

**ANÁLISIS COMPARATIVOS ENTRE TEORÍAS USADAS EN EL CÁLCULO DE
ASENTAMIENTOS Y UN SOFTWARE BASADO EN ELEMENTOS FINITOS**

**LIZZET CAROLINA ANTOLINEZ REYES
JEFFERSON AVILA PEREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARMANGA**

2013

**ANÁLISIS COMPARATIVOS ENTRE TEORÍAS USADAS EN EL CÁLCULO DE
ASENTAMIENTOS Y UN SOFTWARE BASADO EN ELEMENTOS FINITOS**

**LIZZET CAROLINA ANTOLINEZ REYES
JEFFERSON AVILA PEREZ**

**Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director:
WILFREDO DEL TORO RODRIGUEZ
ING. CIVIL M. Sc.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECAICAS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
BUCARMANGA**

2013

Dedicatoria

A Dios quien protege mi camino y me ayuda a superar los obstáculos para lograrlo todo.

A mis padres, Gonzalo Antolínez y Carmen Ligia Reyes, que me brindaron su apoyo y su amor incondicional y quienes son el mayor motivo para lograr las metas de mi vida.

A mis Hermanas y mi sobrina quienes llenan de alegría y fortaleza mi vida.

A mi novio, Faiver Meléndez quien me motiva a seguir siempre adelante.

Lizbet Carolina Antolínez

*A mis padres porque siempre han sido un ejemplo de integridad y perseverancia,
pero especialmente por su apoyo incondicional en cada paso de mi vida.*

Jefferson Ávila Pérez

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. ASENTAMIENTOS	16
2. METODOLOGÍA	19
3. SIGMA/W	24
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	27
5. MODELACIÓN EN SIGMA/W	29
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
7. OBSERVACIONES	39
8. CONCLUSIONES	40
BILIOGRAFÍA	42

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Asentamiento diferenciales máximos	18
Figura 2. Variación del Factor de influencia en función de la profundidad.	22
Figura 3. Condiciones de contorno para el estrato de suelo.	30
Figura 4. Malla del modelo	31
Figura 5. Cálculo de asentamientos con Σ/W .	32
Figura 6. Número de golpes contra los asentamientos de las arenas.	33
Figura 7. Carga contra los asentamientos de las arenas.	34
Figura 8. Módulo de elasticidad contra los asentamientos de las arcillas.	35
Figura 9. Carga contra los asentamientos de las arcillas.	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla1. Factores para cada método según el autor	23
Tabla 2. Parámetros elásticos para varios suelos.	29
Tabla 3. Asentamientos en arenas para cada valor de número de golpes.	33
Tabla 4. Asentamientos en arenas para cada valor de carga.	34
Tabla 5. Asentamientos en arcillas para cada valor de módulo de elasticidad.	35
Tabla 6. Asentamientos en arcillas para cada valor de carga.	36
Tabla 7. Variación porcentual cuando se varía el número de golpes en arenas.	37
Tabla 8. Variación porcentual cuando se varía la carga en arenas.	37
Tabla 9. Variación porcentual cuando se varía el módulo de elasticidad en arcillas.	38
Tabla 10. Variación porcentual cuando se varía la carga en arcillas.	38

RESUMEN

Título: ANÁLISIS COMPARATIVO DE ASENTAMIENTOS ELÁSTICOS MEDIANTE EL USO DE UN SOFTWARE Y LA BASE TEÓRICA*

Autores: Lizzet Carolina Antolinez Reyes**
Jefferson Ávila Pérez,

Palabras claves: Asentamientos elásticos, parámetros del suelo, tipos de suelo, software Sigma w, tensodeformación.

Esta tesis de grado expone un análisis comparativo entre dos alternativas de cálculo de asentamientos, una alternativa consiste en determinar los asentamientos mediante las ecuaciones teóricas y la otra usando un software basado en elementos finitos; las ecuaciones que se usaron para el cálculo de asentamientos en arenas fueron: Terzaghi, Meyerhof, Schmertmann y Peck-Hanson, mientras que para el cálculo de asentamientos en arcillas se utilizó la teoría elástica; para el presente se determinaron solo los asentamientos elásticos que son las respuestas a las tensiones producidas por cargas presentes en una obra ingenieril, el análisis comparativo se realizó tanto para suelos arenosos como para suelos arcillosos, debido a que los métodos teóricos varían considerablemente según se trabajó con uno u otro tipo de suelo. Para la obtención de los resultados se propusieron dos escenarios en los que se variaba un parámetro mientras los demás permanecían constantes, el primer escenario que se efectuó fue variar la carga aplicada dejando los demás parámetros invariables y en el segundo escenario se varió el número de golpes en las arenas y el módulo de elasticidad en las arcillas. Una vez se realizaron los modelos en el software y los cálculos con las ecuaciones teóricas se realizaron cuadros comparativos y sus respectivas gráficas para observar claramente las diferencias y similitudes entre los métodos.

La comparación del software con las teorías se vio limitada debido a que el programa no tiene en cuenta algunos parámetros que las teorías si contemplan (ejemplo de ello es la profundidad de cimentación), se considera conveniente estudiar más a fondo el software con el fin de analizar mejor los efectos de las condiciones de frontera del programa.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas Escuela de Ingeniería Civil. Director: Wilfredo Del Toro Rodríguez, Ing. Civil M. Sc.

ABSTRACT

Title: COMPARATIVE ANALYSIS USING ELASTIC SETTLEMENT OF A SOFTWARE AND THEORETICAL BASE*

Authors: Lizzet Antolinez Carolina Reyes**
Jefferson Pérez Avila

Keywords: elastic settlements, soil parameters, soil types, software Sigma w, tensodeformación.

