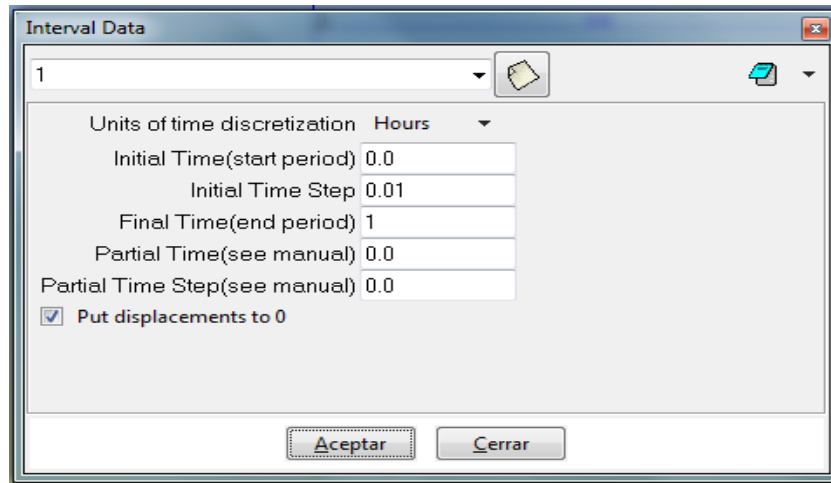
**Ilustración 25:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



**Fuente:** Registro Propio

Se guardan los datos y las condiciones anteriores, en un intervalo llamado (1), en nuestro caso. Este intervalo representa la fase 1 vista previamente, en donde no se aplican cargas de edificación ni sobrecargas del suelo, sólo el efecto de gravedad, eliminando los desplazamientos que ejerce esta sobre el suelo. Ver (Ilustración 26).

**Ilustración 26:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)

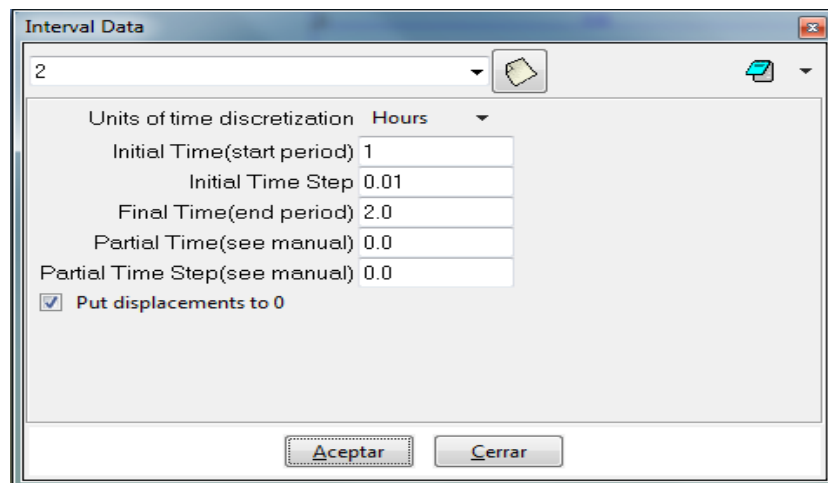


**Fuente:** Registro Propio

## FASE II

Se crea el intervalo (2), en donde se restringirán los desplazamientos y los incrementos de esfuerzo verticales ejercidos por la sobrecarga ( $\gamma \cdot h$ ), igualando estos a (0), ya que en teoría, han desaparecido con la conformación del terreno. Ver (Ilustración 27).

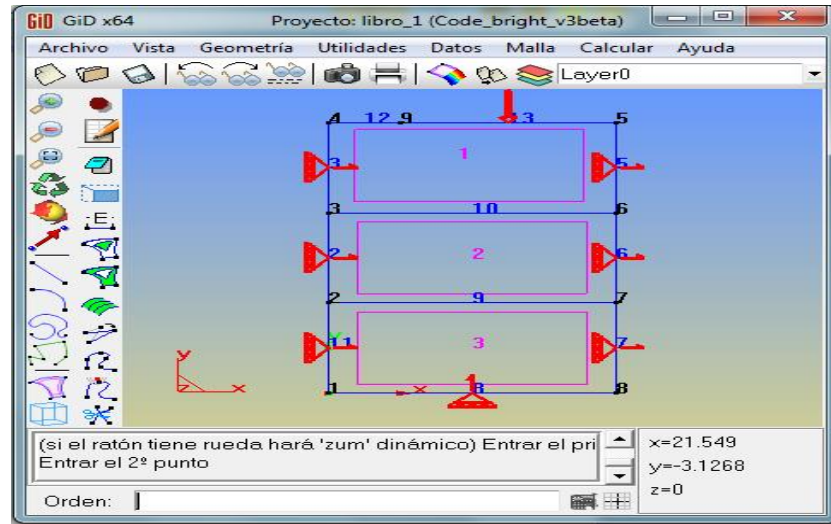
**Ilustración 27:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



**Fuente:** Registro Propio

La Ilustración 28, nos muestra las restricciones del terreno y la sobrecarga aplicada.

**Ilustración 28:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)

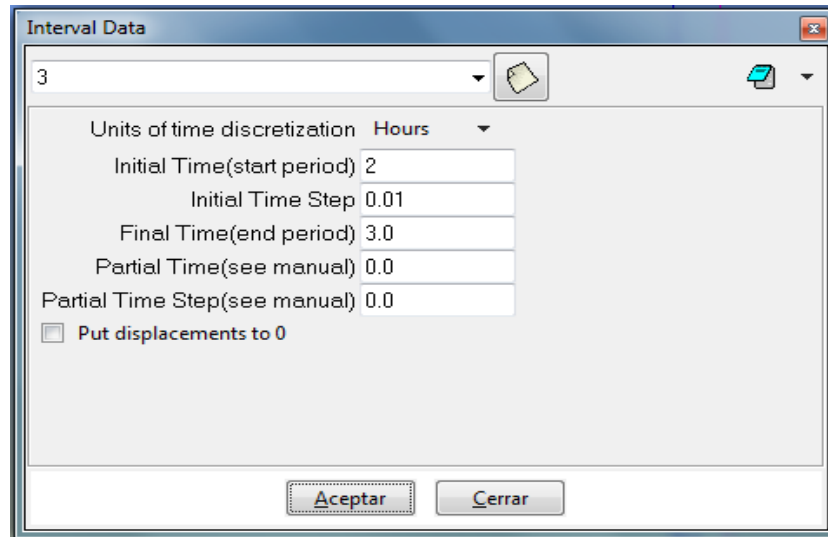


**Fuente:** Registro Propio

### FASE III

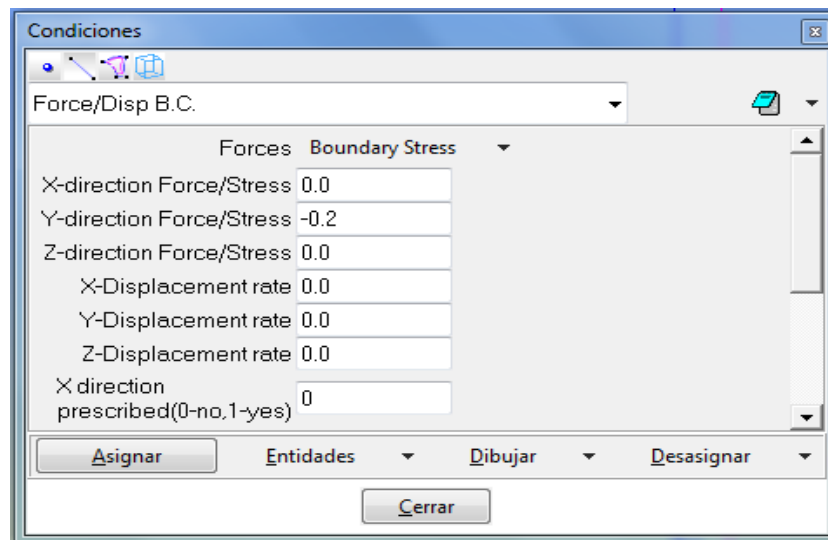
Creamos el tercer y último intervalo (Ilustración 29), en donde se introduce la carga del edificio (**P=0,2 Mpa**) Ilustración 30. Teniendo en cuenta que se debe desasignar la sobrecarga, ya que los desplazamientos e incrementos de esfuerzos verticales por gravedad y sobrecarga, fueron igualados a cero.

**Ilustración 29:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



Fuente: Registro Propio

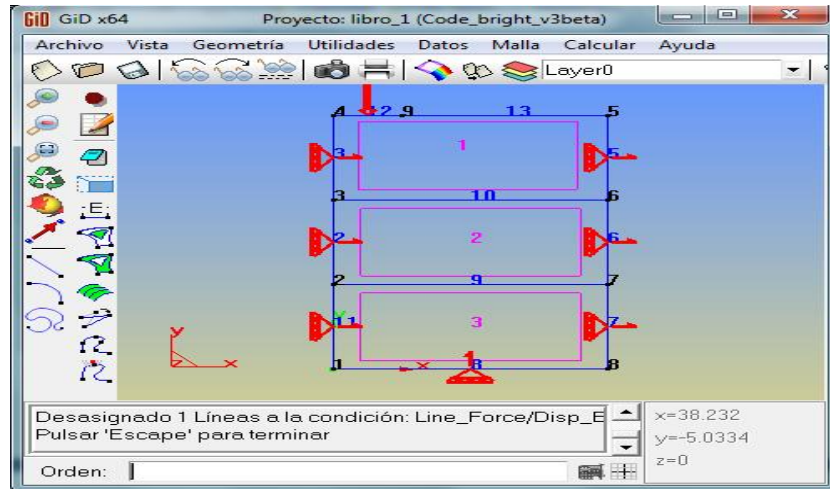
**Ilustración 30:** Propiedades del material (Modelo Mecánico)



Fuente: Registro Propio

La Ilustración 31, nos muestra las restricciones del terreno y la carga de la edificación aplicada.

