

**Estudio del comportamiento de fundaciones superficiales mediante modelamiento con el  
programa SIGMA W**

**Mauro Alirio Oviedo Hernández**

**Nidia Romero Romero**

**Proyecto de grado modalidad trabajo de Investigación presentado para optar al título de  
Ingeniero Civil**

**Director:**

**Wilfredo Del Toro Rodríguez**

**Magíster en Geotecnia**

**Universidad Industrial de Santander**

**Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**Bucaramanga**

**2018**

## Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	15
1. Marco teórico .....	17
1.1 Cimentación .....	17
1.1.1 Cimentación Directa. ....	17
1.1.2 Cimentaciones Profundas.....	18
1.2 Asentamientos.....	19
1.2.1 Clasificación de asentamientos.....	20
1.2.2 Causas de asentamientos.....	21
1.2.3 Cálculo de Asentamientos.....	22
1.2.4 Elementos de contención .....	29
1.2.5 Estructuras Enterradas. ....	33
1.3 Método Elementos Finitos .....	36
1.4 Modelación Numérica.....	37
2. Modelización de tensiones y deformaciones en un suelo a través de $\sigma_w$ .....	37
2.1 Análisis de deformación .....	38
2.1.1 Análisis por Etapas de Construcción .....	39
2.1.2 Análisis de Líneas de Flujo.....	40

2.1.3 Análisis de Interacción de Suelo-Estructura .....	41
2.1.4 Análisis de Consolidación.....	42
2.2 Geometría y mallado.....	43
2.2.1. Líneas Libres.....	44
2.2.2. Elementos de La Interfaz De Líneas.....	44
2.3 Modelos Constitutivos .....	46
2.3.1. Modelo Lineal Elástico.....	47
2.3.2. Modelo Elástico Anisotrópico.....	47
2.3.3. Modelo Hiperbólica.....	48
2.3.4. Modelo Elasto-Plastico.....	49
2.3.5. Modelo Cam – Clay.....	50
2.3.6. Modelo Cam Clay Modificado .....	51
2.3.7. Modelo Personalizado.....	51
2.4 Condiciones de Contorno.....	52
2.4.1. En cuanto a modelación de cargas .....	52
2.4.2. En cuanto a colocación de dominios.....	54
2.5 Tipos de análisis.....	56
2.5.1. Análisis Transversal.....	56
2.5.2. Tensiones iniciales in situ.....	56
2.5.3. Especificación de las condiciones iniciales.....	56
2.5.4 Análisis de carga-deformación.....	57
2.5.5 Análisis de deformación dinámica.....	57
2.5.6 Análisis de múltiples etapas.....	58

2.5.7 Análisis de poropresion.....	58
2.6 Asignación de materiales .....	58
2.6.1 Funciones curvas (spline). .....	60
2.6.2 Funciones lineales (linear).....	60
2.6.3 Complemento de funciones (add-in).....	61
2.7 Elementos estructurales .....	61
2.7.1 Elemento tipo barra.....	61
2.7.2 Elemento tipo viga. ....	61
2.8 Secuencia de construcción por etapas.....	62
2.9 Visualización de resultados.....	63
2.9.1 Modificaciones de contorno.....	64
2.9.2 Etiquetas de contorno.....	65
2.9.3 Circulo de Mohr.....	66
2.9.4 Gráficos.....	67
2.10 Modelamiento de casos en SIGMA W .....	68
2.10.1. Ejercicios.....	68
3. Conclusiones .....	80
Bibliografía .....	82
Apéndices.....	84

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
<i>Figura 1.</i> Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas.....	23
<i>Figura 2.</i> Variación de $I_z$ con la profundidad.....	27
<i>Figura 3.</i> Estructuras ancladas comunes .....	30
<i>Figura 4.</i> Tipos de Muros .....	32
<i>Figura 5.</i> Pantallazo Presentación opción análisis de resultados $\sigma/w$ .....	38
<i>Figura 6.</i> Distribución de deformaciones y distribuciones de esfuerzos.....	39
<i>Figura 7.</i> 7 <sup>a</sup> Primera excavación con presencia del nivel freático y 7b Segunda excavación con presencia del nivel freático. ....	40
<i>Figura 8.</i> Modelación de la excavación de un túnel.....	40
<i>Figura 9.</i> Líneas de flujo causadas por la construcción de un terraplén.....	41
<i>Figura 10.</i> Diagrama de momentos en una Tabla-estaca. ....	41
<i>Figura 11.</i> Simulación de una muestra triaxial con carga lateral aplicada y 10b Grafica de la variación de la poropresion en el tiempo. ....	42
<i>Figura 12.</i> Pantallazo descripción de geometría y puntos asignados. ....	43
<i>Figura 13.</i> Lineas de anclaje (lineas se enlazan parcialmente). ....	44
<i>Figura 14.</i> a) Interaccion de elementos con geometria; b.Comando para asignar la interaccion de la linea modelo.....	45

<i>Figura 15.</i> a) Condiciones para crear propiedades de mallado particulares; b. Creacion de interfaz para una region circular con centro definido. ....	45
<i>Figura 16.</i> Curvas características de los modelos constitutivos en SIGMA / W. ....	46
<i>Figura 17.</i> Comportamiento de una muestra entre variación de volumen-presión y tensión-deformación. ....	50
<i>Figura 18.</i> Opción para crear un nuevo modelo constitutivo en sigma/w.....	52
<i>Figura 19.</i> Como asignar condiciones de contorno en sigma/w.....	53
<i>Figura 20.</i> Como asignar condiciones de contorno nodales en sigma. ....	55
<i>Figura 21.</i> Parámetros requeridos para la asignación de material, en un suelo con comportamiento lineal-elástico. ....	59
<i>Figura 22.</i> Comparación de las diversas funciones para asignación de materiales.....	60
<i>Figura 23.</i> Muestra grafica de los elementos tipo barra y tipo viga. ....	62
<i>Figura 24.</i> a) Primera etapa de excavación y activación de tablestacas, b) Segunda etapa de excavación y activación de abrazadera superior. ....	63
<i>Figura 25.</i> Resultados de una carga aplicada. ....	64
<i>Figura 26.</i> Muestra grafica de como modificar un contorno en sigma/w. ....	65
<i>Figura 27.</i> Como asignar etiqueta a los contornos. ....	66
<i>Figura 28.</i> Circulo de Mohr.....	66
<i>Figura 29.</i> Visualización de resultados por la opción de gráfico: Carga-deformación en base de una zapata.....	67
<i>Figura 30.</i> Condiciones graficas de una zapata superficial. ....	69
<i>Figura 31.</i> Condiciones graficas de una zapata analizada en sigma/w.....	73
<i>Figura 32.</i> Desplazamientos en Y de una zapata analizada en sigma/w. ....	73

*Figura 33.* Condiciones graficas del terraplén a analizar. .... 74

*Figura 34.* Variación del valor de influencia I. .... 76

*Figura 35.* Continuación variación del valor de influencia I..... 77

*Figura 36.* Condiciones graficas de terraplén analizado en  $\sigma/w$ . .... 79

*Figura 37.* Desplazamiento total en Y de un terraplén analizado en  $\sigma/w$ . .... 80

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Causas de asentamiento de cimentación</i> .....	21
Tabla 2. <i>Parámetros elásticos según el tipo de suelo</i> .....	25
Tabla 3. <i>Factores para cada método según el autor</i> .....	29
Tabla 4. <i>Elementos de Contención</i> .....	30
Tabla 5. <i>Estructuras enterradas</i> .....	34
Tabla 6. <i>Propiedades requeridas por sigma para un modelo lineal elastico</i> .....	47
Tabla 7. <i>Propiedades requeridas por sigma para un modelo elastico anisotropico.</i> .....	48
Tabla 8. <i>Propiedades requeridas por sigma para un modelo hiperbolico.</i> .....	48
Tabla 9. <i>Propiedades requeridas por sigma para un modelo elasto-plastico</i> .....	49
Tabla 10. <i>Propiedades requeridas por sigma para un modelo cam-clay</i> .....	51
Tabla 11. <i>Indicación grafica de la condición de contorno nodales.</i> .....	54
Tabla 12. <i>Indicaciones graficas de las condiciones de contorno de caras de dominio</i> .....	55
Tabla 13. <i>Parámetros del terreno de un análisis de cimentación superficial</i> .....	69
Tabla 14. <i>Resultados del análisis de una cimentación superficial</i> .....	71
Tabla 15. <i>Coordenadas puntos de contorno de una zapata</i> .....	72
Tabla 16. <i>Parámetros del análisis de un terraplén</i> .....	74
Tabla 17. <i>Cuadro de resultados análisis teórico de un terraplén</i> .....	78
Tabla 18. <i>Coordenadas puntos de contorno de un terraplén</i> .....	78

**Lista de apéndices****Pág.**

Apéndice A. Análisis por medio de $\sigma/w$ del desplazamiento de una excavación sencilla ....	84
Apéndice B. Análisis por medio de SIGMA/W de un pilote.....	88
Apéndice C. Ejemplo excavación con pantallas ancladas .....	106

## Resumen

**Título:** Estudio del comportamiento de fundaciones superficiales mediante modelamiento con el programa SIGMA W\*

**Autor:** Mauro Alirio Oviedo Hernández\*\*  
Nidia Romero Romero

**Palabras Clave:** MODELIZACIÓN, TUTORIAL, COMPARACIÓN

**Descripción:** Cuando un suelo es sometido a una carga uniformemente distribuida, el mismo presentara una variación de esfuerzos, generando unas deformaciones. Dicha variación en la mayoría de los suelos, aún bajo cargas pequeñas, son mayores que las que se producen en otros materiales estructurales como el acero y concreto. Estas deformaciones se traducen en un desplazamiento en dirección vertical de la masa de suelo, dando lugar a fenómenos de asentamientos; los cuales varían según el material a analizar. Los asentamientos del suelo dependen de variables tales como ubicación, propiedades geo mecánicas y esfuerzos aplicados, entre otras. En la mayoría de los casos estos desplazamientos son los causantes, de importantes daños estructurales que se han presentado a través de la historia. Las cargas generadas por la estructura no siempre producen asentamientos inmediatos, o en su mayoría, son superiores a las que puede soportar el suelo. Por esta razón se ha visto la necesidad de analizar el comportamiento de los materiales del terreno y plantear posibles soluciones. En este Proyecto de grado se realiza diferentes análisis de esfuerzos y deformaciones mediante alternativas de cálculo de deformaciones usando el software SIGMA W, basado en elementos finitos, y se entrega un tutorial para un usuario en etapa de iniciación basado en gráficos y ejemplos.