This thesis presents a comparative analysis of two calculation alternatives of settlements, one of these is to determine the settlements by the theoretical equations and the other using a software based in the finite element method, the equations used to calculate settlements in sands were Terzaghi, Meyerhof, Schmertmann and Peck- Hanson, while for settlement calculations in clays was used elastic theory. For this project were determined only elastic settlements which are the consequences to the stresses produced by loads present in a civil work, a comparative analysis was performed for both sandy soils to clay soils, because the theoretical methods vary considerably as work with one or the other type of soils. To obtain the results identified two scenarios in which one parameter is varied while the others remain constant, the first stage was conducted to vary the load applied leaving the other parameters unchanged, and the second stage was varied the number of strokes in the sands and the modulus of elasticity in clays. Once the models were made in the software and calculations with the theoretical equations were performed comparative tables and their graphs to clearly see the differences and similarities between the methods.

The comparison with the theories of the software was limited because the program does not take into account some parameters if they consider theories (example is the foundation depth), it is appropriate to further study the software in order to better analyze the effects of the boundary conditions of the program.

* Degree work.

** School of Physics and Mechanical Engineering School of Civil Engineering. Directed by Del Toro Wilfredo Rodriguez, Civil Engineer M. Sc

INTRODUCCIÓN

Años anteriores se desconocía que una de las causas más imperativas en el daño estructural de una obra civil era el comportamiento en el movimiento y deformación que sufre el suelo como respuesta a la aplicación de cargas. Por ello en el presente, se considera esencial determinar con razonable aproximación las condiciones y características geotécnicas en cualquier análisis y diseño de toda obra ingenieril.

Aun así cabe destacar el alto grado de complejidad que conlleva la cuantificación de los parámetros del suelo, debido a que en ocasiones estas características son variables con el tiempo a causa de las condiciones que rodean el subsuelo a investigar y además los equipos utilizados en estos estudios no permiten una total certeza de los resultados a obtener. Otorgando de esta forma un alto grado de complejidad a este estudio y una rigurosa percepción en las condiciones no previstas por el ingeniero.

De aquí que se trata de estimar con mayor exactitud los asentamientos surgidos en los suelos de fundación mediante teorías planteadas por propulsores como una base conservadora o mediante herramientas sofisticadas como son el software basado en el método de elementos finitos y que están al alcance del conocimiento. Estos últimos medios son soluciones innovadores en el área de estudio, los cuales permiten una rápida, efectiva y hace que las incertidumbres respecto al comportamiento del suelo se simplifiquen destacadamente. Sin embargo como lo cita el ingeniero Manuel Delgado Vargas en su libro “fundamentos e introducción al análisis geotécnico” el éxito de la solución en los problemas de fundación no depende de la sofisticación de las herramientas analíticas a utilizar sino de determinar los procesos generadores de los asentamientos posiblemente presentados. Es de esta forma como se establece la importancia de prevalecer los

métodos teóricos en los campos de aprendizaje y por ende de realizar un análisis comparativo de estas metodologías que se expondrán en el presente artículo para una adecuada selección de ellas como soluciones idóneas en los problemas geotécnicos.

1. ASENTAMIENTOS

El asentamiento es una deformación vertical del suelo que ocurre debido a cargas aplicadas externamente o en consecuencia al propio peso del suelo; los asentamientos pueden clasificarse en asentamientos inmediatos, por consolidación o por compresión secundaria.

Asentamiento inmediato: es un asentamiento ocasionado de forma casi instantánea al aplicarse cargas externas, éste asentamiento se debe al cambio en la forma y no al cambio de volumen. Los asentamientos inmediatos dependen de las propiedades elásticas de los suelos a deformaciones pequeñas y de la rigidez y extensión del cimientto. La relación esfuerzo-deformación en los suelos cohesivos saturados tiene un carácter aproximadamente elástico lineal, en los suelos granulares esta relación obedece a un comportamiento más complejo, posiblemente elasto-plástico o plástico .Estos asentamientos se calculan de las ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad.

Asentamiento por consolidación: es un asentamiento que ocurre en suelos cohesivos saturados, es decir en arcillas saturadas; es un cambio en el volumen del suelo que ocurre cuando el agua es expulsada lentamente dejando vacíos en los poros que ocupaba. Es una deformación dependiente del tiempo.

Asentamiento por compresión secundaria: es la consecuencia del ajuste plástico de la estructura del suelo y es sucedido de la consolidación primaria, es decir, después que los excesos de presión en el agua se han disipado y que toda la carga ha sido entregada a la estructura de suelo. Es un asentamiento que sucede en el tiempo a esfuerzo constante, es consecuencia del reajuste de la estructura del suelo. Se presume que materiales con alto contenido orgánico presenten este comportamiento Cabe mencionar que además existen otros tipos

de asentamientos debidos a causas en los procesos constructivos, es tal el caso de los asentamientos generados por las excavaciones en las cercanías, por vibraciones, por aumentarse la carga en las zonas aledañas, etc. Además de éstos existen los colapsos o grandes desplazamientos del suelo de soporte cuando se sobrecarga una fundación o a los derrumbes debidos a erosión y desplazamientos geológicos, estos dos últimos asentamientos son prácticamente indescifrables, por lo cual no se tratan de cuantificar sino que se trata de utilizar medidas preventivas o evitar áreas donde pueda presentarse.

Asentamientos tolerables de las fundaciones de estructuras: Es de vital importancia establecer cuál es el asentamiento tolerable de la estructura, para poder confrontarlo con el asentamiento calculado, pues se debe garantizar que los asentamientos no afectaran el comportamiento estructural de la edificación.

Para establecer los límites de asentamientos totales se aconseja dirigirse al capítulo H.4.9 de la NSR-10

H.4.9 efectos de los asentamientos

H.4.9.2 límites de asentamientos totales

Los asentamientos totales calculados a 20 años se deben limitar a los siguientes valores:

Para construcciones aisladas 30 cm, siempre y cuando no se afecten la funcionalidad de conducciones de servicios y accesos a la construcción.