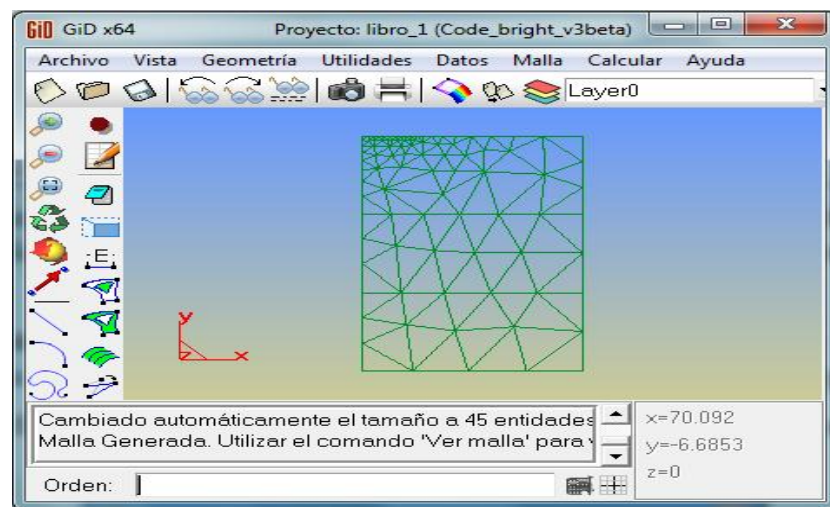
**Ilustración 31: Propiedades del material (Modelo Mecánico).**



**Fuente:** Registro Propio

Finalizadas las 3 fases, se procede a generar la malla. Ver (Ilustración 32).

**Ilustración 32: Propiedades del material (Modelo Mecánico).**



**Fuente:** Registro Propio

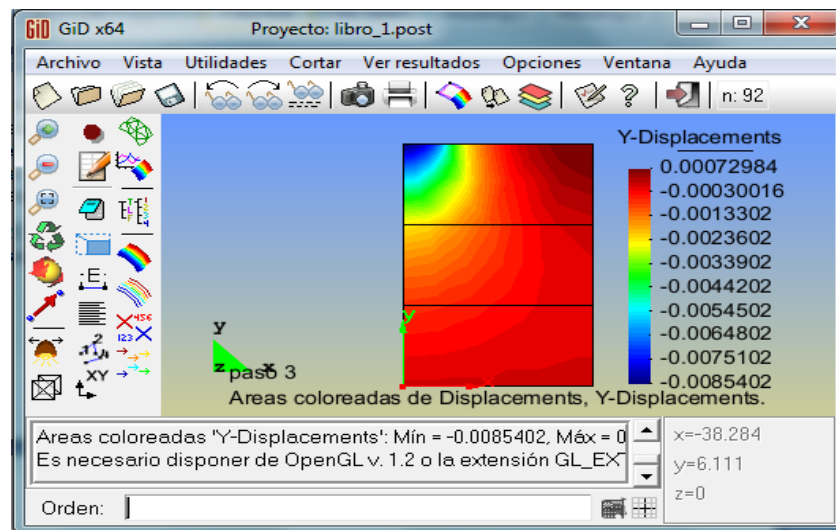
## POST-PROCESO

Se mostrarán los resultados de los desplazamientos verticales y la variación en los incrementos de esfuerzos de la tercera fase, donde está aplicada la carga del edificio que es la que nos interesa modelar, sin olvidar que fueron eliminados los asentamientos e incrementos de esfuerzo proporcionados por la gravedad y la sobrecarga del suelo.

En la Ilustración 33, se mostrarán los desplazamientos verticales (Asentamientos inmediatos del suelo).

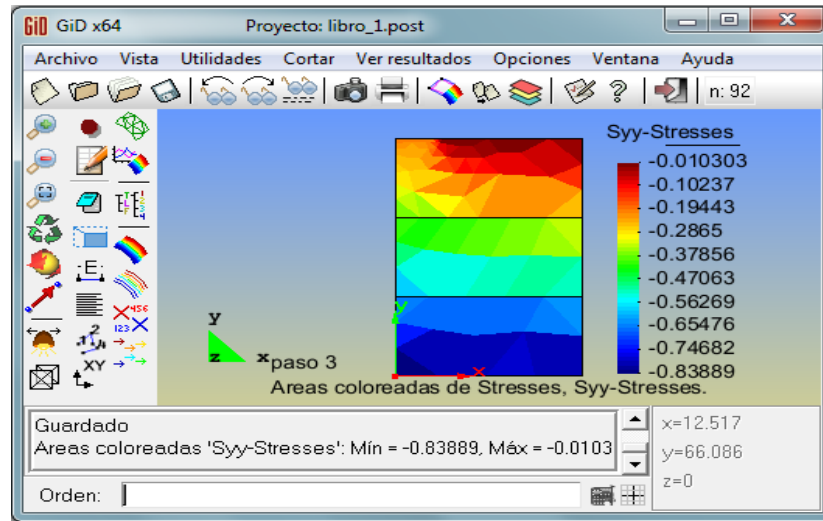
En la Ilustración 34, veremos los incrementos de esfuerzo.

**Ilustración 33: Propiedades del material (Modelo Mecánico).**



**Fuente:** Registro Propio

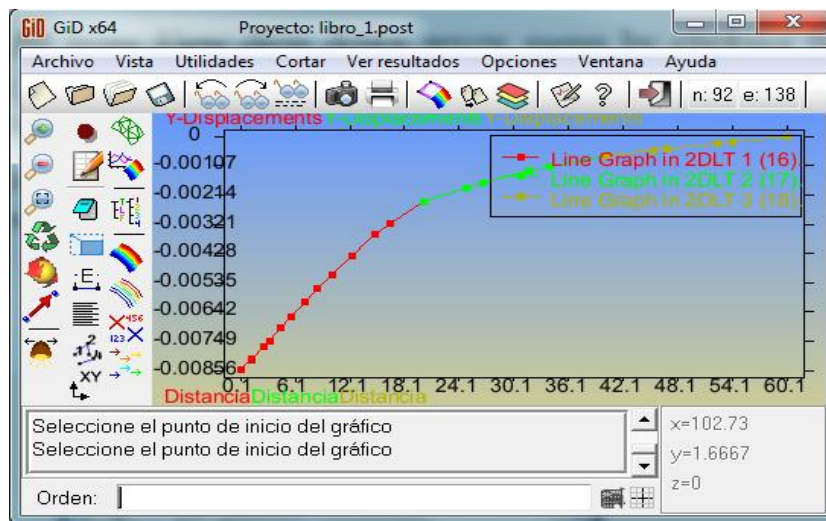
**Ilustración 34:** Propiedades del material (Modelo Mecánico).



**Fuente:** Registro Propio

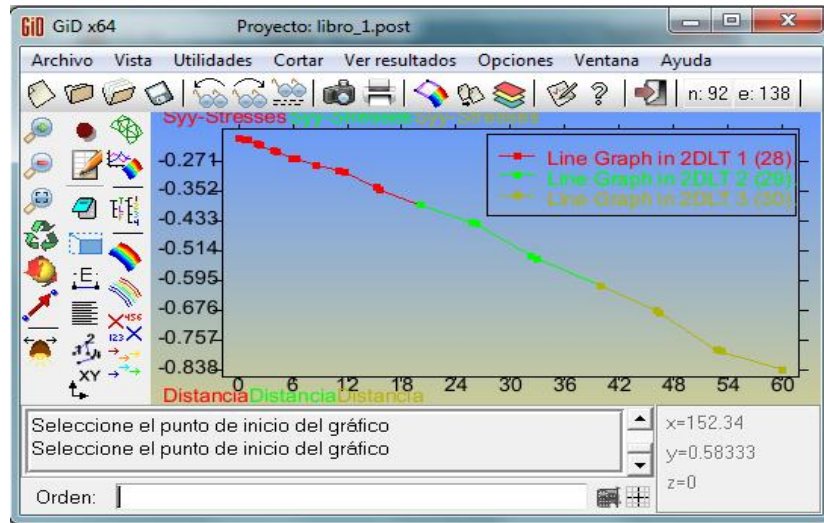
El programa también nos permite representar los resultados en un plano XY, de tal modo que se pueden exportar a Microsoft Excel y se realicen las respectivas comparaciones. Ver Ilustración 35 y 36.

**Ilustración 35:** Propiedades del material (Modelo Mecánico).



**Fuente:** Registro Propio

**Ilustración 36:** Propiedades del material (Modelo Mecánico).



**Fuente:** Registro Propio

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS EN SUELOS HOMOGENEOS Y ESTRATIFICADOS.

Una vez obtenidos todos los resultados de las pruebas del software, se procede a realizar un análisis de sensibilidad de las variables. Se analiza la evolución de los desplazamientos verticales y los incrementos de esfuerzos en suelos homogéneos y estratificados.

#### 3.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Después de ingresar la geometría y las condiciones del suelo como se explicó en el segundo capítulo, se obtienen los resultados de las distintas iteraciones, variando el módulo de rigidez E en cada uno de los estratos y se procede a exportar estos valores a Microsoft Excel.

Seguido, se calculan los esfuerzos geoestáticos ( $\gamma \cdot Z'$ ) y se restan a los esfuerzos obtenidos por el software.

**Tabla 5.** Valores exportados en Microsoft Excel

SUELO ESTRATIFICADO					
ESTRATO N1 (1m)		E=400 Mpa			
ESTRATO N2 (1m)		E=800 Mpa			
ESTRATO N3 (48m)		E=1600 Mpa			
Z (m)	Asent.	Z' (m)	$\sigma$ -Software	$\sigma$ -Geoestático	$\sigma_{Soft} - \sigma_{Geo}$
0,147702	-0,00145	0,051899	-0,28352	-0,00074	-0,28278
0,390576	-0,0013	0,486569	-0,24298	-0,00693	-0,23606
1,147703	-0,00105	1,051901	-0,19619	-0,01498	-0,18122
1,837062	-0,00096	1,566611	-0,21203	-0,02231	-0,18973
1,837062	-0,00096	2,051903	-0,21679	-0,02922	-0,18757
2,147705	-0,00088	2,55684	-0,18616	-0,03641	-0,14975
2,47091	-0,00085	3,209193	-0,17683	-0,04569	-0,13113
2,47091	-0,00085	3,800807	-0,1651	-0,05412	-0,11099
3,346175	-0,00079	4,423588	-0,16689	-0,06299	-0,10391
3,767268	-0,00076	4,949678	-0,16578	-0,07048	-0,09531
4,603692	-0,00072	5,588679	-0,16333	-0,07957	-0,08375