Cuando se realiza el proceso de diseño se destaca el uso del software SIGMA/W ya que este nos permite realizar cambios en las secciones de las cimentaciones y en las resistencias de los mismos en un tiempo mínimo, con el fin de obtener un diseño final que cumpla con la normativa exigida, que soporte las cargas a las que será sometida y que nos lleve a realizar un diseño ideal y que mejor se nos ajuste al presupuesto de obra.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director Wilfredo del Toro. Magíster en Geotecnia

### Summary

Title: Study of the behavior of superficial foundations through modeling with the SIGMA W Program\*

**Author:** Mauro Alirio Oviedo Hernández\*\*  
Nidia Romero Romero

**Key Words:** MODELING, TUTORIAL, COMPARISON

**Description:** When a soil is subjected to a uniformly distributed load, it will present a variation of stresses, generating deformations. This variation in most soils, even under small loads, is greater than those that occur in other structural materials such as steel and concrete. These deformations translate into a displacement in vertical direction of the ground mass, giving rise to settlement phenomena; which vary according to the material to analyze. Soil settlements depend on variables such as location, geo-mechanical properties and applied stresses, among others. In most cases these displacements are the cause of major structural damage that has occurred throughout history. The loads generated by the structure do not always produce immediate settlements, or in their majority, they are superior to those that the soil can support. For this reason, it has been necessary to analyze the behavior of the terrain materials and propose possible solutions. In this Degree Project, different stress and deformation analyzes are carried out using deformation calculation alternatives using the SIGMA W software, based on finite elements, and a tutorial is given for a user in the initiation stage based on graphs and examples.

When the design process is carried out, the use of the SIGMA / W software is highlighted since this allows us to make changes in the sections of the foundations and their resistances in a minimum time, in order to obtain a final design that comply with the regulations required, that support the loads to which it will be subjected and that leads us to perform an ideal design and that best fits the budget of work.

---

\* Degree work

\*\* Faculty of physical-mechanical engineering. School of Civil Engineering. Director Wilfredo del Toro, Master in Geotechnics

## Introducción

En el transcurso del tiempo, se ha observado que los suelos, al presentar variación de esfuerzos, experimentan deformaciones. Dicha variación en la mayoría de los suelos, aún bajo cargas pequeñas, son mayores que las que se producen en otros materiales estructurales como el acero y concreto. Estas deformaciones se traducen en un desplazamiento en dirección vertical de la masa de suelo, dando lugar a fenómenos de asentamientos; los cuales varían según el material a analizar. Las relaciones más sencillas se producen en los materiales elástico-lineales, donde el esfuerzo y la deformación son proporcionales e independientes del tiempo. Los asentamientos del suelo dependen de variables tales como ubicación, propiedades geomecánicas y esfuerzos aplicados, entre otras.

En la mayoría de los casos estos desplazamientos son los causantes, de los daños estructurales que se han presentado a través de la historia. Las cargas generadas por la estructura no siempre producen asentamientos inmediatos, o en su mayoría, son superiores a las que puede soportar el suelo. Por esta razón se ha visto la necesidad de analizar el comportamiento de los materiales del terreno y plantear posibles soluciones, tales como las estudiadas por los ingenieros Karl von Terzaghi en su libro *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Manuel Delgado Vargas en su libro “Fundamentos e introducción al análisis geotécnico” y el ingeniero Braja M. Das en su libro “Principles of Geotechnical Engineering” por mencionar algunos.

En este Proyecto de grado se realiza un análisis de esfuerzos y deformaciones mediante alternativas de cálculo de deformaciones usando el software SIGMA W, basado en elementos

finitos. Dicho análisis se realizó para materiales por separado, debido a que los métodos teóricos varían considerablemente según se trabaje con uno u otro tipo de suelo.

## 1. Marco teórico

### 1.1 Cimentación

La elección del tipo de cimentación depende especialmente de las características mecánicas del terreno, como su cohesión, su ángulo de rozamiento interno, posición del nivel freático y también de la magnitud de las cargas a soportar. A partir de todos esos datos se calcula la capacidad portante, que junto con la homogeneidad del terreno aconsejan usar un tipo u otro diferente de cimentación. Siempre que es posible se emplean cimentaciones superficiales, ya que son el tipo de cimentación menos costoso y más simple de ejecutar. Cuando por problemas con la capacidad portante o la homogeneidad del mismo no es posible usar cimentación superficial se valoran otros tipos de cimentaciones. Hay dos tipos fundamentales de cimentación:

**1.1.1 Cimentación Directa.** La cimentación directa es aquella que se da cuando se reparten las cargas de una estructura en un plano horizontal, estas se emplean para transmitir al terreno las cargas de uno o varios pilares de la estructura de los muros de carga o de contención de tierras en los sótanos, de los forjados o de toda la estructura. Cuando todas estas condiciones se proporcionan se manejarán cimentaciones directas, las cuales se construyen a poca profundidad bajo la superficie por eso también son llamadas cimentaciones superficiales.

Se clasifican en:

- Zapatas aisladas

- Zapatas corridas
- Zapatas corridas para pilares
- Emparrillado de zapatas corridas
- Losa corrida de cimentación

La influencia del tipo de edificio a ejecutar también es importante en la selección de la cimentación. Las características más importantes de los edificios a tener en cuenta al analizar la cimentación pueden ser:

- Existencia de sótanos.
- Edificios ligeros de poca altura: se usará cimentación superficial.
- Edificios de poca altura: losas, pilotaje.
- Edificios de gran altura: Cimentaciones profundas o losas de cimentación.

Para poder realizar una buena cimentación es necesario un conocimiento previo del terreno en el que se va a construir la estructura.

**1.1.2 Cimentaciones Profundas.** Se basan en el esfuerzo cortante entre el terreno y la cimentación para soportar cargas aplicadas o más exactamente en la fricción vertical entre la cimentación y el terreno. Por eso debe ser más profundas para poder proveer sobre una gran área sobre la que distribuir un esfuerzo suficientemente grande para soportar la carga. Algunos métodos utilizados en cimentaciones profundas son:

- Pilotes: elementos de cimentación esbeltos que se hincan (pilotes de desplazamiento prefabricados) o construyen en una cavidad previamente abierta en el terreno (pilotes pre excavados ejecutados in situ).

La utilización de las cimentaciones profundas será requerida cuando:

- Las cargas no pueden transmitirse al terreno con una cimentación superficial
- Asientos imprevisibles, pero existiendo terreno profundo resistente
- Cuando el terreno de cimentación puede sufrir grandes variaciones (retracción, expansión...)
- Estructuras sobre agua
- Cargas inclinadas
- Recalce de cimentaciones existentes

## **1.2 Asentamientos**

Toda obra civil es soportada por una masa de suelo, ya sea por el estrato superficial o por estratos más profundos. Al cimentar una estructura sobre el suelo, este es sometido a un estado de esfuerzo que produce deformaciones en la masa, las cuales (según se establecen en el capítulo H de la norma NSR-10) provienen de la variación del volumen y/o de la forma (NSR 10, 1997). Estas deformaciones dan origen al fenómeno de asentamientos.

De acuerdo con Day, R. el asentamiento se define como el “desplazamiento permanente en dirección vertical que sufre una fundación” (R, 2000). Este desplazamiento vertical de la fundación puede involucrar tanto movimientos descendentes como ascendentes. Tal es el caso de los levantamientos, cuyo origen se halla en las características expansivas del material de la fundación

o bien cuando el suelo sufre carga y descarga. Para efectos de la presente investigación, el asentamiento se comprenderá como un desplazamiento vertical descendente. Fundamentalmente, los movimientos son verticales descendentes, sin embargo, no se debe olvidar los desplazamientos horizontales, especialmente durante cargas dinámicas como los sismos.

**1.2.1 Clasificación de asentamientos.** A partir del comportamiento del suelo como medio de soporte, los asentamientos pueden dividirse en tres componentes:

- Asentamientos elásticos: Corresponden a la deformación del suelo en forma instantánea al aplicar la carga estructural.
- Asentamientos por consolidación primaria: Es la deformación del material en forma diferida, la cual es ocasionada por la expulsión de agua de los vacíos del suelo, finalizando cuando se estabiliza el esfuerzo efectivo y cuando la presión de poros se disipa.
- Asentamientos por consolidación secundaria: Dicha deformación ocurre en forma diferida conjuntamente con la consolidación primaria, sin embargo, esta continúa una vez finaliza este proceso. Su origen radica en la deformación del esqueleto sólido del suelo bajo esfuerzo cortante.
- Asentamientos diferenciales: Se origina por la deformación relativa entre dos cimientos que ocasionan daños en la estructura y en sus acabados.