Para construcciones entre medianeros 15 cm, siempre y cuando no se afecten las construcciones e instalaciones vecinas.

H.4.9.3 límites de asentamientos diferenciales

Los asentamientos diferenciales calculados se deben limitar a los valores fijados en la tabla H.4.9-1, figura 1, expresados en función de L, distancia entre apoyos o columnas de acuerdo con el tipo de construcción.

Figura 1. Asentamiento diferenciales máximos

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

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

Fuente: Norma sismo resistente colombiana NSR10

2. METODOLOGÍA

El análisis comparativo se hizo a partir de un estudio paramétrico, en el cual se establecieron valores fijos en torno al problema, en tanto que uno de ellos no lo era. Los parámetros solicitados en la problemática propuesta están definidos de acuerdo a las teorías numéricas utilizadas y a los requeridos por el software, estos son: módulo de elasticidad del suelo, correlativo con el número de golpes obtenidos en el ensayo normal de penetración estándar (SPT), módulo de poisson, esfuerzo producido por la carga impuesta, base del cimiento y profundidad de la fundación bajo el nivel del terreno.

Como análisis inicial, se calcularán los respectivos asentamientos con unas condiciones iniciales del problema, para los tipos de suelo presentados por medio de las metodologías, numéricas y computacional. Se continuó con la variación de la presión de fundación, manteniendo los otros parámetros constantes y así proceder a los respectivos análisis deformacionales.

En el segundo escenario que se planteó, se varió el módulo de elasticidad, mientras los demás parámetros permanecían constantes, esto se realizó con el objeto de observar directamente la variación de resultados de los diferentes métodos y una de las propiedades más relevantes del material.

Metodología para el cálculo de asentamientos en arcillas

Para el cálculo de asentamientos en arcillas se usó la teoría elástica.

$$S = \frac{q_c (B)(1 - \nu^2)}{E} C' d$$

Dónde:

q_c : Carga aplicada por unidad de área

B: ancho del cimiento

ν : Coeficiente de poisson

E: módulo de elasticidad

$C'd$: Coeficiente o factor de forma que depende de la geometría del problema, rigidez del plano cargado, forma de la carga y espesor del suelo medido desde la cara del cimiento hasta un manto de roca.

Si bien es cierto que los suelos no son homogéneos, no se comportan en un medio lineal elástico y el módulo de elasticidad no es constante, para aplicar la teoría elástica se hace necesario implementar las siguientes hipótesis:

- a.)El suelo es un medio continuo
- b.)El suelo es un material homogéneo
- c.)El suelo es un material isótropo
- d.)La compresibilidad medida en el suelo es la misma en cualquier dirección
- e.)La relación esfuerzo deformación del suelo es lineal.

Claramente el suelo no sigue este comportamiento, lo que se traduce en posibles errores en los cálculos, aun así esta teoría es ampliamente aceptada y utilizada.

Metodologías para el cálculo de asentamientos en arenas:

De igual forma que para las arcillas, para las arenas se determinaron unas condiciones iniciales de carga y propiedades del material, para luego comenzar a variar un parámetro mientras los demás parámetros permanecían iguales.

Para el estudio aquí presentado se utilizaron los siguientes parámetros, una zapata de tamaño 1 m x 1 m, por lo cual la máxima profundidad teórica hasta la cual existirían asentamientos es: $2B = 2m$, es así que para el modelo realizado en

Sigma/W se trabajó con esta profundidad; al trabajarse asentamientos inmediatos se determinó que el tiempo en años al que se refiere el factor $C_2 = 0.1$, para dar a conocer que dicho factor no afecta el resultado.

- Uno de los métodos más usados en el cálculo de asentamientos en suelos granulares es el método de Schmertmann y Hartman (1978), el cual es un método semiempírico.

La ecuación propuesta por Schmertmann y Hartman es:

$$S = C_1 C_2 (q - q_0) \int_0^{z_2} \frac{I_z}{E_s} (\Delta Z)$$

Dónde:

I_z = Factor de Influencia por deformación, de la distribución.

C_1 = Factor de corrección para la profundidad del Empotramiento de la cimentación.

$$C_1 = 1 - 0,5 \frac{q}{q - q_0}$$

C_2 = Factor de corrección para tomar en cuenta el flujo plástico en el suelo.

$$C_2 = 1 + 0,2 \log(t/0.1)$$

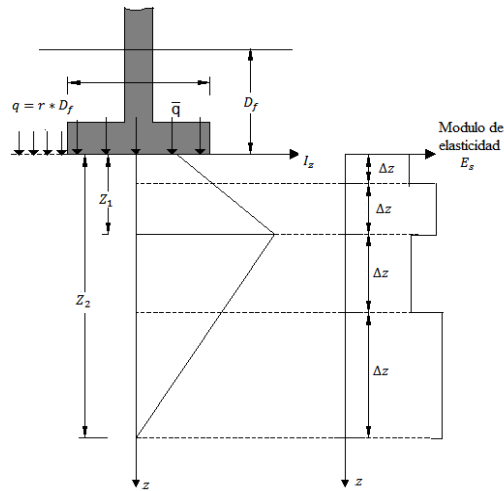
q = Esfuerzo al nivel de la cimentación

$$q = \gamma D_f$$

E = módulo de deformación del suelo en la mitad de la capa

El factor de influencia de la deformación unitaria I_z está directamente ligado con la profundidad, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Variación del Factor de influencia en función de la profundidad.