4,91752	-0,0007	5,588676	-0,16333	-0,07957	-0,08375
4,917523	-0,0007	6,253593	-0,1619	-0,08904	-0,07286
5,776614	-0,00066	6,766931	-0,16719	-0,09635	-0,07084
6,257088	-0,00064	7,405649	-0,17111	-0,10545	-0,06567
6,947991	-0,00061	7,405649	-0,17111	-0,10545	-0,06567
7,372304	-0,0006	8,042567	-0,17424	-0,11451	-0,05973
8,230534	-0,00057	8,828988	-0,17962	-0,12571	-0,0539
8,832456	-0,00055	9,3575	-0,1856	-0,13324	-0,05237
9,545473	-0,00053	10,2072	-0,19334	-0,14534	-0,048
9,545473	-0,00053	10,73317	-0,19803	-0,15282	-0,04521
10,21065	-0,00052	11,64771	-0,20798	-0,16585	-0,04214
10,21065	-0,00052	12,17103	-0,21446	-0,1733	-0,04116
10,92116	-0,0005	12,17103	-0,21446	-0,1733	-0,04116
11,65114	-0,00048	13,15185	-0,22591	-0,18726	-0,03865
12,35904	-0,00047	13,6724	-0,23231	-0,19467	-0,03763
13,15527	-0,00046	13,6724	-0,23231	-0,19467	-0,03763
13,86042	-0,00044	14,7208	-0,24514	-0,2096	-0,03553
14,72421	-0,00043	14,7208	-0,24514	-0,2096	-0,03553
15,42651	-0,00042	15,23847	-0,25153	-0,21697	-0,03456
16,359	-0,0004	16,35561	-0,26574	-0,23288	-0,03286
17,06506	-0,00039	16,35561	-0,26574	-0,23288	-0,03286
18,05376	-0,00038	16,87523	-0,27272	-0,24028	-0,03244
18,05377	-0,00038	18,05218	-0,28827	-0,25704	-0,03123
18,77745	-0,00037	18,05218	-0,28827	-0,25704	-0,03123
18,77745	-0,00037	18,58388	-0,29558	-0,26461	-0,03098
19,80864	-0,00036	19,8108	-0,31203	-0,28208	-0,02996
19,80864	-0,00036	19,8108	-0,31203	-0,28208	-0,02996
20,6271	-0,00035	20,41109	-0,31951	-0,29062	-0,02888
20,6271	-0,00035	21,51836	-0,33296	-0,30639	-0,02657
21,46889	-0,00034	22,07792	-0,34029	-0,31436	-0,02593
21,46889	-0,00034	23,42086	-0,35834	-0,33348	-0,02486
22,23323	-0,00033	24,11414	-0,36664	-0,34335	-0,02329
22,23323	-0,00033	25,49455	-0,38576	-0,363	-0,02275
23,3702	-0,00031	25,49456	-0,38576	-0,363	-0,02275
24,31903	-0,0003	25,95471	-0,39333	-0,36956	-0,02377
25,48102	-0,00029	25,95471	-0,39333	-0,36956	-0,02377
25,48102	-0,00029	27,51173	-0,4149	-0,39173	-0,02317
26,11207	-0,00028	27,51173	-0,4149	-0,39173	-0,02317
27,49558	-0,00026	28,03534	-0,42153	-0,39918	-0,02235
27,49558	-0,00026	29,67536	-0,44558	-0,42253	-0,02304
28,21514	-0,00025	29,67536	-0,44558	-0,42253	-0,02304

29,71178	-0,00024	30,07608	-0,45183	-0,42824	-0,0236
29,71178	-0,00024	30,07608	-0,45183	-0,42824	-0,0236
30,26363	-0,00023	31,64728	-0,47353	-0,45061	-0,02292
30,26363	-0,00023	32,14135	-0,47964	-0,45765	-0,02199
31,66422	-0,00021	32,14135	-0,47964	-0,45765	-0,02199
32,34611	-0,00021	33,74323	-0,50212	-0,48045	-0,02167
32,34611	-0,00021	33,74324	-0,50212	-0,48045	-0,02167
33,78792	-0,00019	34,13978	-0,50787	-0,4861	-0,02177
34,33641	-0,00018	34,13978	-0,50787	-0,4861	-0,02177
34,33641	-0,00018	35,74426	-0,52969	-0,50895	-0,02074
35,78046	-0,00017	36,15989	-0,53536	-0,51486	-0,0205
35,78046	-0,00017	37,76336	-0,5574	-0,53769	-0,0197
36,35663	-0,00016	38,17685	-0,56309	-0,54358	-0,0195
36,35663	-0,00016	39,784	-0,58516	-0,56647	-0,0187
37,79799	-0,00014	40,18979	-0,59077	-0,57224	-0,01852
37,79799	-0,00014	41,80392	-0,6129	-0,59523	-0,01768
38,37247	-0,00014	41,80392	-0,6129	-0,59523	-0,01768
38,37247	-0,00014	42,20576	-0,61847	-0,60095	-0,01752
39,81763	-0,00012	42,20576	-0,61847	-0,60095	-0,01752
39,81763	-0,00012	43,81678	-0,64051	-0,62389	-0,01662
40,38269	-0,00011	43,81678	-0,64051	-0,62389	-0,01662
40,38269	-0,00011	44,22182	-0,64612	-0,62965	-0,01647
41,83624	-9,62E-05	44,22182	-0,64612	-0,62965	-0,01647
42,39711	-8,97E-05	45,83191	-0,66816	-0,65258	-0,01558
43,84498	-7,29E-05	46,23697	-0,67415	-0,65835	-0,01581
44,41162	-6,64E-05	47,85098	-0,6985	-0,68133	-0,01717
44,41162	-6,64E-05	47,85098	-0,6985	-0,68133	-0,01717
45,85682	-4,97E-05	48,46533	-0,70312	-0,69007	-0,01304
45,85682	-4,97E-05	50,05199	-0,71267	-0,71267	0
46,42483	-4,31E-05				
46,42483	-4,31E-05				
47,87412	-2,63E-05				
47,87412	-2,63E-05				
48,73772	-1,63E-05				
48,73772	-1,63E-05				
50,14779	-1,25E-09				

Fuente: Registro Propio

Después de obtener la tabla anterior, se varía el módulo de rigidez E en los diferentes estratos y se grafican los asentamientos inmediatos y los incrementos de esfuerzos verticales en función de la profundidad, pretendiendo extraer el respectivo análisis y conclusiones pertinentes.

## SUELO HOMOGÉNEO

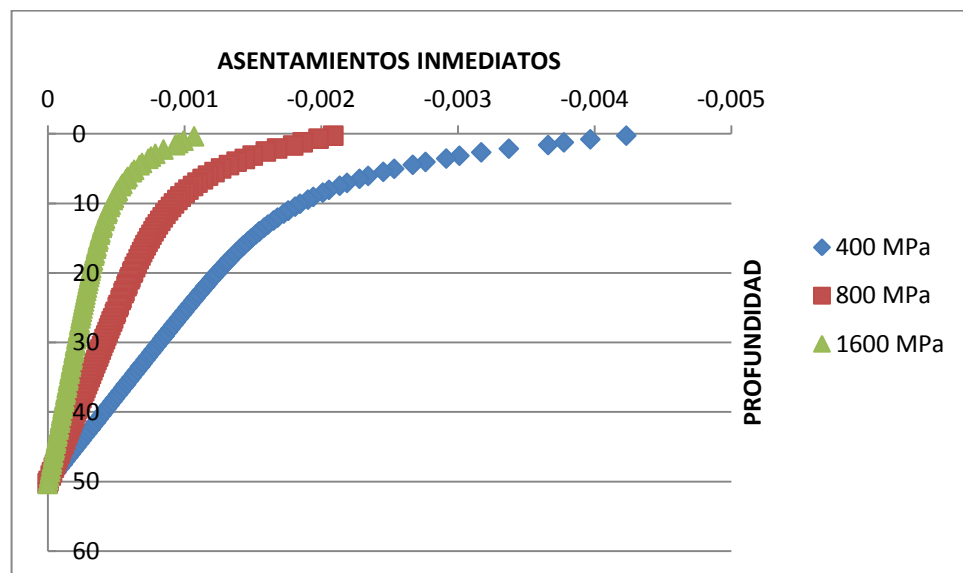
Para un suelo homogéneo de 11m de ancho\* 50m de profundidad, con una porosidad ( $n=0,35$ ), una relación de Poisson ( $\mu=0,3$ ) y una carga ( $P=200\text{KN/m}^2$ ), se realizan 3 simulaciones variando los módulos de rigidez:

$E_1=400\text{ Mpa}$   $E_2=800\text{ Mpa}$   $E_3=1600\text{ Mpa}$

Se puede ver claramente la influencia del módulo de deformación E, en la gráfica de asentamientos inmediatos, ya que estos varían inversamente proporcional, al módulo de deformación E, ver (Ilustración 37).

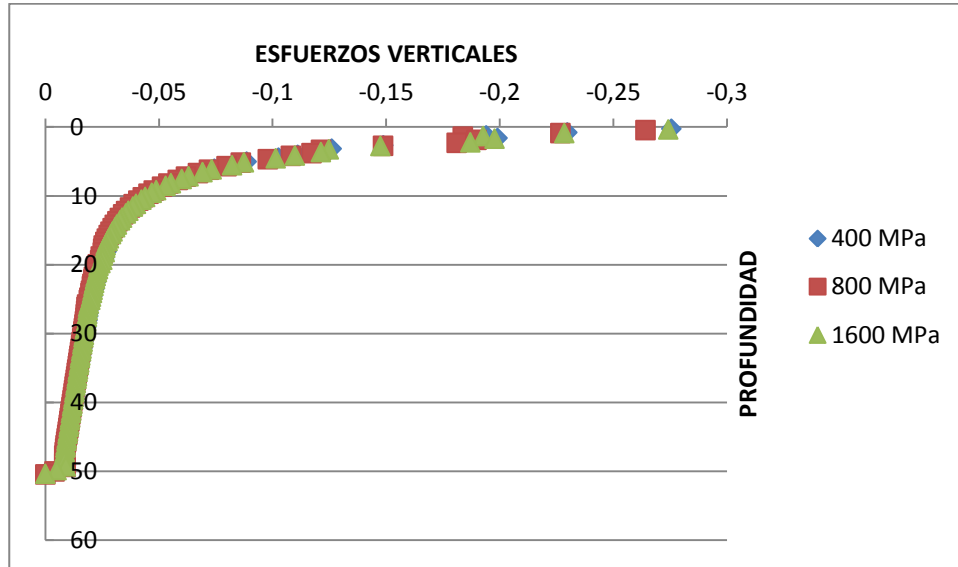
En la Ilustración 38, se observa la independencia lineal de los incrementos de esfuerzos verticales, con el módulo de rigidez E.