A estos cuatro componentes descritos anteriormente, debe agregarse el asentamiento producto del potencial de colapso del suelo, aspecto que no será tratado con más detalle en la presente investigación.

**1.2.2 Causas de asentamientos.** Como se indicó anteriormente, la deformación en el suelo es resultado de la variación de volumen y/o de la forma de las partículas de la masa. A continuación, en la tabla 1, se muestra un cuadro del U.S Army Corps of Engineers, cuyo objetivo es mostrar las diferentes causas de asentamientos de cimentación, así como una pequeña descripción.

Tabla 1.

*Causas de asentamiento de cimentación*

Causas	Descripción
Compresión del suelo debajo de la fundación, bajo la acción de cargas estáticas.	Suelos suaves, arcillas normalmente consolidadas y suelos compresibles. Limos sueltos, arenas y gravas.
Compresión de arcillas suaves, producto del descenso en el contenido de humedad.	El incremento de los esfuerzos efectivos produce asentamientos sin un correspondiente incremento en las cargas sobre la superficie.
Compresión de suelos no cohesivos producto de vibraciones.	Son más susceptibles las arenas sueltas y gravas. El asentamiento puede ser causado por vibraciones de máquina o terremotos.
Compresión del suelo de fundación debido al aumento en la humedad.	Arenas-limos sueltos y gravas son más susceptibles. El aumento en el contenido de humedad puede deberse a ascensos del nivel freático o por infiltraciones.
Contracciones de suelos cohesivos debido al estado seco del material.	Mayor susceptibilidad en arcillas altamente plásticas. Se debe al incremento del contenido de humedad en estos materiales.
Pérdida de soporte en la fundación producto de excavaciones adyacentes.	Efecto más pronunciado en arcillas suaves y saturadas.

Fuente. Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos. Engineers, U.S Army Corps of. (2012). U.S Army. Disponible en: <https://www.usa.gov/federal-agencies/u-s-army-corps-of-engineers>

**1.2.3 Cálculo de Asentamientos.** Las cimentaciones superficiales reparten la fuerza que le transmite la estructura a través de sus elementos de apoyo, sobre una superficie de terreno que admite esas cargas. Se considera cimentación superficial cuando tiene 0,50 m a 4,0 m de profundidad y cuando las tensiones admisibles de las diferentes capas del terreno que se hallan hasta esa cota, permiten apoyar estructuras en forma directa sin provocar asientos excesivos que puedan afectar la funcionalidad de la estructura; de no ser así, se harán cimentaciones profundas.

Para el cálculo de los asentamientos en cimentaciones superficiales, se han desarrollado un sin número de teorías y formas de análisis, sin embargo, para este estudio en particular, se tendrán en cuenta las siguientes:

**Teoría de la Elasticidad:** Las cimentaciones rasas producen deformaciones de tipo elástico y son calculadas por medio de la teoría de la elasticidad basada en la ley de Hooke (Hooke, 2010), la cual se define como:

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

Dónde:

- $S_e$ =asentamientos elásticos
- $E_s$ =módulo de elasticidad del suelo
- $H$ = Espesor del suelo
- $\mu_e$ = relación de Poisson del suelo

•  $\sigma_z, \sigma_x, \sigma_y$  = incremento del esfuerzo debido a la carga neta aplicada a la cimentación, en las direcciones x,y, z respectivamente.

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

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

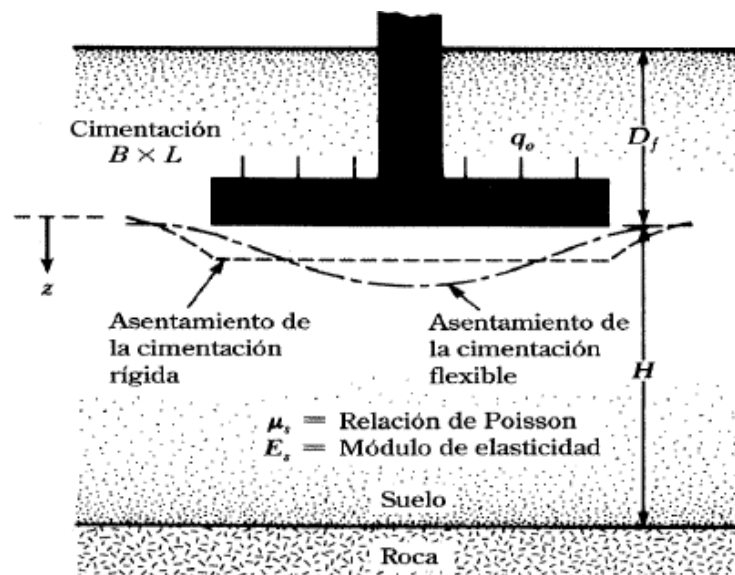


Figura 1. Asentamiento elástico de cimentaciones flexibles y rígidas. Adaptada de Principio de ingeniería de Cimentaciones (Braja Das)

Donde

- $q_o$  = Presión neta aplicada sobre la cimentación
- $\mu_s$  = Relación de Poisson del suelo

- $E_s$ =módulo de elasticidad promedio del suelo bajo la cimentación medido desde  $z=0$  hasta  $z = 4B$
- $B=B/2$  para el centro de la cimentación  
B para una esquina de la cimentación
- $I_s$ =Factores de forma (Steinbrenner, 1934)
- $I_f$ =Factor de Profundad (Fox, 1948)
- $\alpha$ =Factor que depende de la posición de la cimentación donde está siendo calculado.

Cuando no se tienen ensayos de laboratorio para el módulo de elasticidad o el coeficiente de poisson, estos deben hallarse con correlaciones, tal como lo propone Schemertmann 1970, para el módulo de elasticidad:

$$E_s = 766N_f. \text{ (Para arenas)}$$

Donde  $N_f$  es el número de penetración estándar en campo

Otra correlación existente es  $E_s = 2q_c$ .

Donde  $q_c$  es la resistencia a la penetración estática de cono; a esta correlación Schmertmann y Hartman (1974) propusieron que se usara con los factores de influencia de deformación unitaria.

- $E_s = 2,5q_c$  para cimentaciones cuadradas y circulares.

- $E_s = 3,5q_c$  para cimentaciones corridas.

Además de las correlaciones se pueden encontrar tablas con un rango de parámetros según el tipo de suelo como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2.

*Parámetros elásticos según el tipo de suelo*

Tipo de suelo	Módulo de elasticidad (Mpsi)	Relación de Poisson
Arena suelta	10,35 - 24,15	0,2 - 0,4
Arena densa media	17,25 - 27,6	0,25 - 0,4
Arena densa	34,5 - 55,2	0,3 - 0,45
Arena limosa	10,35 - 17,25	0,2 - 0,4
Arena y grava	69 - 172,5	0,15 - 0,35
Arcilla suave	4,1 - 20,7	
Arcilla media	20,7 - 41,4	0,2 - 0,5
Arcilla firme	41,4 - 96,6	

Fuente. Principio de ingeniería de Cimentaciones (Das, 2001)

**Teoría de Schmertmann y Hartman (1978):** Para determinar el asentamiento en suelos granulares se suele usar el método semi-empírico planteado por (Schmertmann & Hartman, 1978)

La ecuación propuesta es:

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

Dónde:

- $I_z$  = factor de influencia de deformación unitaria
- $C_1$  = factor de corrección para la profundidad del empotramiento de la cimentación
- $C_1 = 1 - 0,5\left[\frac{q}{\bar{q}-q}\right]$
- $C_2$  = factor de corrección para tomar en cuenta el flujo plástico en el suelo
- $C_2 = 1 + 0,2\log(\text{tiempo en años}/0.1)$
- $\bar{q}$  = esfuerzo al nivel de la cimentación
- $q = \gamma D_f$

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

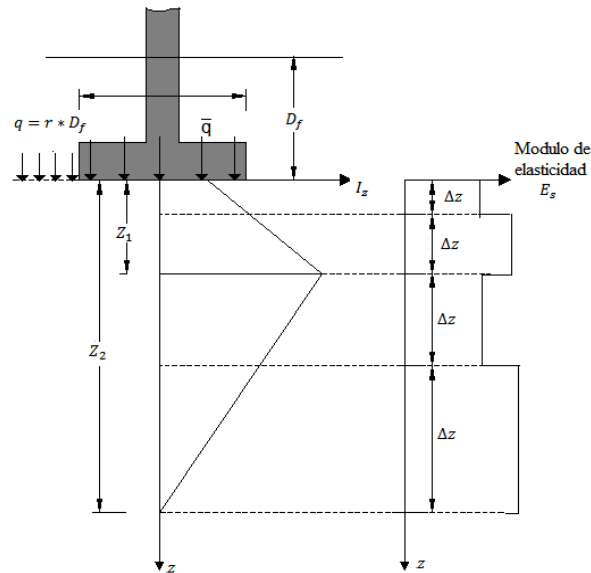


Figura 2. Variación de  $I_z$  con la profundidad. Adaptado de Das, Braja M. (2001). diegovc.