Dado el gráfico anterior se obtiene que:

$$I_z = 0,1 \quad \text{en } z = 0$$

$$I_z = 0,5 \quad \text{en } z = z_1 = 0,5B$$

$$I_z = 0 \quad \text{en } z = z_2 = 2B$$

Para cimentaciones con $L/B \geq 10$:

$$I_z = 0,2 \quad \text{en } z = 0$$

$$I_z = 0,5 \quad \text{en } z = z_1 = B$$

$$I_z = 0 \quad \text{en } z = z_2 = 4B$$

Dónde: B =ancho de la cimentación
 L =longitud de la cimentación

- Métodos empíricos basados en el ensayo normal de penetración (SPT)

$$S=qC_1K_BK_DK_W$$

Tabla1. Factores para cada método según el autor

Autor	$C_1 = \frac{1}{k_1} \frac{\text{cm}^3}{\text{Kg}}$	K_B	K_D	K_W
Terzaghi-Peck (1948-1968)	$\frac{7,62}{N}$	$\frac{2B}{B+0,3}$	$1,0-0,25 \frac{D}{B}$	1.0 si $D_w \geq 2B$ 2.0 si $D_w \leq B$ $2,0 - \frac{D_w - B}{B}$ Cuando $B \leq D_w \leq 2B$
Meyerhof(1965)	$\frac{5,08}{N}$	$\frac{2B}{B+0,3}$	$1,0-0,25 \frac{D}{B}$	1,0
Peck-Hanson y Thornburn (1974)	$\frac{23,2}{N}$	1.0	1.0	$\frac{2}{1+\frac{1}{D+8}}$

Fuente: Delgado Vargas Manuel. Ingeniería de Fundaciones.

3. SIGMA/W

Sigma /W pertenece a uno de los programas del paquete de Geoestudio de la empresa Geoslope, el cual permite la visualización gráfica y tabulada de la deformación del suelo producida por tensiones originadas por cargas impuestas.

Éste es un producto de software CAD basado en el método de elementos finitos que ofrece soluciones de difícil análisis numérico. El método de elementos finitos (MEF) es una herramienta que ha revolucionado la manera de resolver problemas ingenieriles, debido a que permite resolver casos de gran complejidad matemática. Casos que aunque se aplicaran ciertas hipótesis solo se lograría resultados para ciertos problemas de geometría, condiciones de contorno o sistemas de cargas muy particulares. Adicionalmente existen otros casos donde se deben crear prototipos, ensayarlos y adicionar las mejoras que se consideraran pertinentes, para luego volver a ensayarlos; esto resultaba en un alto costo económico y una gran inversión de tiempo, por tal motivo frecuentemente se debe recurrir a métodos numéricos puesto que permiten elaborar análisis y diseños con un alto grado de exactitud.

El Programa permite realizar análisis en la relación de esfuerzo-deformación. También es posible calcular las presiones de poros, la disipación en una estructura de suelo en respuesta a las cargas externas, así como es posible realizar un análisis de consolidación y permite la simulación por fases de la construcción y por ende de la respuesta de la estructura de suelo en determinado instante.

Características del programa

Modelos del terreno:

El software permite modelar diferentes comportamientos que sufre el terreno ante un estado de tensión por cargas; tales comportamientos son dependientes de la naturaleza propia del material y propiedades del suelo. Los siguientes son los modelos:

- Modelo lineal elástico
- Modelo elástico anisótropo
- Modelo elástico no lineal (Hiperbólico).
- Modelo elastoplástico
- Modelo de endurecimiento progresivo.
- Modelo Cam-Clay.
- Modelo Cam-Clay Modificado.

Condiciones de contorno:

Las condiciones de contorno definen las circunstancias que rodean el problema, ya sea las condiciones de frontera de la estructura de suelo, las cuales determinan el desplazamiento en el dominio del terreno o las condiciones de carga impuestas al problema.

Entre las condiciones de contorno a determinar en Sigma /W se encuentran condiciones hidráulicas, de esfuerzo y de rotación.

Obtención de resultados

Una vez que haya resuelto su análisis, SIGMA/ W ofrece muchas herramientas para la visualización de los resultados. Entre ellos se puede observar la deformación del terreno o representación de esfuerzos por medio de una malla deformada, la cual se le asignan los parámetros en el proceso de modelación del

problema dado, lo anterior también se logra evaluar con vectores de desplazamiento. Así mismo se contemplan todas las tensiones en cualquier nodo o representados en un círculo de Mohr y con diagramas de desplazamientos vs tensiones asociadas. Se pueden analizar las líneas de falla del Terreno y distribución de los esfuerzos a lo largo de los elementos estructurales implicados. Además se consigue la preparación de los resultados en un informe a través de la adición de etiquetas, texto y fotos, o se exportan los resultados a otras aplicaciones como Microsoft® Excel® para su posterior análisis.

Aplicaciones típicas

SIGMA / W puede modelar casi cualquier problema de esfuerzo - deformación, incluyendo:

- Asentamiento de las zapatas, tanques o estructuras de tierra.
- Deformación dentro o debajo de un dique de contención o de la tierra.
- El movimiento lateral de las excavaciones arriostradas o ancladas y la solución de la superficie alrededor de la excavación.
- Excavaciones inclinadas
- Los cambios de volumen que resultan de los cambios de presión de poro de agua.
- Por fases de colocación de relleno, remoción de tierra.
- Deformaciones permanentes resultantes de la pérdida de fuerza.
- Y muchas más aplicaciones que pueden verse en la página de geoslope, <http://www.geo-slope.com/products/sigmaw.aspx>.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El estudio elaborado permitió determinar las teorías más conservadoras en el cálculo de asentamientos, además de permitir conocer el rango de aproximación entre dichas teorías y el software utilizado.

Para el análisis que se efectuado se utilizó los siguientes datos:

Dimensiones de la zapata= 1 m x 1 m

Altura del estrato de suelo = 4 m

Presión de fundación =100 KN, cual se variaría hasta 1000 KN en intervalos de 100 KN.