**Ilustración 37:** Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

**Ilustración 38:** Incremento de esfuerzos verticales (Modelo Mecánico).



**Fuente:** Registro Propio

### SUELO ESTRATIFICADO DE 2 CAPAS - ESTRATO BLANDO SOBRE ESTRATO RÍGIDO

Para un medio de dos estratos, con una capa superior de (11m de ancho \* 1m de profundidad) y una capa inferior de (11m de ancho\*49m de profundidad), una porosidad ( $n=0,35$ ), una relación de Poisson ( $\mu=0,3$ ) y una carga ( $P=200\text{KN/m}^2$ ).

Se pretende comparar los asentamientos inmediatos totales de suelos homogéneos con suelos estratificados, manteniendo constante el estrato superior (blando) con un módulo de rigidez  $E=400\text{Mpa}$  y variando el módulo de rigidez  $E$  en el estrato inferior, con valores de 400,800 Y 1600 Mpa.

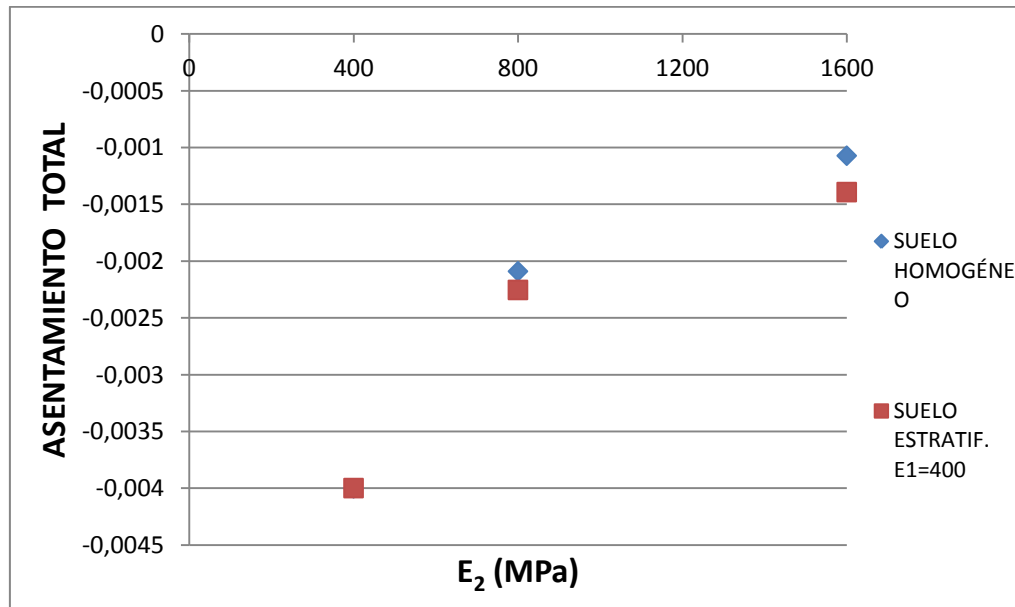
En la ilustración 39 se observan los asentamientos inmediatos totales, producidos en la superficie del terreno por suelos homogéneos y suelos estratificados respectivamente. Notamos que los suelos estratificados tienen el mismo

comportamiento que los suelos homogéneos, cuando estos presentan los mismos módulos de rigidez E en sus dos estratos.

Al comparar los suelos homogéneos con los estratificados, podemos ver como se incrementan los valores de asentamientos inmediatos totales en suelos estratificados, por la influencia del estrato superior blando E=400 MPa.

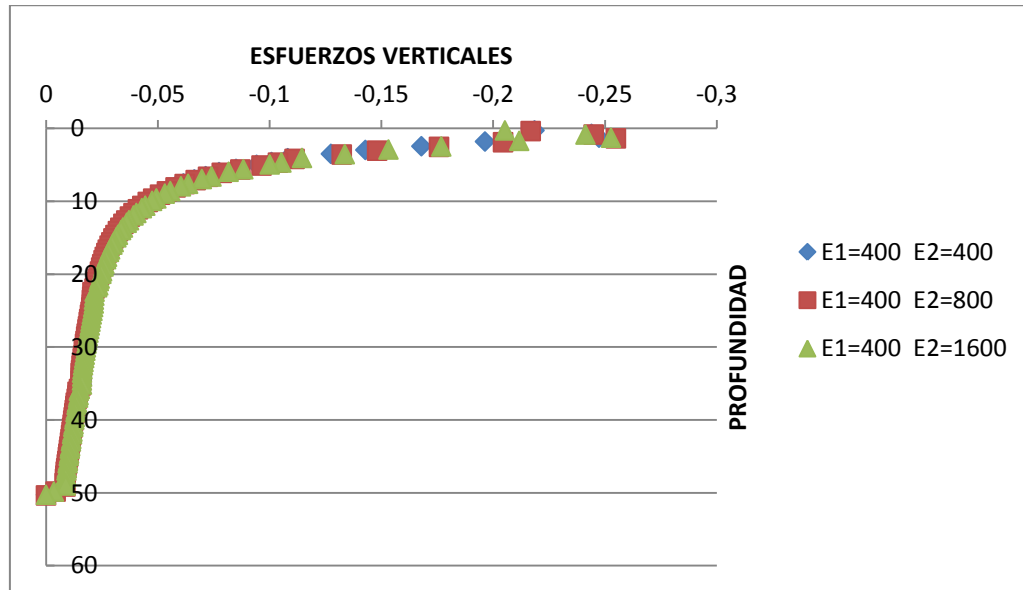
Los incrementos de esfuerzos verticales en suelos estratificados, nos muestran valores muy similares a los suelos homogéneos anteriores, corroborando que los incrementos de esfuerzos verticales, son independientes del módulo de rigidez E. Ver ilustración 40.

**Ilustración 39:** Análisis de asentamientos totales inmediatos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

**Ilustración 40:** Incremento de esfuerzos verticales (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

### **SUELO ESTRATIFICADO DE 2 CAPAS – ESTRATO RÍGIDO SOBRE ESTRATO BLANDO**

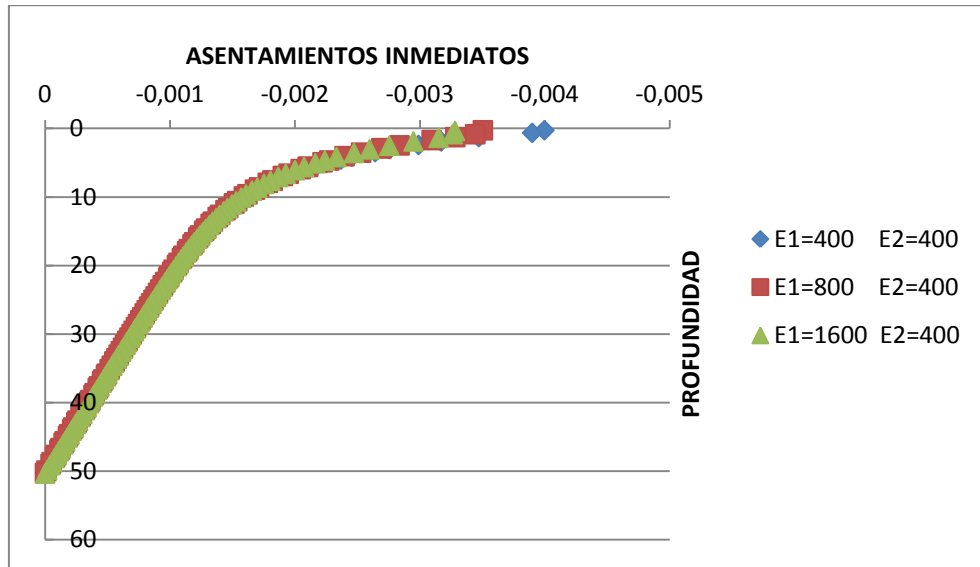
Para un medio de dos estratos, con una capa superior de (11m de ancho\*1m de profundidad) y una capa inferior de (11m de ancho\*49m de profundidad), una porosidad ( $n=0,35$ ), una relación de Poisson ( $\mu=0,3$ ) y una carga ( $P=200\text{KN/m}^2$ ).

Se quiere analizar el efecto que produce el estrato superior, modificando el módulo de rigidez E con valores de 400, 800,1600 Mpa, y dejando el estrato inferior blando, con un módulo de rigidez  $E=400$  Mpa.

Podemos notar que no existe mucha variación en la distribución de asentamientos inmediatos en profundidad, al variar los módulos de rigidez E en el estrato superior (Ilustración 41), es decir, el comportamiento de los desplazamientos verticales es muy similar.

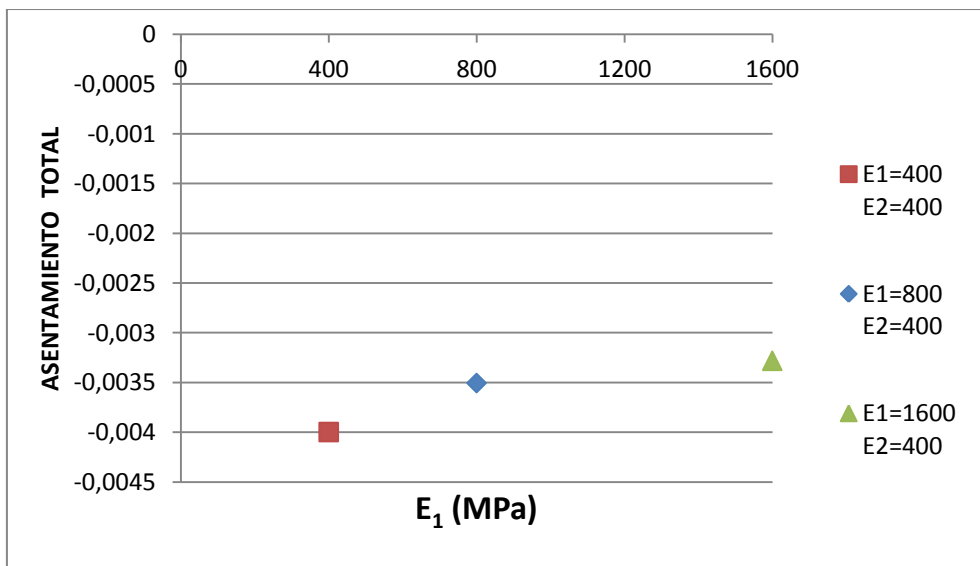
Sin embargo, cuando se analiza el asentamiento total medido en la superficie del terreno (Ilustración 42), podemos ver que estos valores difieren en función de los módulos de rigidez del suelo.