Disponible

en:

[http://diegovc.ublog.cl/archivos/13166/braja\\_das\\_principios\\_de\\_ingenieria\\_de\\_cimentaciones.pdf](http://diegovc.ublog.cl/archivos/13166/braja_das_principios_de_ingenieria_de_cimentaciones.pdf)

f

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

El procedimiento que se lleva a cabo al utilizar este método es el siguiente: se debe evaluar la variación del módulo de elasticidad con la profundidad, dicha evaluación se puede hacer con los números de penetración estándar o resistencias de penetración del cono. Después se divide el estrato de suelo en varias capas teniendo en cuenta los valores donde cambie el módulo de elasticidad, se calcula el asentamiento para cada capa y finalmente se suman los asentamientos individuales.

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

$$S = qC_1K_BK_DK_W$$

Tabla 3.

*Factores para cada método según el autor*

Autor	$C_1 = 1/k_1$ (cm <sup>3</sup> /Kg)	$K_B$	$K_D$	$K_W$
Terzaghi-Peck (1948-1968)	$\frac{7,62}{N}$	$\left(\frac{2B}{B+0,3}\right)^2$	$1.0-0,25\left(\frac{D}{B}\right)$	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)	$\frac{5,08}{N}$	$\left(\frac{2B}{B+0,3}\right)^2$	$1.0-0,25\left(\frac{D}{B}\right)$	1,0

*Nota.* Delgado Vargas Manuel. Ingeniería de Fundaciones.

**1.2.4 Elementos de contención.** En las estructuras ancladas se colocan varillas o tendones generalmente, de acero en perforaciones realizadas con taladro, posteriormente se inyectan con cemento. Los anclajes pueden ser pretensados para colocar una carga sobre un bulbo cementado o pueden ser cementados simplemente sin colocarles carga activa.

Las estructuras ancladas, más comunes son:

- Pernos

- Muros Anclados
- Nailing

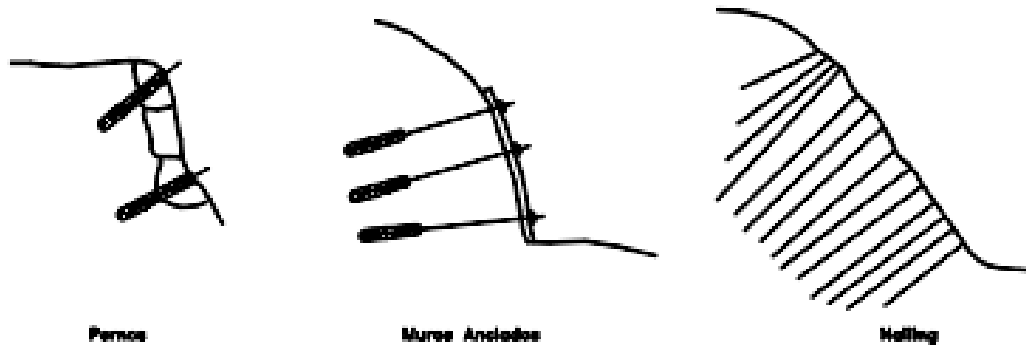


Figura 3. Estructuras ancladas comunes

Tabla 4.

*Elementos de Contención*

Estructura	Ventajas	Desventajas
Anclajes y pernos individuales	Permiten la estabilización del bloque individual o puntos específicos dentro de un macizo de roca.	Pueden sufrir corrosión.
Muros Anclados	Se pueden construir en forma progresiva de arriba hacia abajo, a medida que se avanza con el proceso de excavación. Permiten excavar junto a edificios o estructuras. Permite grandes alturas.	Los elementos de refuerzo pueden sufrir corrosión en ambientes acidos. Se puede requerir un mantenimiento permanente (tensionamiento). Con frecuencia se roban las tuercas y elementos de anclaje. Para su construcción se puede requerir el permiso del vecino. Su construcción es muy costosa.

Tabla 4. *Continuación*

Estructura	Ventajas	Desventajas
Nailing o Pilotillos tipo raíz	Muy eficientes como elementos de refuerzo en materiales fracturados o sueltos.	Generalmente se requiere una cantidad grande de piloticos para estabilizar un talud específico, lo cual los hace costoso.

*Nota.* Blazquez, Luis Bañón. (2010). Rua. Disponible en: <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25641/21/Tema%2021%20-%20Elementos%20de%20contenci%C3%B3n.pdf>

**1.2.4.1. Pernos:** Son elementos estructurales constituidos, generalmente por varillas de acero, las cuales se colocan dentro de una perforación, la cual se inyecta posteriormente con cemento para unir la varilla al macizo de roca. En esta forma, se pueden evitar los caídos de roca y deslizamientos en macizos de roca fracturada con discontinuidades en el macizo y de la estabilidad de los bloques. La parte más importante del diseño es determinar la localización, ángulo de inclinación y longitud de cada perno.

**1.2.4.2. Muros Anclados:** Son elementos de contención de tierras que se emplean para realizar excavaciones verticales en aquellos casos en los que el terreno, los edificios u otras estructuras cimentadas en las inmediaciones de la excavación, no serían estables sin sujeción, o bien, se trata de eliminar o reducir a límites admisibles las posibles filtraciones a través del fondo de la misma, o de asegurar la estabilidad de este frente. Se construyen desde la superficie del terreno previamente a la ejecución y trabajan fundamentalmente a flexión. Si la excavación se produce por debajo del nivel freático, habrá que prever una impermeabilización suplementaria al propio hormigón.

Los muros se definen como elementos de contención destinados a establecer y mantener una diferencia de niveles en el terreno con una pendiente de transición superior a lo que permitiría la resistencia del mismo, transmitiendo a su base y resistiendo con deformaciones admisibles los correspondientes empujes laterales. Por los materiales empleados, los muros generalmente son de hormigón en masa o armado, mampostería o prefabricados.

Por su concepto estructural se distinguen entre otros, los muros de gravedad, rígidos, de contrafuertes, en L o en ménsula, de sótano y los realizados por etapas de construcción, según descritos en la figura 4;



Figura 4. Tipos de Muros

Las condiciones esenciales de las pantallas que las diferencian de los muros y las entibaciones, son:

- Se ejecutan previamente a la excavación.
- En general, alcanzan una profundidad bajo el fondo de la excavación que no es pequeña en relación con la altura libre de la pantalla.

- El empotramiento de la pantalla en el terreno por debajo de fondo de la excavación es, en general indispensable para su estabilidad, y siendo el peso propio de la pantalla un factor de influencia muy escasa o nula.

- Son estructuras flexibles y resisten los empujes del suelo deformándose.

**1.2.4.3. Nailing o Micropilotes:** Es un método de refuerzo in situ utilizando micropilotes vacíos capaces de movilizar resistencia a tensión en el caso de ocurrencia de un movimiento. Se diferencian de los pilotes en cuanto los micropilotes no resisten cargas laterales a flexión. Pueden ser varillas de acero, tubos. Pueden ser hincados o inyectados en perforaciones previamente realizadas.

**1.2.5 Estructuras Enterradas.** Las estructuras enterradas son elementos capaces de resistir esfuerzos a flexión que se colocan dentro del suelo atravesando la posible superficie, en la tabla 5 se describen ventajas y desventajas de las mismas. Estas estructuras trabajan empotradas en el suelo por debajo de la falla. Se conocen varios tipos de estructuras enterradas así:

- Tablestacas
- Pilotes
- Pilas o Caissons

Tabla 5.

*Estructuras enterradas*

Estructura	Ventajas	Desventajas
Tablestacas	Su construcción es rápida y no requiere cortes previos. Son de fácil construcción en los cuerpos de agua o ríos.	No se pueden construir en sitios con presencia de rocas o cantos. Su construcción es muy costosa.
Pilotes	Se pueden construir rápidamente	Se puede requerir un número grande de pilotes para estabilizar un deslizamiento.
Pilas	No se requiere cortar el talud antes de construirlo. Se utilizan sistemas convencionales de construcción. Pueden construirse en sitios de difícil acceso. Varios caissons pueden ser construidos simultáneamente.	Se requiere profundizar muy por debajo del pie de la excavación. Su costo es generalmente elevado. La excavación puede requerir control de nivel freático. Debe tenerse especial cuidado en las excavaciones para evitar accidentes.

*Nota.* Inti. (2009). Inti.gob. Disponible en: [https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/13-Seccion\\_12\\_2004.pdf](https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/13-Seccion_12_2004.pdf)

**1.2.5.1. Tablestacas:** son estructuras de contención hincadas, delgadas y esbeltas las cuales trabajan generalmente a flexión empotrada o anclada. Pueden ser de acero, de concreto o de madera, siendo las de acero las más utilizadas. El muro de tabla estaca está conformado por una serie de pilotes unidos entre sí para formar una pared continua. La integridad del muro depende de unas uniones entre pilotes individuales. Son usadas con relativa frecuencia como estructuras de contención para la conformación de muelles en ríos o mares. Para su hincado se requiere que el

suelo permita la penetración del pilote y no existan bloques o cantos grandes de roca. La sección de la tablestaca depende de la altura de la tierra a retenerse y de las condiciones del suelo y agua, así como del sistema de anclaje de los pilotes. La altura de los muros de tablestaca varía generalmente entre 4.5 m y 12 m.