Para la realización del modelo comparativo se utilizaron suelos arenosos y arcillosos para los cuales se plantearon varios escenarios, con el fin de observar su comportamiento en diferentes aspectos. Los datos iniciales para las arcillas y las arenas fueron los siguientes:

- **Arcillas:**

Módulo de Poisson=0,333

$E = 5000 \text{ KN/m}_2$

Carga = 100 KPa

- **Arenas:**

Módulo de Poisson = 0,3

Número de golpes = 10

Carga = 100 KPa

Básicamente la metodología usada fue: variar un parámetro, mientras los demás parámetros permanecían constantes. El primer escenario que se planteó fue la variación de la carga aplicada mientras todos los demás parámetros permanecían constantes, dicha carga fue variando en intervalos de 100 KPa, empezando en 100 KPa hasta llegar a un valor de 1000 KPa, esto se hizo tanto para las arenas como para las arcillas.

En el caso de las arcillas el módulo de elasticidad se varió desde el valor inicial de 10000 KPa, cada 1000 KPa, hasta alcanzar el valor de 20000 KPa; para las arenas el módulo de elasticidad no se podía variar directamente, debido a que las teorías empleadas usan como parámetro el número de golpes, por tal motivo se varió el número de golpes para las teorías y se determinó el módulo de elasticidad correspondiente, para finalmente usarlo en el software.

5. MODELACIÓN EN SIGMA/W

El primer paso consistió en escoger el tipo de análisis que se deseaba realizar, determinándose el método lineal-elástico; se escogió este método de análisis ya que para determinar asentamientos inmediatos en arcillas se utiliza la teoría de elasticidad lineal, pudiéndose caracterizar las propiedades de éste tipo de suelo con el módulo de elasticidad (E) y el módulo de Poisson (ν).

En el caso de las arenas para determinar los asentamientos se usaron métodos semiempíricos, que utilizan como parámetros el módulo de elasticidad (E) y el módulo de Poisson (ν); por ello para modelar en el software se utilizó el método elástico-lineal que también usa estos parámetros.

Luego de esto es necesario definir características visuales como la escala, el tamaño de papel, los ejes, la grilla, etc.

El siguiente paso es la asignación del material, el software trabaja con el módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν), por tanto se deben suministrar dichos valores según:

Tabla 2. Parámetros elásticos para varios suelos.

<i>Tipo de suelo</i>	<i>Módulo de elasticidad</i>		<i>Relación de Poisson</i>
	Lb/pulg ²	MN/m ²	
Arena suelta	1500-3500	10,35 - 24,15	0,2 - 0,4
Arena densa media	2500-4000	17,25 - 27,6	0,25 - 0,4
Arena densa	5000-8000	34,5 - 55,2	0,3 - 0,45
Arena limosa	1500-2500	10,35 - 17,25	0,2 - 0,4
Arena y grava	10000-25000	69 - 172,5	0,15 - 0,35
Arcilla suave	600-3000	4,1 - 20,7	

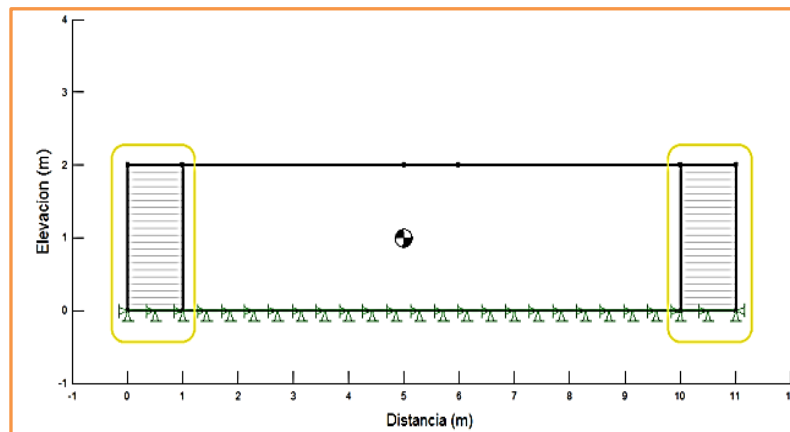
Tipo de suelo	Módulo de elasticidad		Relación de Poisson
	Lb/pulg ²	MN/m ²	
Arcilla media	3000-6000	20,7 - 41,4	0,2 - 0,5
Arcilla firme	6000-14000	41,4 - 96,6	

Fuente: Braja M. Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones.

El software además da la opción para detallar el peso específico del material, no obstante, para el presente estudio el peso específico se fijó igual a cero, debido a que solo se requirió determinar el asentamiento inmediato, dicho asentamiento es un cambio en la forma del suelo producido únicamente por la aplicación de cargas externas y no por el peso del suelo [1].

Una vez se determinaron las propiedades de los materiales, se procedió a definir las condiciones de contorno, dichas condiciones son de vital importancia pues definen las fronteras del modelo, es decir, estas condiciones permiten o no, el desplazamiento en una u otra dirección (x o y). Para el modelo fue necesario evaluar un estrato que se extiende hacia el infinito, por ello se crearon dos regiones a cada lado, que simulan esta condición.

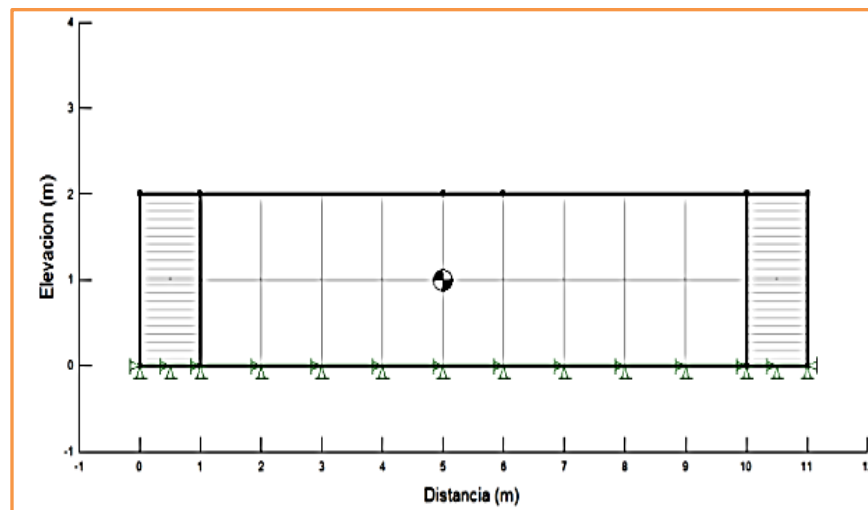
Figura 3. Condiciones de contorno para el estrato de suelo.