**Ilustración 41:** Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

**Ilustración 42:** Análisis de asentamientos totales inmediatos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

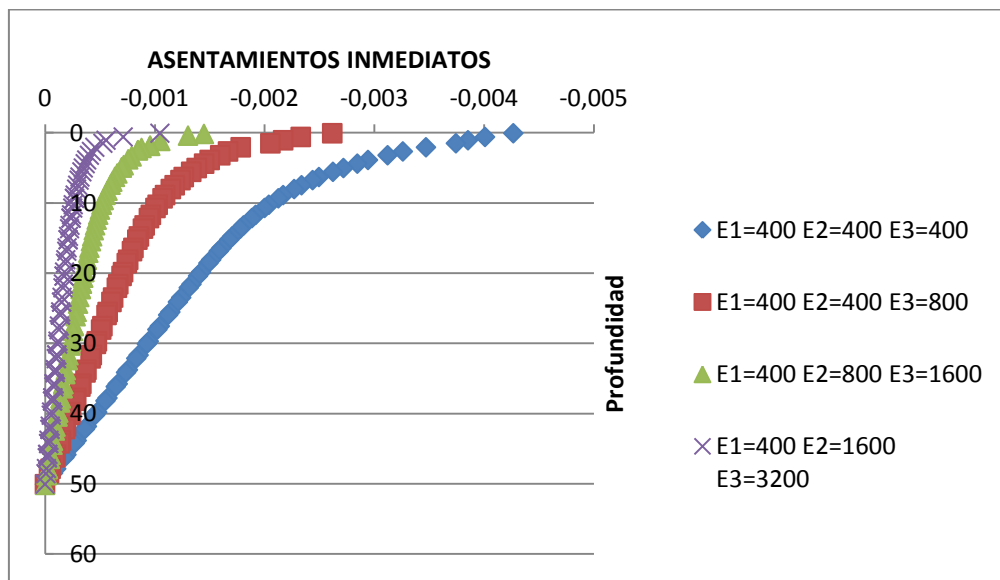
## SUELO ESTRATIFICADO DE 3 CAPAS – ESTRATO BLANDO SOBRE ESTRATOS RÍGIDOS

Para un medio tres estratos, con una capa superior de (11m de ancho\*1m de profundidad), una capa intermedia de (11m de ancho\*1m de profundidad), y una inferior (11m de ancho\*48m de profundidad), porosidad ( $n=0,35$ ), una relación de Poisson ( $\mu=0,3$ ) y una carga ( $P=200\text{KN/m}^2$ ).

Se pretende analizar el comportamiento de los asentamientos inmediatos, para un estrato superior blando  $E=400$  MPa, aumentando los módulos de rigidez  $E$  en los estratos intermedios e inferiores.

Podemos notar que cuando los tres estratos son blandos, los desplazamientos verticales totales son aproximadamente iguales a los del suelo homogéneo y a medida que se aumenta al doble el módulo de rigidez  $E$  en las capas inferiores, de igual forma, los valores de desplazamientos verticales se reducen al doble, ver Ilustración 43.

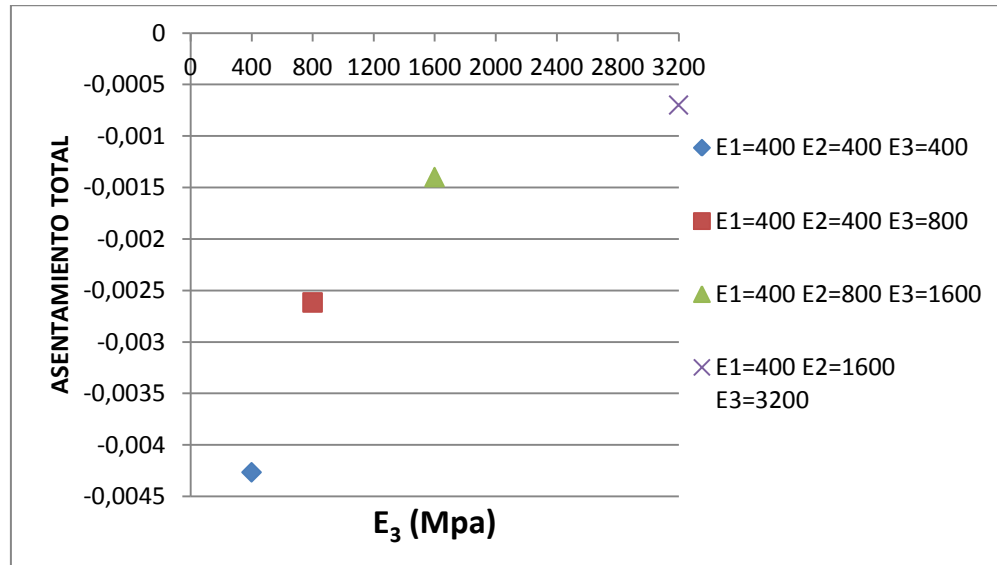
**Ilustración 43:** Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

Para corroborar lo planteado anteriormente, se grafican los asentamientos totales inmediatos en la superficie del terreno, y se observa nuevamente el efecto de la rigidez en los desplazamientos verticales. Ver Ilustración 44.

**Ilustración 44:** Análisis de asentamientos totales inmediatos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

### SUELO ESTRATIFICADO DE 3 CAPAS – ESTRATO BLANDO SOBRE ESTRATOS RÍGIDOS

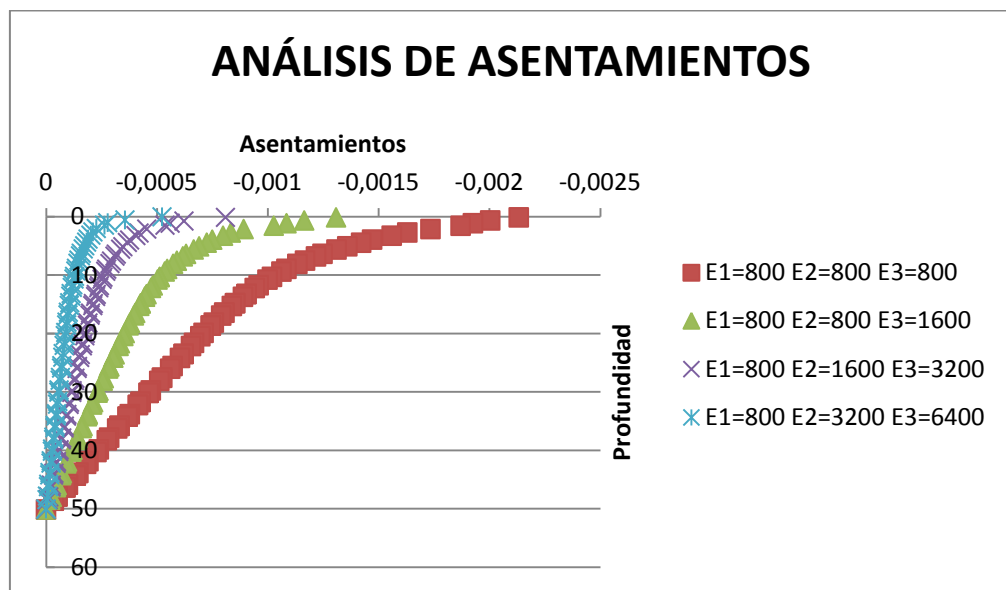
Para un medio tres estratos, con una capa superior de (11m de ancho\*1m de profundidad), una capa intermedia de (11m de ancho\*1m de profundidad), y una inferior (11m de ancho\*48m de profundidad), porosidad ( $n=0,35$ ), una relación de Poisson ( $\mu=0,3$ ) y una carga ( $P=200\text{KN/m}^2$ ).

Con este modelo se pretende encontrar la diferencia que se presenta en los asentamientos inmediatos, al aumentar al doble los módulos de rigidez E en los

estratos inferiores, en comparación al modelo anterior (Ilustración 43) y dejar el estrato superior blando con una rigidez ( $E=400$  MPa).

En la ilustración 45, se muestra que los desplazamientos verticales son reducidos a la mitad, en comparación a los desplazamientos del modelo anterior, es decir, se comprueba la dependencia del módulo de rigidez  $E$ , con los asentamientos inmediatos.

**Ilustración 45:** Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico).

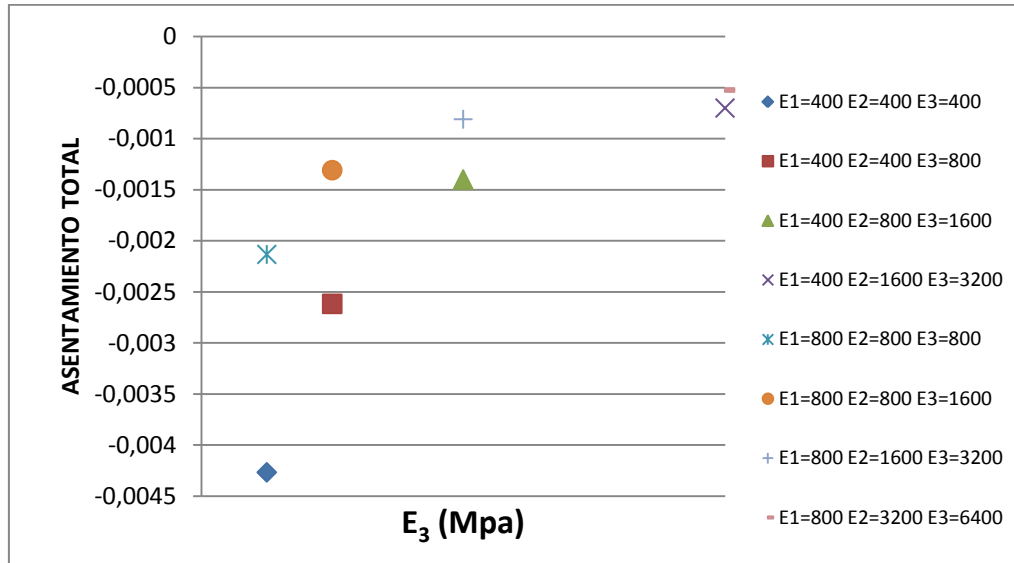


**Fuente:** Registro Propio

Para proporcionar un análisis más profundo, se grafican los asentamientos totales inmediatos en la superficie del nuevo modelo, y se comparan con los resultados del modelo anterior, ver ilustración 46.

Se ve claramente que al aumentar los módulos de rigidez  $E$  al doble, los asentamientos inmediatos se reducen en igual proporción.