**1.2.5.2. Pilotes:** Los pilotes hincados han sido utilizados en ocasiones para la estabilización de deslizamientos activos. Este método solo es apropiado para deslizamientos poco profundos que no fluyan entre los pilotes. Los deslizamientos profundos generalmente producen fuerzas laterales muy grandes que no pueden ser resistidas por los pilotes. Los pilotes deben enterrarse en suelo firme y competente para evitar su arrancamiento o inclinación. Es común la utilización de estructuras de concreto armado, uniendo las cabezas de los pilotes para mejorar su rigidez y comportamiento en general. Para determinar el espaciamiento entre pilotes y su longitud de empotramiento dentro del suelo se debe cumplir las siguientes condiciones:

- La presión lateral sobre el pilote debe ser menor que su capacidad de soporte bajo la carga horizontal.
- El suelo entre pilotes no debe ser excluido.

**1.2.5.3. Pilas:** En ocasiones se construyen grandes muros a profundidades importantes construyendo pilas de gran diámetro unidas entre sí, conformando una estructura o muro de gravedad. Estos muros o pilas generalmente son de concreto armado y se excavan utilizando procedimientos similares a los de las pilas para cimentación de edificios. Generalmente se construye una sola hilera de pilas o pilotes, pero en algunos casos se utilizan dos hileras.

### 1.3 Método Elementos Finitos

El método de elementos finitos es una teoría basada en la solución matemática de ecuaciones que representa la iteración entre elementos que simulan el fenómeno de esfuerzo – deformación en obras de estabilización de tierras. Su formulación integral le permite analizar problemas simples y de alta complejidad logrando con ello elaborar análisis y diseños con un alto grado exactitud.

El propósito de este método es dividir un elemento continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por nodos consiguiendo así pasar de un sistema de infinitos grados de libertad a un sistema con un número de grados de libertad finito el cual es modelado por un sistema de ecuaciones. Los parámetros son: dominio, condiciones de contorno e incógnitas. Dominio: es el espacio geométrico donde se analiza el problema. Condiciones de contorno: son todas las variables conocidas que pueden llegar a alterar el sistema, e incógnitas: son las variables del sistema que se desean conocer luego de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema.

Para determinar la solución de un problema el método supone un dominio discretizado en subdominios: solución lineal (puntos); solución bidimensional (líneas); tridimensional (superficies), de modo que el conjunto de elementos se aproxime al dominio total, los elementos se conectan entre sí por un número discreto de nodos (puntos) sobre los cuales se materializan las incógnitas del problema, a las incógnitas se les conoce como grados de libertad que indican el estado y la posición del nodo.

## 1.4 Modelación Numérica

Gracias a los avances informáticos, en la actualidad existen numerosos programas que permiten realizar cálculos con elementos finitos. Claramente resulta mucho más fácil y económico modificar un modelo computacional que cambiar un modelo físico, o desgastarse en cálculos matemáticos extensos, es por tal razón que, aunque el método de elementos finitos es un método aproximado ha tenido tanta acogida e incluso es considerado como una de las herramientas más poderosas para la solución de problemas ingenieriles. Sigma/w es un software que calcula asentamientos mediante el método de elementos finitos. Sigma/w puede realizar un análisis elástico lineal, un análisis de tensión altamente sofisticada o un análisis no lineal elástico plástico.

## 2. Modelización de tensiones y deformaciones en un suelo a través de sigma w

El software sigma/w permite modelar diferentes comportamientos que sufre el terreno ante un estado de tensión por cargas, estos comportamientos dependen de la naturaleza propia del material y las propiedades del suelo. Los diferentes análisis permitidos por el software son los mostrados en la figura5:

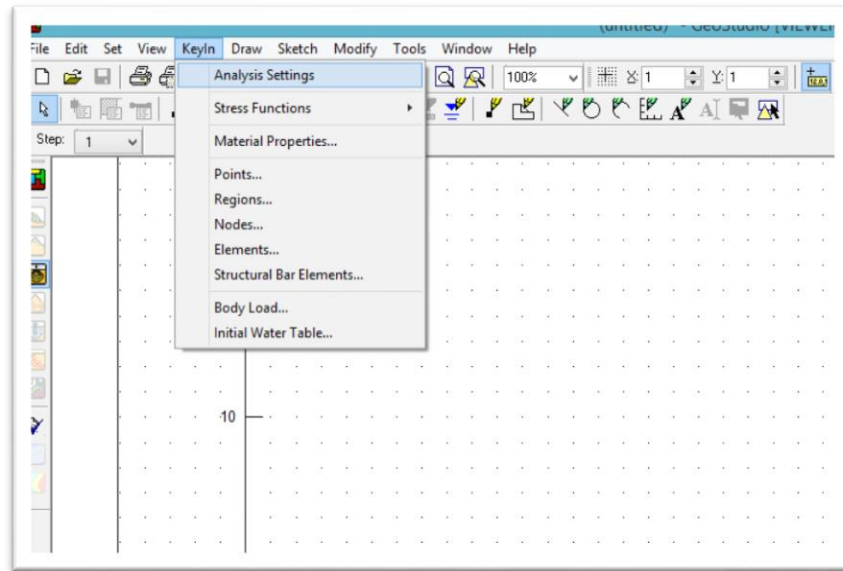


Figura 5. Pantallazo Presentación opción análisis de resultados sigma /w. Adaptado de Sigma W

## 2.1 Análisis de deformación

El software permite calcular las deformaciones causadas por estructuras tales como fundaciones, terraplenes, excavaciones y túneles, deformaciones mostradas en la figura 6<sup>a</sup> – 6b.

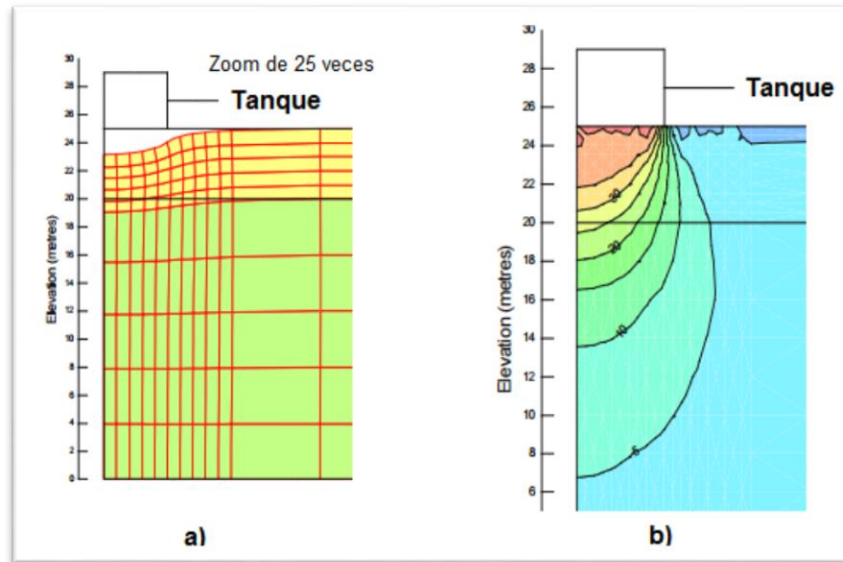


Figura 6. Distribución de deformaciones y distribuciones de esfuerzos. Adaptado de Sigma W

La figura 6-a muestra un caso típico de un tanque lleno de líquido colocado en la superficie de un suelo; en esta figura se puede observar una malla deformada a una escala exagerada. La figura 6-b muestra el cambio asociado en la tensión vertical en el suelo por la carga aplicada.

**2.1.1 Análisis por Etapas de Construcción:** Este tipo de análisis permite activar o desactivar regiones de suelo y de esta manera simular procesos constructivos, Sigma/w vincula estos análisis de forma automática agregando la variable tiempo por lo cual se puede simular secuencias de construcción. También se pueden aplicar condiciones de contorno que se mueven con el tiempo. La figura 7 muestra la secuencia de una excavación y la reducción de la filtración. La figura 7 muestra el cierre alrededor de un túnel en material lineal elástico anisotrópico.

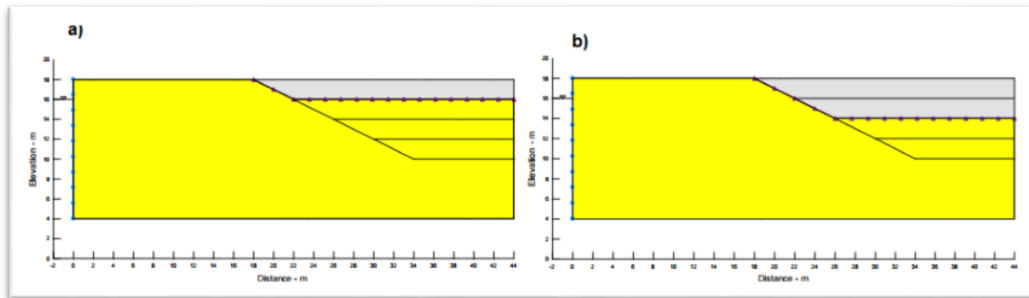


Figura 7. 7<sup>a</sup> Primera excavación con presencia del nivel freático y 7<sup>b</sup> Segunda excavación con presencia del nivel freático. Adaptado de Sigma W

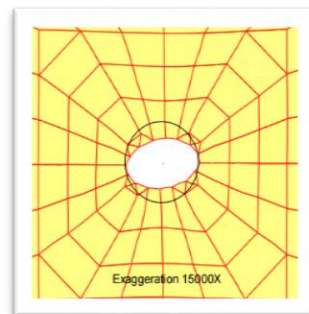


Figura 8. Modelación de la excavación de un túnel.