Tras haber asignado los materiales a las regiones correspondientes se procede a generar la malla del modelo. La malla debe generarse teniendo en cuenta la geometría del modelo, básicamente debe realizarse de acuerdo a la experiencia y creatividad del usuario.

Para tener una idea del tamaño de los elementos en la malla, se debe tener en cuenta, que cuando el modelo se imprime en un factor de 100% y las escalas horizontal y vertical son la misma, todos los elementos del mallado deben poder visualizarse, dicho de otra forma, no debe caerse en el error de pensar que con una malla de elementos muy pequeños se obtendrá mayor exactitud, esto no solo puede generar inconvenientes en el tiempo de solución, sino que puede llevar a malinterpretaciones en los resultados.

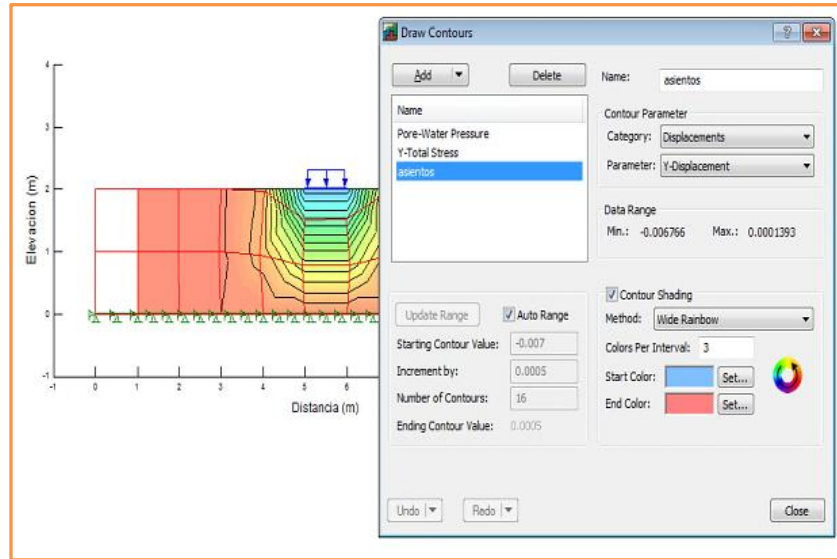
Figura 4. Malla del modelo



Posteriormente, se aplicó la carga al suelo; en el software se indica que la carga está en unidades de esfuerzo (KPa), esto se debe a que la carga está distribuida linealmente (para que pueda simular la zapata) y tendrá una profundidad por defecto igual a 1 m.

Finalmente se llega al último paso que consiste en correr el programa para chequear los resultados.

Figura 5. Cálculo de asentamientos con Sigma/W.



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez se modelaron todos los escenarios se procedió a comparar los resultados mediante tablas y gráficas.

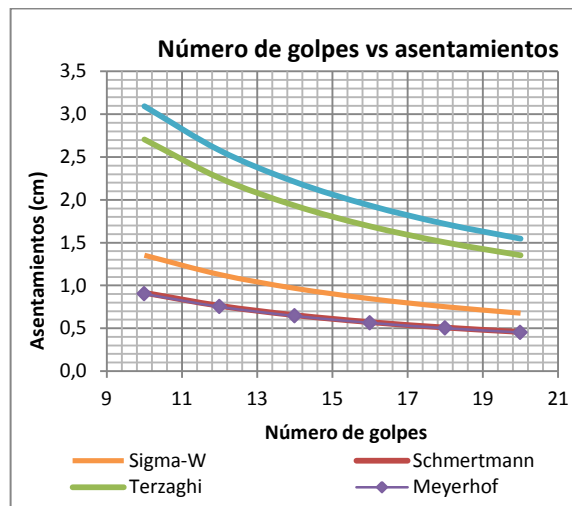
Resultados para arenas

- Para el escenario en el cual se varía el número de golpes los resultados son:

Tabla 3. Asentamientos en arenas para cada valor de número de golpes.

N (golpes)	Asentamientos (cm)				
	Sigma/W	Schmertmann	Terzaghi	Meyerhof	Peck, Hanson
10	1.353	0.915	2.705	0.902	3.093
12	1.128	0.763	2.254	0.751	2.578
14	0.967	0.654	1.932	0.644	2.210
16	0.846	0.572	1.691	0.564	1.933
18	0.752	0.508	1.503	0.501	1.719
20	0.677	0.458	1.353	0.451	1.547

Figura 6. Número de golpes contra los asentamientos de las arenas.