**Ilustración 46:** Análisis de asentamientos totales inmediatos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

### SUELO ESTRATIFICADO DE 3 CAPAS – ESTRATO RÍGIDO SOBRE ESTRATOS BLANDOS

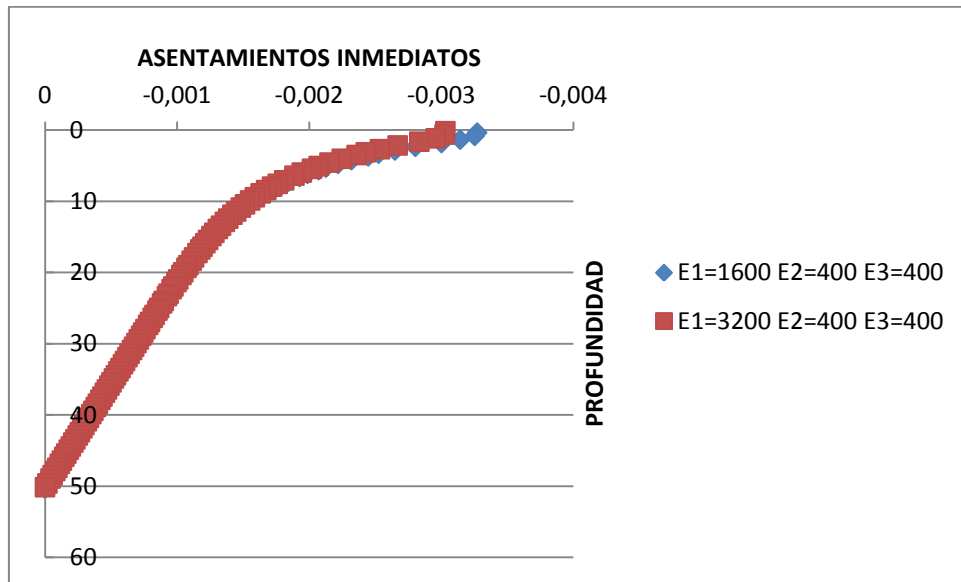
Para un medio tres estratos, con una capa superior de (11m de ancho\*1m de profundidad), una capa intermedia de (11m de ancho\*1m de profundidad), y una inferior (11m de ancho\*48m de profundidad), porosidad ( $n=0,35$ ), una relación de Poisson ( $\mu=0,3$ ) y una carga ( $P=200\text{KN/m}^2$ ).

Se busca analizar el comportamiento de los asentamientos inmediatos e incremento de esfuerzos verticales, al variar la rigidez en el estrato superior ( $E=1600, 3200$  Mpa) y asignando valores menores de rigidez en los estratos inferiores.

Podemos notar que los desplazamientos verticales, con estratos superiores rígidos e inferiores blandos, presentan un comportamiento bastante similar, con la

diferencia que con un módulo de rigidez  $E=1600$  Mpa, se presentan desplazamientos verticales mayores en los primeros 5 metros de profundidad. Ver ilustración 47.

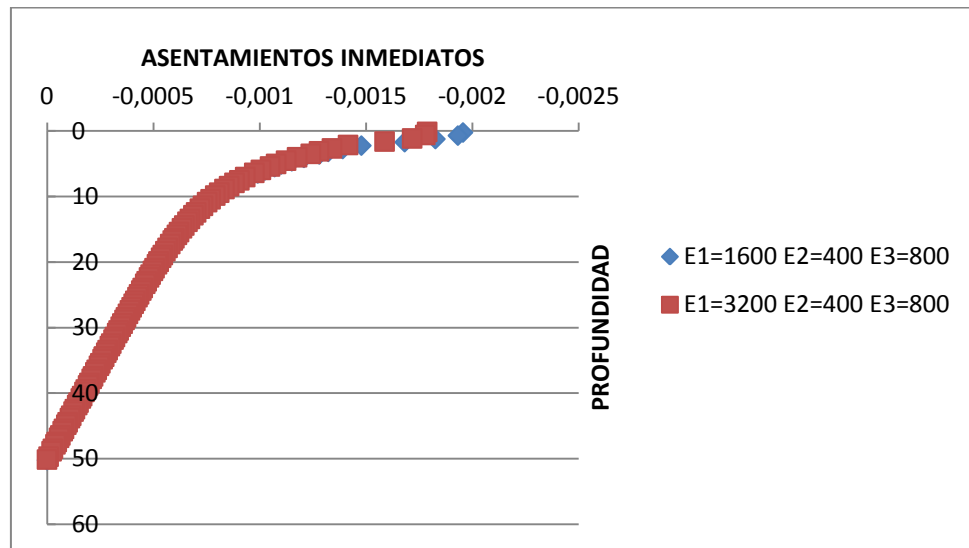
**Ilustración 47:** Análisis de asentamientos (Modelo Mecánico).



**Fuente:** Registro Propio

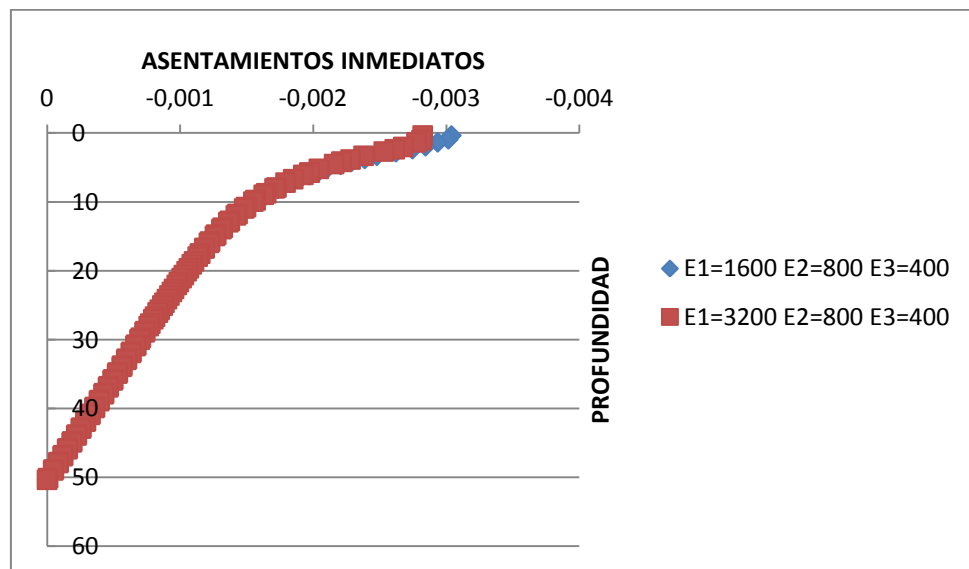
Además, se observa claramente en las ilustraciones (48 y 49) que los desplazamientos verticales inmediatos tienen el mismo comportamiento cuando el estrato superior es rígido, y el menor valor de asentamiento inmediato se presenta cuando la capa inferior es más rígida que la capa intermedia. Para corroborar este principio ver tabla 5.

**Ilustración 48:** Análisis de asentamientos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

**Ilustración 49:** Análisis de asentamientos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

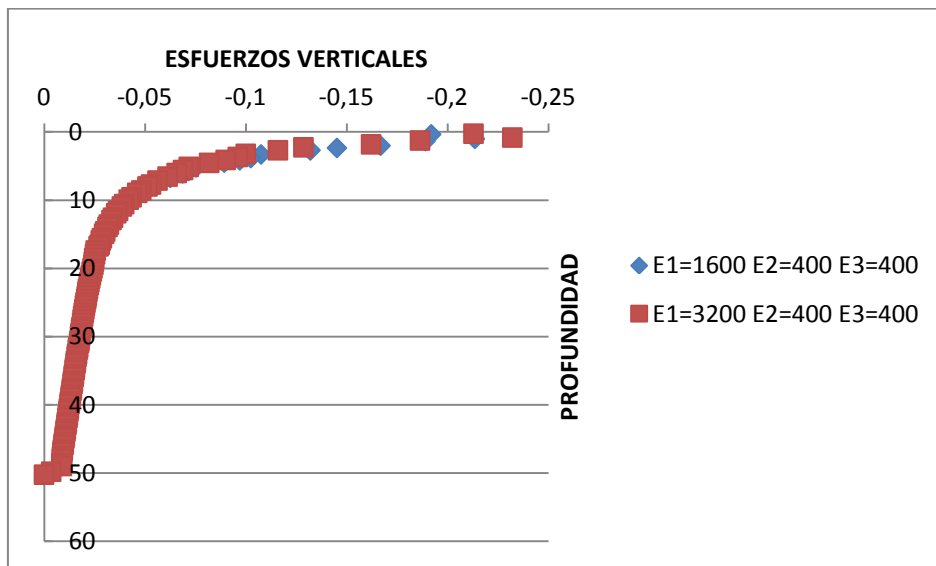
**Tabla 5: Análisis de asentamientos totales inmediatos**

Mpa	Asent. Total	Mpa	Asent. Total	Mpa	Asent. Total			
E1=1600 E2=400 E3=400	0,0033	E1=3200 E2=400 E3=400	0,0031	E1=1600 E2=400 E3=800	0,002			
E1=3200 E2=400 E3=800		0,0018		E1=1600 E2=800 E3=400		0,0031	E1=3200 E2=800 E3=400	0,0029

**Fuente:** Registro Propio

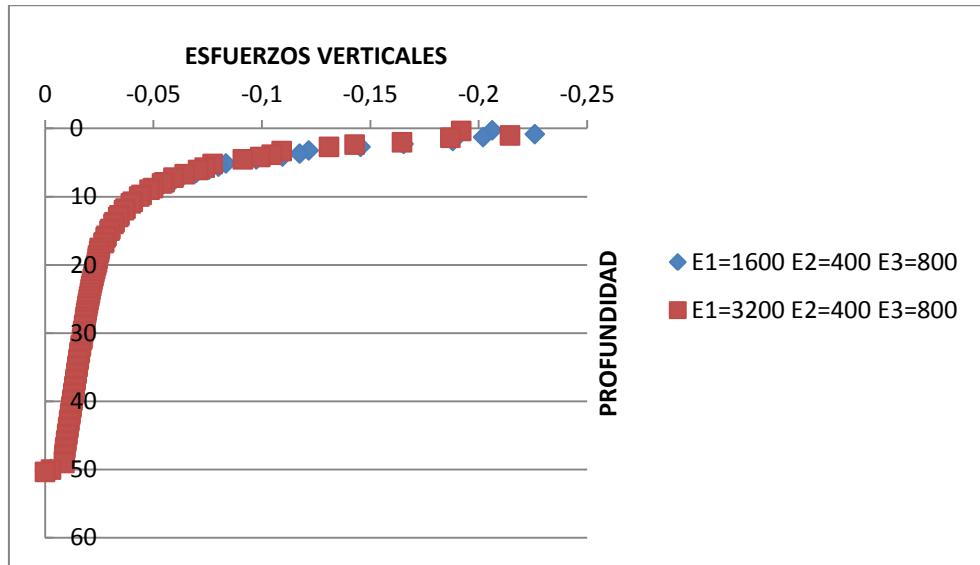
En las ilustraciones (50,51 y 52), se presenta el comportamiento de los incrementos de esfuerzos verticales, dejando el estrato superior rígido y variando los módulos de rigidez E en los estratos inferiores. Se demuestra nuevamente la independencia del módulo de rigidez E, con los incrementos de esfuerzos verticales.