**2.1.2 Análisis de Líneas de Flujo.** Sigma/w puede estimar las variaciones de los esfuerzos debido al agua (poro presiones). Las líneas de flujo calculadas utilizando sigma/w pueden ser importadas a slope/w para el análisis de la estabilidad de taludes.

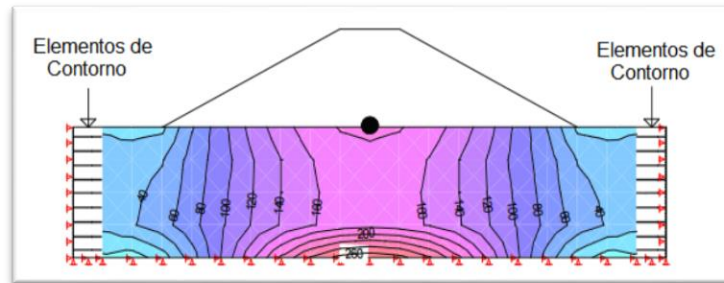


Figura 9. Líneas de flujo causadas por la construcción de un terraplén. Adaptado de Sigma W

**2.1.3 Análisis de Interacción de Suelo-Estructura:** Sigma/w puede simular problemas de interacción suelo-estructura mediante la inclusión de elementos estructurales en el análisis de deformación plana de dos dimensiones, estos elementos pueden ser vigas o barras. Estos elementos estructurales son particularmente útiles en el análisis de los casos tales como paredes de tablestaca. La figura 10 muestra la distribución de momentos asociados en la pared tablestaca.

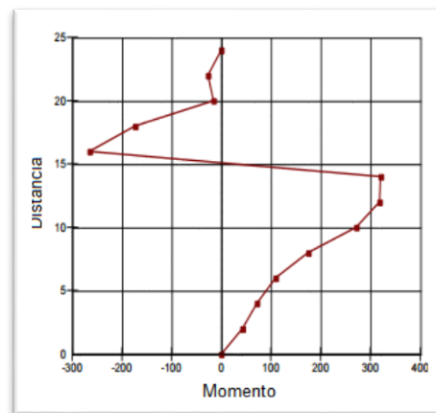


Figura 10. Diagrama de momentos en una Tabla-estaca. Adaptado de Sigma W

**2.1.4 Análisis de Consolidación.** Cuando el software sigma/w y seep/w se integran para ser ejecutados simultáneamente pueden realizar un análisis de consolidación completo, donde sigma/w calcula las deformaciones resultantes de los cambios de presión de agua intersticial, mientras que seep/w calcula los cambios transitorios de los poros de presión. Este procedimiento es utilizado para simular un proceso de consolidación y aplica en suelos finos saturados.

En algunos casos el aumento en la presión de poros puede llegar a ser mayor que la carga aplicada. Este fenómeno se conoce como el efecto Mendel-Cryer.

La figura 10 muestra el análisis de una muestra triaxial saturada con una carga lateral aplicada de 100 kPa. La presión inicial del agua de los poros antes de la carga es cero. La figura 6b muestra la variación de la poropresión o presión de poros con respecto al tiempo. En la figura 11 se puede observar que la presión del agua intersticial se eleva aproximadamente 110 kPa antes que disminuya gradualmente.

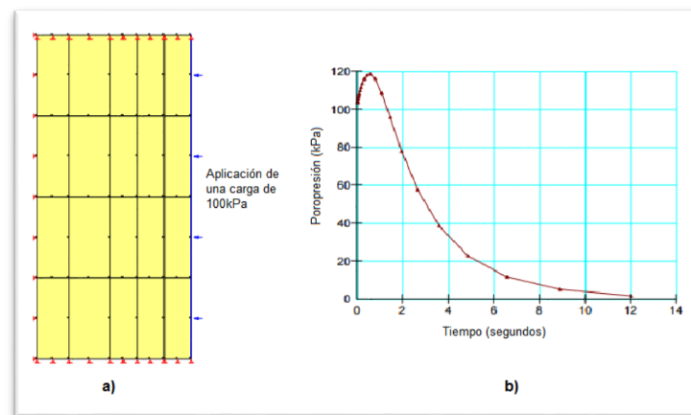


Figura 11. Simulación de una muestra triaxial con carga lateral aplicada y **10<sup>b</sup>** Grafica de la variación de la poropresión en el tiempo. Adaptado de Sigma W

## 2.2 Geometría y mallado

El análisis numérico de elementos finitos se basa en el concepto de subdivisión de un medio que describa el comportamiento o la acción de las piezas individuales y luego vuelven a conectar todas las piezas para representar un comportamiento continuo. El enmallado o discretización es un proceso que subdivide un modelo en piezas pequeñas, piezas que se conocen como elementos finitos.

En Geostudio la geometría de un modelo se debe definir primero antes de considerar la malla y en la actualidad existen algoritmos que crean una malla automática. Cada uno de estos objetos de geometría puede tener objetos adicionales asignados a ellos, tales como condiciones materiales o de contorno objetos. También pueden tener propiedades especiales, tales como malla de tipo de elemento, el tamaño y el orden de integración como se muestra en la figura 12. Consideremos cada uno de ellos:

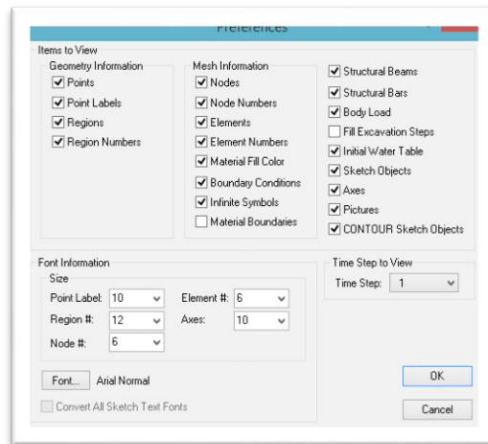
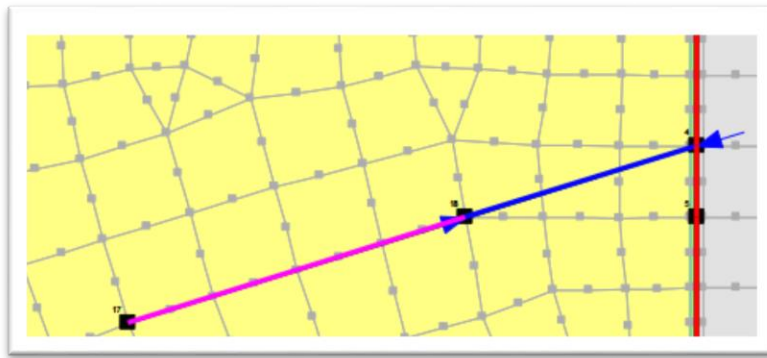


Figura 12. Pantallazo descripción de geometría y puntos asignados. Adaptado de Sigma W

**2.2.1. Líneas Libres.** Es un objeto de línea que no forma parte de una región, son muy útiles en el momento de asignar elementos estructurales a un modelo, que son parcialmente adheridos al suelo y parcialmente fuera del suelo la figura 13, muestra dos segmentos la primera línea representa una geometría libre (es decir solo tiene fuerza activa y la rigidez es sus puntos extremos coinciden con lugares no nodales) no interactúa con el suelo, excepto en sus puntos finales mientras que la segunda se incorpora en la malla (interacción suelo-estructura)



*Figura 13.* Líneas de anclaje (líneas se enlazan parcialmente). Adaptado de Sigma W

**2.2.2. Elementos de La Interfaz De Líneas.** El modelo del material describe las propiedades de fricción entre los suelos o en un suelo y una estructura. Existe un comando que permite crear un modelo de material y aplicarlo a una línea. En la figura 13 se indica como asignar propiedades preestablecidas a una línea o puede utilizar el comando “DRAW MESH PROPERTIES” para crear propiedades particulares entre el modelo y la geometría tal como se ilustra en la figura 14.

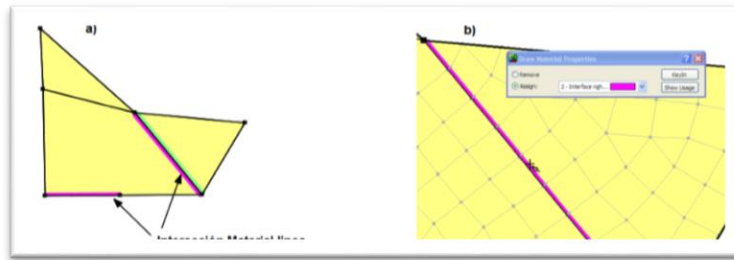


Figura 14. a) Interaccion de elementos con geometria; b. Comando para asignar la interaccion de la linea modelo. Adaptado de Sigma W

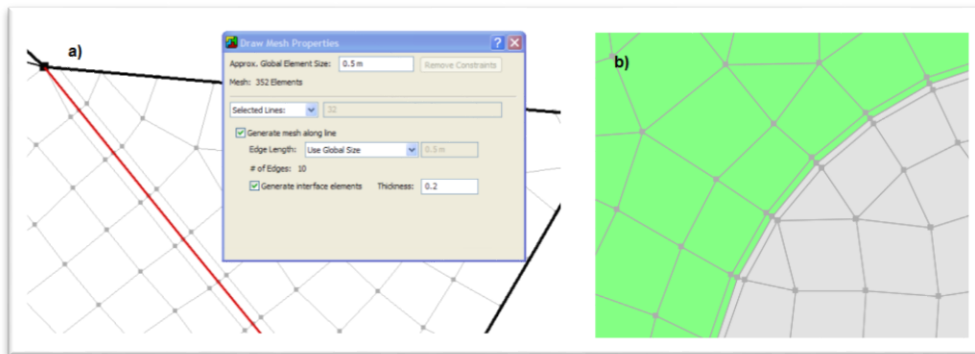


Figura 15. a) Condiciones para crear propiedades de mallado particulares; b. Creacion de interfaz para una region circular con centro definido. Adaptado de Sigma W

En Geostudio ahora el mallado es automatico sin embargo se puede especificar la densidad de la malla como una longitud real, como el numero de divisiones a lo largo de un borde de linea. Existen los siguientes tipos de opciones para crear una malla:

- Malla estructurada (Structured mesh)
- Malla estructurada en triangulos y cuadrados (Structured quad and triangles mesh)

- Malla triangular no estructurada (unstructured triangular mesh)
- Regiones de malla triangular (triangular grid regions)
- Cuadrícula rectangular de cuadrados (rectangular grid of quads).