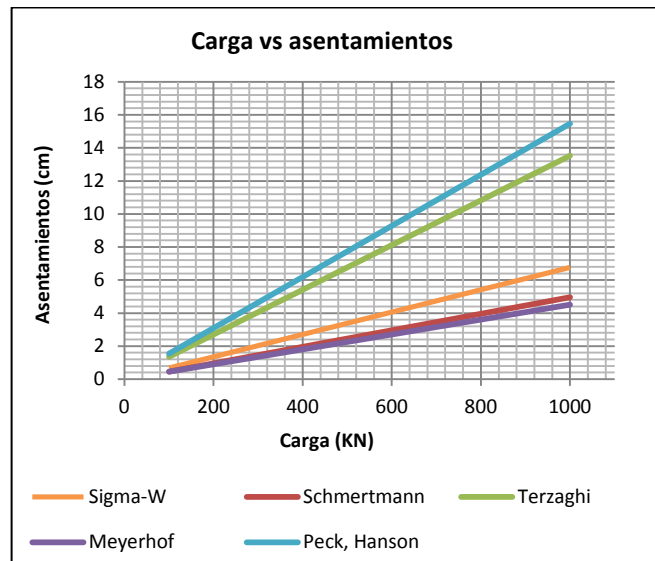


- Para el escenario en el cual se varía la carga, los resultados son:

Tabla 4. Asentamientos en arenas para cada valor de carga.

q (KN/m ²)	Asentamientos (cm)				
	Sigma /W	Schmert- mann	Terza- ghi	Meyer- hof	Peck, Hanson
100	0.677	0.458	1.353	0.451	1.547
200	1.353	0.958	2.705	0.902	3.093
300	2.030	1.458	4.058	1.353	4.640
400	2.706	1.958	5.411	1.804	6.187
500	3.383	2.458	6.763	2.254	7.733
600	4.060	2.958	8.116	2.705	9.280
700	4.736	3.4575	9.469	3.156	10.827
800	5.413	3.9575	10.821	3.607	12.373
900	6.089	4.4575	12.174	4.058	13.920
1000	6.766	4.9575	13.527	4.509	15.467

Figura 7. Carga contra los asentamientos de las arenas.



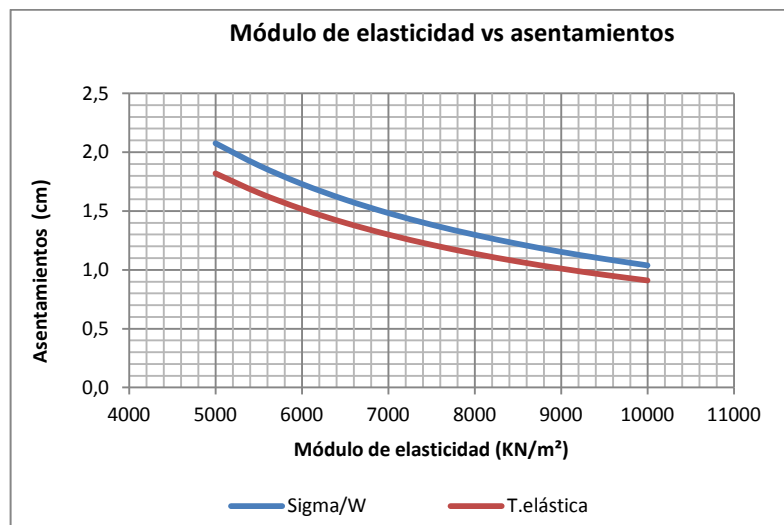
Resultados arcillas

- Para el escenario en el cual se varía el módulo de elasticidad

Tabla 5. Asentamientos en arcillas para cada valor de módulo de elasticidad.

E (KN/m ²)	Asentamientos (cm)	
	T. elasticidad	Sigma/W
5000	1.8200	2.076
5500	1.6546	1.888
6000	1.5167	1.730
6500	1.4000	1.597
7000	1.3000	1.483
7500	1.2133	1.384
8000	1.1375	1.298
8500	1.0706	1.221
9000	1.0111	1.153
9500	0.9579	1.093
10000	0.9100	1.038

Figura 8. Módulo de elasticidad contra los asentamientos de las arcillas.

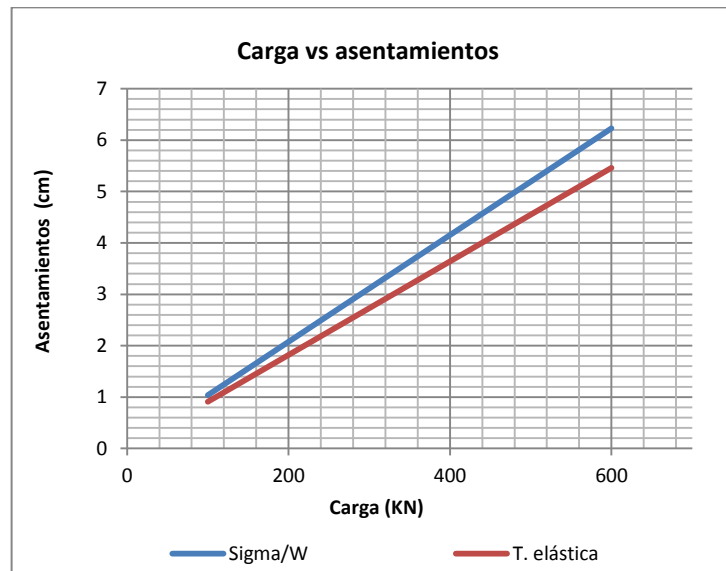


- Para el escenario en el cual se varía la carga.

Tabla 6. Asentamientos en arcillas para cada valor de carga.

q (KN)	Asentamientos (cm)	
	T. elasticidad	Sigma/W
100	0.91001	1.038
150	1.36501	1.557
200	1.82001	2.076
250	2.27501	2.595
300	2.73002	3.114
350	3.18502	3.633
400	3.64002	4.153
450	4.09502	4.672
500	4.55003	5.191
550	5.00503	5.710
600	5.46003	6.229

Figura 9. Carga contra los asentamientos de las arcillas.



Variación porcentual de las teorías con respecto al programa Sigma/W.

Tabla 7. Variación porcentual cuando se varía el número de golpes en arenas.