**Ilustración 50:** Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).



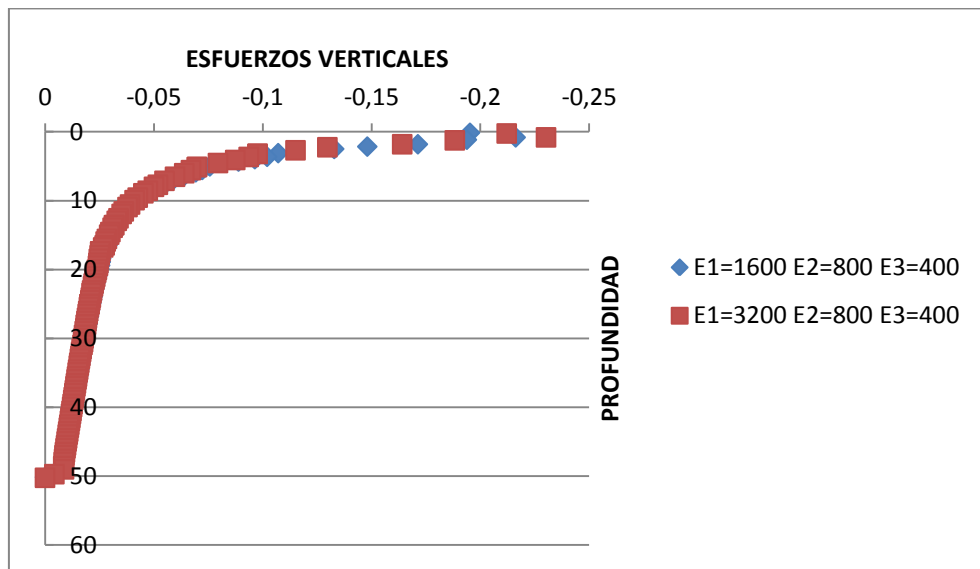
**Fuente:** Registro Propio

**Ilustración 51:** Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

**Ilustración 52:** Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).



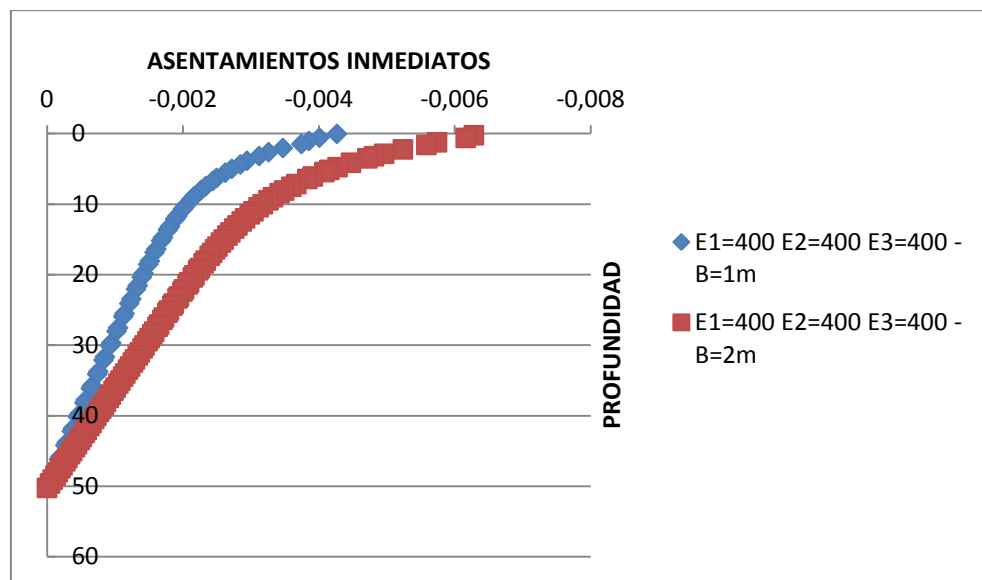
Fuente: Registro Propio

## COMPARACIÓN DE ASENTAMIENTOS INMEDIATOS E INCREMENTO DE ESFUERZOS VERTICALES PARA ZAPATAS (B=1m, B=2m)

Después de mostrar y analizar los resultados previamente con un ancho de base B=1m, se amplió este a B=2m, con el ánimo de analizar el comportamiento de los asentamientos inmediatos y los incrementos de esfuerzos verticales, producto de dicho cambio.

En la ilustración 53, se puede ver claramente que al aumentar el ancho de base, se presentan mayores asentamientos inmediatos.

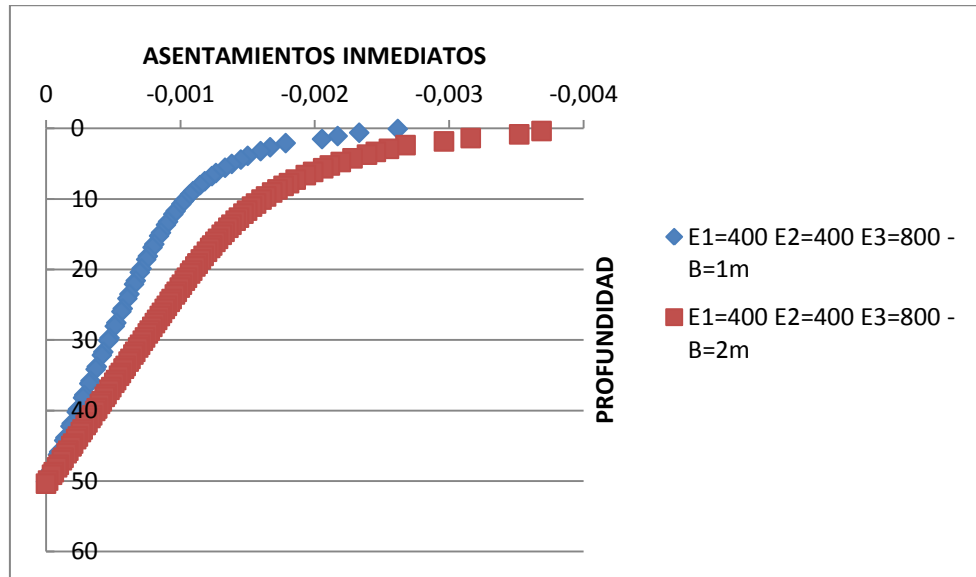
**Ilustración 53: Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico).**



**Fuente:** Registro Propio

Para verificar este efecto, se tomó al azar otro modelo y se corroboró que los resultados fueran similares. Ver ilustración 54.

**Ilustración 54:** Análisis de asentamientos inmediatos (Modelo Mecánico).

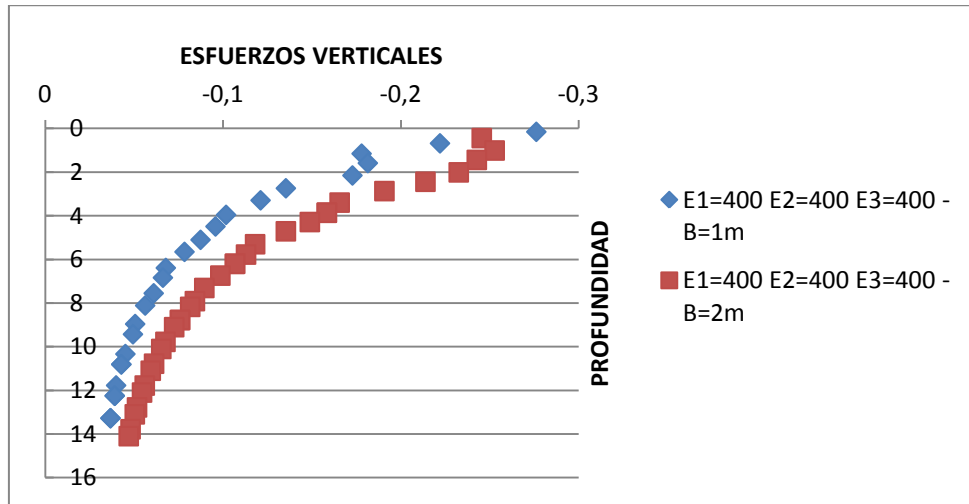


**Fuente:** Registro Propio

En la Figura 55, podemos ver que al aumentar el ancho de base ( $B=2m$ ), en un suelo estratificado, se presenta un mayor incremento de esfuerzos verticales, comparado con la cimentación ( $B=1m$ ).

Sin embargo, esto sólo se presenta hasta una profundidad determinada, en este caso particular ( $Z=15m$ ).

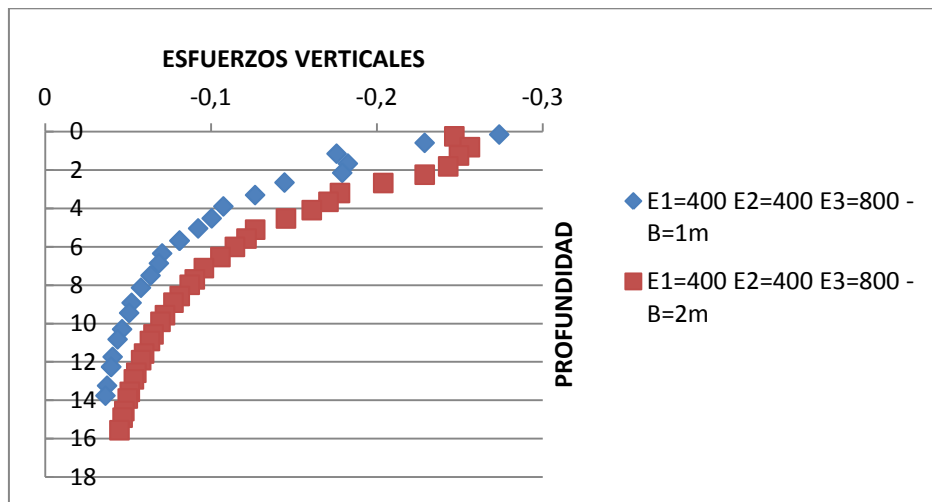
**Ilustración 55:** Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).