### 2.3 Modelos Constitutivos

Sigma incluye 6 modelos constitutivos para asignar a diferentes tipos de suelo y tiene una opción para que el usuario cree su modelo constitutivo. Para cada uno de estos modelos el comportamiento será diferente dependiendo de si se está asignando el modelo a:

- Tensión total
- Tensión efectiva sin cambio de presión
- Tensión efectiva con cambio de presión

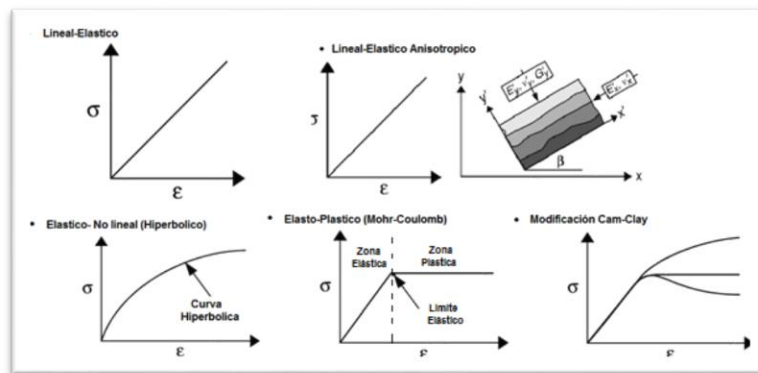


Figura 16. Curvas características de los modelos constitutivos en SIGMA / W. Adaptado de Sigma

W

**2.3.1. Modelo Lineal Elástico.** Las propiedades del suelo son lineal-elástica esto quiere decir que los esfuerzos son directamente proporcionales a las deformaciones del material, su principal característica consiste en cualquier carga aplicada sobre el material no generara deformaciones definitivas es decir el material vuelve a su estado natural las constantes de proporcionalidad son el módulo de Young E, el coeficiente de poisson y la tensión. Cuando  $\nu$ : 0,5 esto nunca debe pasar incluso  $\nu$  no debe ser mayor a 0.49, dado lo anterior Sigma limita el valor de  $\nu$  a 0.49.

Tabla 6.

*Propiedades requeridas por sigma para un modelo lineal elastico*

Propiedades lineales-elasticas requeridas por SIGMA/W
E modulo de elasticidad
$\nu$ modulo de poisson
C cohesion
$\phi$ angulo de friccion

**2.3.2. Modelo Elástico Anisotrópico.** Los depósitos naturales son a menudo estratificados e inclinados por lo tanto se desea contar con la posibilidad de tener diferentes valores de rigidez, módulo de Young dependiendo de la inclinación.

Tabla 7.

*Propiedades requeridas por sigma para un modelo elastico anisotropico.*

Propiedades elastico anisotropico requeridas por SIGMA/W
Ex modulo de elasticidad en el eje local x
Ey modulo de elasticidad en el eje local y
Vx modulo de poisson en el eje local x
Vy modulo de poisson en el eje local y
G modulo de cizallamiento o corte
B angulo de friccion en el eje global x

**2.3.3. Modelo Hiperbólica.** En este método el comportamiento tensión-deformación del suelo es no lineal a medida que se va acercando a las condiciones de ruptura, sigma/ w utiliza la formulación presentada por Duncan y Chang para calcular el módulo del suelo. En esta formulación la curva es hiperbólica y el módulo del suelo está en función de la tensión de confinamiento y del esfuerzo cortante que un material está experimentando. Los parámetros requeridos se pueden obtener fácilmente a partir de ensayos triaxiales o en la literatura; a continuación, los parámetros requeridos por Sigma/w:

Tabla 8.

*Propiedades requeridas por sigma para un modelo hiperbolico.*

Propiedades hiperbolico requeridas por SIGMA/W
Ei modulo tangencial inicial
Et modulo tangencial total
$\phi$ angulo de friccion

Tabla 8. *Continuación*

Propiedades hiperbolico requeridas por SIGMA/W
C cohesion
Rf relacion entre Ei y Et, este valor es por lo general entre 0.75 y 1.0
$\sigma_1$ esfuerzo principal máximo
$\sigma_3$ esfuerzo principal mínimo

**2.3.4. Modelo Elasto-Plastico.** Este modelo describe una curva tensión-deformación elasto-plástica perfecta, es decir, el material presenta dos comportamientos, uno elástico (las deformaciones son directamente proporcionales a los esfuerzos) y uno plástico es decir una vez que el material pase el límite de elasticidad jamás podrá volver a su estado inicial, en esta zona las deformaciones se representan por una función constante en el eje horizontal los parámetros requeridos por el software en este modelo constitutivo son:

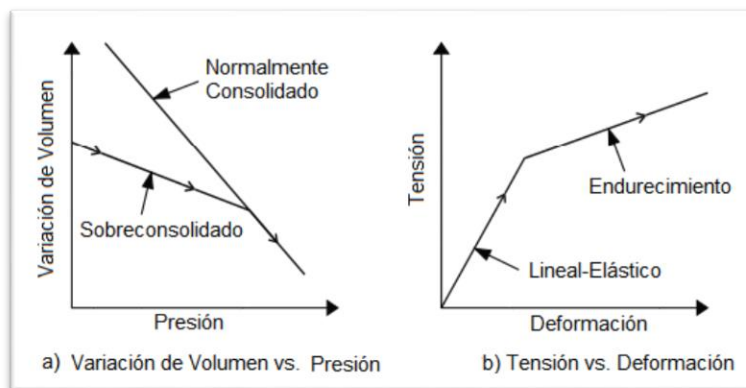
Tabla 9.

*Propiedades requeridas por sigma para un modelo elasto-plastico*

Propiedades elasto-plastico requeridas por SIGMA/W
Ei modulo elasticidad inicial
V modulo de poisson
$\phi$ angulo de friccion
C cohesion
$\Psi$ angulo de dilatancia, debe cumplir $0 < \Psi < \phi$ generalmente tiene el mismo valor del angulo de friccion interna

**2.3.5. Modelo Cam – Clay.** Es un modelo constitutivo elasto-plástico basado en la teoría de Atkinson – Bransby y Britto y Gunn; permite simular la relación que existe entre el índice de vacíos, la resistencia y la rigidez de los suelos cohesivos (limos y arcillas), aquí se calculan cuatro parámetros básicos:

- Deformación Elástica
- Combinación de tensiones que provocan deformaciones plásticas.
- Comportamiento de deformación plástica.
- Deformación plástica y su relación con el endurecimiento (la expansión o contracción de la superficie de fluencias).



*Figura 17.* Comportamiento de una muestra entre variación de volumen-presión y tensión-deformación.

La figura 17 establece una comparación entre la línea normalmente consolidada y la parte de endurecimiento de la relación tensión-deformación. La figura 16<sup>a</sup> muestra la línea normalmente consolidada; la figura 16b muestra la parte del endurecimiento de la relación tensión-deformación. El modelo cam-clay requiere las propiedades del suelo que se describen en la tabla 10.

Tabla 10.

*Propiedades requeridas por sigma para un modelo cam-clay*

<b>Propiedades CAM-CLAY requeridas por SIGMA/W</b>
$\gamma$ volumen específico en la línea de consolidación normal para un esfuerzo unitario $p=1\text{kpa}$ , o $\ln p^* = 0$
K pendiente de la línea de preconsolidación isotrópica (expansion)
$\lambda$ pendiente de la línea de consolidación normal isotrópica
V volumen específico

**2.3.6. Modelo Cam Clay Modificado.** Elimina la discontinuidad en la superficie de fluencia en el punto  $q=0$  que presenta el modelo cam-clay original. Como la ley de fluencia es asociada a cambios isotrópicos de tensiones, en ese punto causarían deformaciones distintas de cero. Además, el modelo cam-clay original puede predecir cambios de tensiones poco razonables para algunos tipos de incremento de deformación. El modelo cam-clay modificado supera estas dificultades adaptando una elipse.

**2.3.7. Modelo Personalizado.** Finalmente, si el usuario no está conforme con los modelos anteriormente establecidos por Geostudio tiene una opción para que el usuario cree su propio modelo constitutivo, con los principios de los elementos finitos.