N (golpes)	Variación porcentual con respecto a Sigma/W			
	Schmertmann	Terzaghi	Meyerhof	Peck, Hanson
10	32	99	33	128
12	32	99	33	128
14	32	99	33	128
16	32	99	33	128
18	32	99	33	128
20	32	99	33	128

Tabla 8. Variación porcentual cuando se varía la carga en arenas.

q (KN/m ²)	Variación porcentual con respecto a Sigma/W			
	Schmertmann	Terzaghi	Meyerhof	Peck, Hanson
100	32	99	33	128
200	29	99	33	128
300	28	99	33	128
400	27	99	33	128
500	27	99	33	128
600	27	99	33	128
700	26	99	33	128
800	26	99	33	128
900	26	99	33	128
1000	26	99	33	128

Tabla 9. Variación porcentual cuando se varía el módulo de elasticidad en arcillas.

E (KN/m2)	Variación (%)
5000	12
5500	12
6000	12
6500	12
7000	12
7500	12
8000	12
8500	12
9000	12
9500	12
10000	12

Tabla 10. Variación porcentual cuando se varía la carga en arcillas.

q (KN)	Variación (%)
100	12
150	12
200	12
250	12
300	12
350	12
400	12
450	12
500	12
550	12
600	12

7. OBSERVACIONES

En el cálculo de asentamientos para arenas las teorías de Peck y Terzaghi dan una respuesta tenso-deformacional que se aproximan entre sí, teniendo variaciones aproximadas al 100% respecto a los asentamientos obtenidos con Sigma/W, en tanto que estas variaciones son en promedio del 32% para las teorías de Schmertmann y Meyerhof, pues estas tienen un comportamiento paralelo.

El comportamiento gráfico observado, tanto para arcillas como para suelos granulares en la relación de deformación en función del módulo de elasticidad del suelo, para todas las herramientas analíticas empleadas, presenta una tendencia no lineal y son casi paralelas entre ellas. Mientras la dependencia de los asentamientos con la carga si presenta una inclinación lineal.

El programa Sigma/W presenta considerables variaciones con la teoría de Schmertmann (arenas) y con la teoría elástica (arcillas), probablemente debido a la consideración del suelo como material sin peso en el modelo de Sigma/W. En tal caso la diferencia podría encargarse a la falta de confinamiento del cimiento, lo cual si se considera en las teorías.

Los resultados obtenidos son en base a la problemática propuesta, puesto que el programa asume un valor unitario de la longitud del cimiento y también señala resultados adversos con condiciones distintas, por tanto se invita a realizar otros estudios paramétricos para una mejor confiabilidad de uso.

8. CONCLUSIONES

- El programa sigma/w constituye una herramienta útil para el modelamiento de problemas de asentamientos elásticos. Este software es una herramienta sofisticada que permite la visualización gráfica y tabulada de la respuesta a la tensión producida por las cargas impuestas. Sus resultados se encuentran en un promedio entre las teorías existentes, siendo de esta forma un indicativo de aceptabilidad en el uso para soluciones de fundación, sin embargo estos resultados entregan valores alejados entre los métodos empleados, asignando al criterio ingenieril la escogencia de la herramienta a utilizar, sin que ello dependa de su mayor complejidad analítica.
- Los resultados determinados mediante los métodos de Schmertmann y Meyerhof son bastante próximos a los que se determinan con sigma/w, en el caso de suelos granulares. Para los suelos cohesivos las variaciones entre la teoría y la herramienta computacional son aun menores, ya que el comportamiento esfuerzo-deformación en estos últimos suelos tienen un carácter aproximadamente elástico-lineal que no tienen los suelos granulares; comportamiento el cual se formuló en el programa y que por ende presenta menores errores entre los resultados presentados.
- La comparación del software con las teorías se vio limitada debido a que el programa no tiene en cuenta algunos parámetros que las teorías si contemplan (ejemplo de ello es la profundidad de cimentación), se considera conveniente estudiar más a fondo el software con el fin de analizar mejor los efectos de las condiciones de frontera del programa.

- Para el análisis elástico-lineal el programa Sigma/W no permite diferenciar tipos de suelos como arcillas de arenas, pues los parámetros que se usan son los mismos (módulo de Elasticidad, módulo de poisson y carga aplicada).

BILIOGRAFÍA

[1] DAS Braja M. Fundamentos de Ingeniería geotécnica. Thomson Learning. California State University, Sacramento 1999.

[2] DAS Braja M. Principios de Ingeniería de cimentaciones. Thomson Learning. Cuarta edición California State University, Sacramento 2001, p. 219-256

[3] DELGADO VARGAS, Manuel. Ingeniería de Fundaciones. Fundamentos e introducción al análisis geotécnico. Escuela Colombiana de Ingeniería, primera edición, 1996. P. 229-379.

[4] Reglamento colombiano de Construcción sismo resistente, NRS 10. Bogotá. Título H. p. H17-H19.

[5] MESA, Camilo y ORTIZ, Jaime. Elementos finitos aplicados a casos particulares de cimentaciones superficiales. Trabajo de grado pregrado en Ingeniería Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. 2012. P. 32-34 y 58.

[6] [En línea] Disponible en: <http://www.geo-slope.com/products/sigmaw.aspx>

[7] GEO-SLOPE Internacional Ltda. Stress-Deformation Modeling with Sigma/w 2007. Fourth edition Canadá 2009. Capítulo 4, p. 100-101 [En línea]. Disponible en:
<http://www.ottegroup.com/manuals/SIGMAW%202007%20engineering%20book.pdf>

[8] LOPEZ, Germán. Introducción a la modelización de tensiones y deformaciones en el terreno mediante el uso del programa Sigma/W 2007. Pdf. [En línea]. Disponible en: http://www.uco.es/~me1lopig/docencia_archivos/Introduccion%20a%20SIGMA_2007.pdf

[9] Tutorial Geoestudio 2007 – Sigma getting started [En línea]. Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=dd22N5dLzpo>

[10] Tutoriales de los software del paquete de geoslope [En línea]. Disponible en: <http://www.youtube.com/user/rocasysuelos>

[11] LOPEZ P., Germán. Ingeniero de caminos, canales y puertos. Universidad de Córdoba, España. Consultas vía electrónica email: mellopip@uco.es