Fuente: Registro Propio

Demostrando nuevamente, se tomó otro modelo, con módulo de rigidez diferente E, queriendo obtener los mismos resultados anteriores y se comprobó que los incrementos de esfuerzos verticales son mayores al aumentar el ancho de base (Ilustración 56)

**Ilustración 56:** Incremento de esfuerzos (Modelo Mecánico).

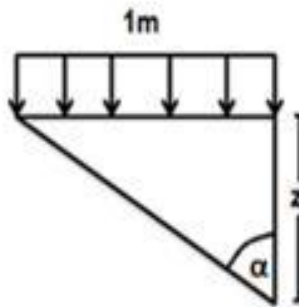


Fuente: Registro Propio

## COMPARACIÓN ENTRE LOS INCREMENTOS DE ESFUERZOS VERTICALES OBTENIDOS CON EL SOFTWARE Y LOS MÉTODOS EMPÍRICOS UTILIZADOS EN LA PRÁCTICA

Se pretende comparar la variación en el incremento de los incrementos de esfuerzos verticales calculados empíricamente con técnicas usadas en la realidad y los calculados previamente con el software. Para esto nos basaremos en los métodos empíricos, conocidos como la carga en banda (2D).

### CARGA EN BANDA (2D)



Fuente: Registro Propio

$$\Delta\sigma_z = \frac{p}{\pi} [\alpha + \sin \alpha \cos(\alpha)] \quad (24)$$

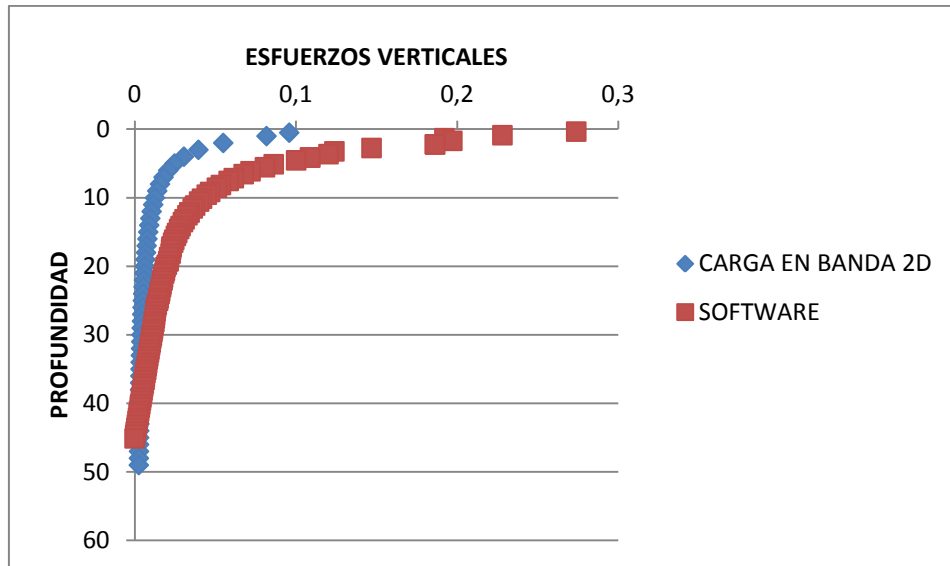
Donde:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{1}{z}\right) \quad (25)$$

Z= Profundidad a la cual se desea calcular el  $\Delta\sigma_z$

Para un suelo homogéneo, con módulo de rigidez  $E=400$  Mpa, se muestran los incrementos de esfuerzo verticales calculados con este método, sin olvidar que ( $P=0,2$  Mpa) y se comparan con los calculados por el software. Ver ilustración 57.

**Ilustración 57:** Incremento de esfuerzos carga en banda (2D)



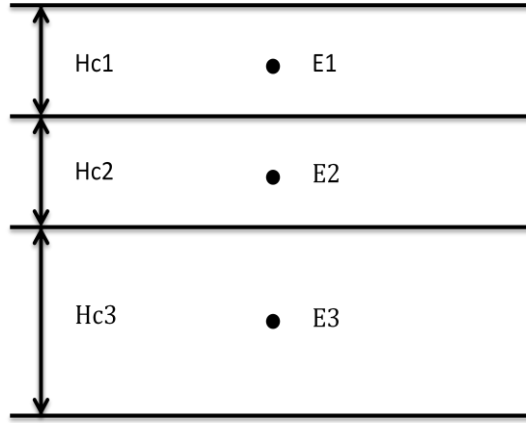
Fuente: *Registro Propio*

### COMPARACIÓN DE LOS ASENTAMIENTOS INMEDIATOS OBTENIDOS CON EL SOFTWARE Y LAS APROXIMACIONES ELÁSTICAS USADAS EN LA PRÁCTICA

Se quiere comprobar la variación en los asentamientos totales calculados con el software y los cálculos con las soluciones aproximadas. A continuación se mostrará el cálculo con las soluciones aproximadas.

Se tiene un medio estratificado, con módulos de rigidez  $E_1$ ,  $E_2$  y  $E_3$ . (Ilustración 58)

**Ilustración 58:** Asentamientos inmediatos por soluciones aproximadas



**Fuente:** Registro Propio

Se calculan los incrementos de esfuerzos verticales ( $\Delta\sigma_z$ ) en los puntos intermedios del estrato, con la carga en banda 2D vista anteriormente. Seguido se calcula la deformación de cada capa, teniendo en cuenta la rigidez de estas, con la siguiente ecuación:

$$\epsilon_z = \frac{\Delta\sigma_z}{E} \quad (26)$$

Seguido se calcula el desplazamiento vertical sufrido por cada capa, con la siguiente ecuación:

$$\delta v_c = \epsilon_z * H_c \quad (27)$$

Donde,

Hc= Altura de la capa

Finalmente se suman los desplazamientos verticales encontrados de cada y se obtiene el desplazamiento total.

$$\delta_{\text{Total}} = \sum \delta_{\text{VC}} \quad (28)$$

Aplicando esta metodología, se calculó el asentamiento inmediato total para un medio estratificado de 3 capas, con módulo de rigidez  $E=400$  MPa en cada uno de sus estratos y se comparó con el asentamiento total inmediato en la superficie del terreno, calculado con el software.

$$\delta_{\text{Total software}} = 0,004232$$

$$\delta_{\text{Total empírico}} = 0,001013$$

Se puede claramente ver que el asentamiento total empírico calculado, nos arrojó un valor menor comparado con el software, el cual es completamente lógico, ya que los incrementos de esfuerzos calculados con la carga en banda 2D nos dieron valores menores a los calculados con el software y los asentamientos inmediatos dependen directamente de los incrementos de esfuerzos verticales.

## CONCLUSIONES

- Las simulaciones numéricas permitieron tener información complementaria y más exacta, de la evolución en las distintas variables tratadas anteriormente. De esta forma, se puede seguir de manera más adecuada, la puesta en marcha de las técnicas empíricas usadas en la práctica.
- Al analizar los asentamientos inmediatos para un medio estratificado, dejando constante el estrato superior como rígido y variando el módulo de deformación  $E$  en los estratos intermedio e inferior, se observó que no hay mucha variación en el comportamiento de estos. Sin embargo, cuando se analiza el asentamiento total medido en la superficie del terreno, se puede ver que estos valores difieren, en función de los módulos de rigidez del suelo.
- Para un medio de tres estratos, con capa superior rígida, se demostró que hay menor asentamiento total inmediato, cuando la rigidez de la capa inferior es mayor a la rigidez de la capa intermedia.
- Se concluye que los incrementos de esfuerzos verticales en suelos homogéneos y estratificados, son independientes al módulo de deformación  $E$ .
- Después de variar la rigidez  $E$  en los suelos homogéneos y estratificados, se observó que los asentamientos inmediatos, se comportaron inversamente proporcionales al módulo de deformación  $E$ , es decir, a mayor rigidez menor desplazamiento vertical.
- Cuando se aumentó al doble el ancho de base de la cimentación superficial y se dejó constante el esfuerzo vertical aplicado, se presentaron mayores valores de asentamientos inmediatos. Del mismo modo, los incrementos de esfuerzos verticales fueron mayores, sin embargo, esto se presentó hasta una determinada profundidad, en este caso particular, hasta los 15m.

- Al comparar los incrementos de esfuerzo calculados en el software, con los métodos empíricos usados en la práctica (Carga en banda 2D). Se pudo ver que la distribución de incrementos de esfuerzos, ofrece valores mayores a los calculados por aproximaciones elásticas.
- Al calcular los asentamientos totales inmediatos con las soluciones aproximadas, se obtuvieron valores menores a los obtenidos por el software; Sin olvidar que el cálculo de estos, depende directamente de los incrementos de esfuerzos calculados por métodos empíricos (Carga en banda 2D) anteriormente. Por esta razón, los desplazamientos totales verticales presentaron valores inferiores.

## BIBLIOGRAFÍA

- <http://gid.cimne.upc.es/download>
- <http://elementosfinitosunalmzl.wikispaces.com/GiD>
- OLIVELLA, S., A. Gens, J. Carrera, E. E. Alonso, (1996), La formulación numérica para un Simulador (CODE\_BRIGHT) Para el Análisis Acoplado de Salinos Medios de Comunicación, Diseñando Computaciones, Vol. 13, No 7, pp. 87-112.
- <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10762/Capitulo2.pdf>
- UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA. Departamento de ingeniería del terreno, cartográfica y geofísica MANUAL CODE\_BRIGHT. Disponible en internet: [http://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code\\_bright/v3/Cb\\_v3manual\\_v3.zip/view](http://www.etcg.upc.edu/recerca/webs/code_bright/v3/Cb_v3manual_v3.zip/view)
- <http://es.scribd.com/doc/64998551/Fundamentos-de-Ingenieria-Geotecnica-Braja-M-Das>
- <http://es.scribd.com/doc/77756688/69/Analisis-del-incremento-de-esfuerzos>
- <http://www.filecrop.com/mecanica-de-suelos-juarez-badillo-tomo-1.html>
- <http://www.filecrop.com/mecanica-de-suelos-juarez-badillo-tomo-2.html>