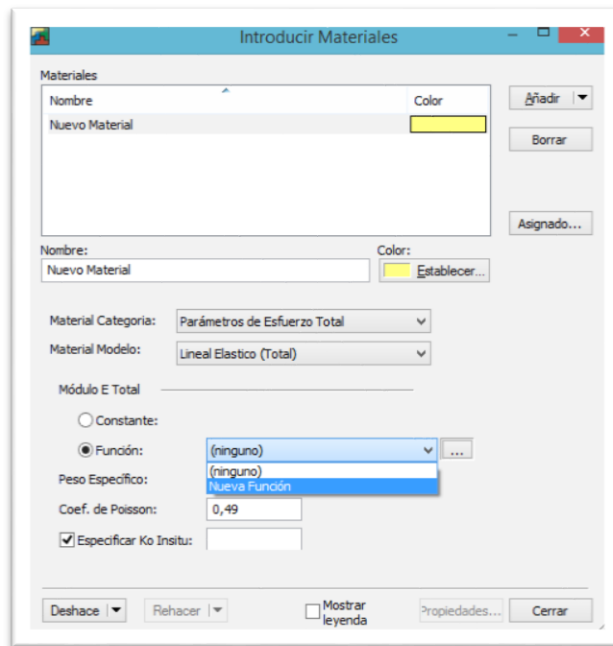


Figura 18. Opción para crear un nuevo modelo constitutivo en sigma/w. Adaptado de Sigma W

## 2.4 Condiciones de Contorno

Con las condiciones de contorno se definen las circunstancias que rodean el problema, ya sean las restricciones en cuanto a movimientos del suelo, esto depende básicamente de las necesidades del problema. Entre las condiciones de contorno se disponen de las siguientes opciones:

### 2.4.1. En cuanto a modelación de cargas

**2.4.1.1. Fuerza de desplazamientos:** Solo hay dos tipos de condiciones de contorno que se deben aplicar en un modelo esfuerzo-deformación es decir se debe definir algunas partes de la geometría y restringir el desplazamiento.

**2.4.1.2. Fuerza de volumen:** Sigma/w calcula el volumen del elemento, se multiplica el volumen de la carga unitaria especificada del material, y se aplica la carga total en los nodos de los elementos la unidad de peso del suelo se utiliza para simular las cargas del cuerpo de gravedad. Un ejemplo, para definir los tipos de contorno por modelación de cargas, es necesario seleccionar la opción indicada en la figura 19

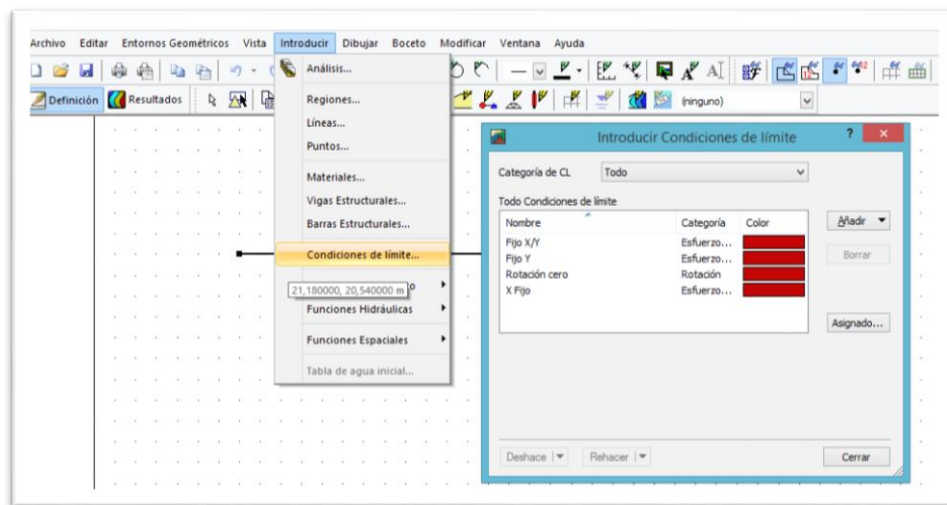


Figura 19. Como asignar condiciones de contorno en sigma/w. Adaptado de Sigma W

La primera opción de contorno (fijo x/y) impide los movimientos en el borde exterior del modelo; la segunda opción de contorno (fijo y) restringe el movimiento en la dirección vertical y admite movimiento en la dirección horizontal; la tercera opción rotación en cero impide la rotación con respecto al mismo punto y por último la cuarta opción de contorno restringe el movimiento en la dirección horizontal y permite el movimiento en la dirección vertical para asentamientos.

## 2.4.2. En cuanto a colocación de dominios

**2.4.2.1. Condiciones de contorno nodales:** se refiere a restricciones de movimientos puntuales o cargas puntuales, a continuación, se indican las distintas condiciones de contorno nodal disponibles:

Tabla 11.

*Indicación gráfica de la condición de contorno nodales.*

Tipo	Valor	Símbolo	
		Dirección x	Dirección y
Desplazamiento	Positivo		
Desplazamiento	Negativo		
Desplazamiento	cero		
Fuerza	Positiva		
Fuerza	Negativa		
Resorte	No aplica		

Para introducir nuevas condiciones de contorno nodales, se requiere mudar la especificación es decir de fuerza o desplazamiento a esfuerzo y se aplica la presión proyectada, en la dirección solicitada como se indica en la siguiente figura:

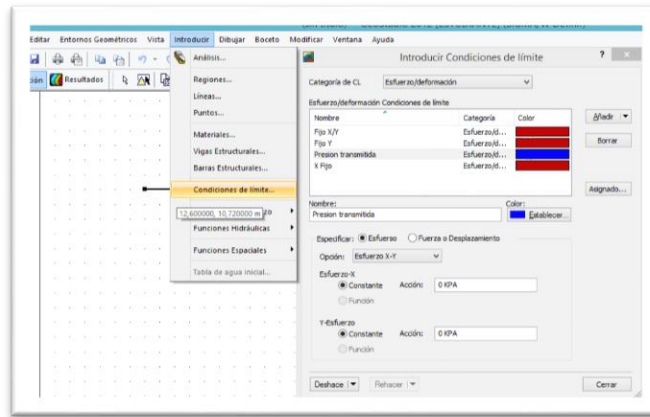


Figura 20. Como asignar condiciones de contorno nodales en sigma. Adaptado de Sigma W

**2.4.2.2. Condiciones de contorno de caras de dominio:** También conocidos como restricciones de movimiento o cargas sobre un contorno determinado. Una manera fácil de distinguir entre positivo y negativo tensión normal es recordar que el esfuerzo de compresión es positivo. Para tensiones tangenciales yendo alrededor del elemento en el sentido contrario de las agujas del reloj es positivo.

Tabla 12.

*Indicaciones graficas de las condiciones de contorno de caras de dominio*

Tipo	Valor	Símbolo
		Dirección x
Esfuerzo Normal	Positivo	
Esfuerzo Normal	Negativo	
Esfuerzo Tangencial	Positivo	
Esfuerzo Tangencial	Negativo	

Esta condición de contorno representa los esfuerzos que genera una estructura, es decir deben ser aplicados en una región, no pueden ser asignados en un nodo específico.

## 2.5 Tipos de análisis

Los tipos de análisis que se definen dentro de un proyecto dependerán del objetivo de un proyecto de la modelación. Sigma/w establece los siguientes tipos de análisis:

**2.5.1. Análisis Transversal.** El software tiene la capacidad para el análisis de dos dimensiones y simetría axial. Una vista en dos dimensiones analiza una sección transversal vertical con un espesor, el cual se puede especificar cuándo se define la geometría región.

**2.5.2. Tensiones iniciales in situ.** Formulada específicamente para el establecimiento de las tensiones iniciales. La mayoría de los problemas requieren tensiones antes de proceder con un análisis de carga-deformación o de tensión deformación o de cualquier tipo de filtración (por ejemplo, la simulación de un problema en la construcción por etapas). Las tensiones iniciales son solo el resultado de la gravedad y representan el estado de equilibrio del suelo no alterado (o roca). Las tensiones iniciales se deben establecer si se utilizan los modelos constitutivos de Mohr Coulomb, Cam-Clay modificado e hiperbólica.

**2.5.3. Especificación de las condiciones iniciales.** Permite agregar incrementos de tensiones y desplazamientos (deformaciones) a las iniciales, si el usuario lo especifica al inicio del modelo las opciones de las condiciones iniciales son:

**2.5.3.1. Condición total de tensión:** Permite la opción de excluir la deformación y valores acumulados a partir del análisis anterior, sin embargo, las condiciones iniciales que provienen de un análisis del tipo insitu se excluyen automáticamente.

**2.5.3.2 Presiones del agua intersticial:** Conformado por la existencia de nivel freático.

**2.5.4 Análisis de carga-deformación.** Se utiliza cada vez que desee aplicar cargas y encontrar la variación de esfuerzos y deformaciones, incluyendo la simulación de procedimientos de colocación de relleno y construcción de excavación. En el caso de un análisis de la colocación del relleno, se añade el peso del relleno a su modelo en la primera fase de carga que se activa cada capa de relleno. En el caso de un análisis de excavación sigma/w calcula las fuerzas resultantes asociados a la eliminación de los elementos excavados y aplica estas fuerzas como valores negativos en los nodos a lo largo de la cara de la excavación. En el caso de un análisis de colocación de relleno se añade el peso del relleno a su modelo en la primera fase de carga que se activa cada capa de relleno.

**2.5.5 Análisis de deformación dinámica.** Es la posibilidad de enlazar sigma/w con los resultados de salida de otro programa de Geoslope (como por ejemplo un análisis de Quake/w dinámica) en la que requiere calcular las deformaciones debidas a las fuerzas nodales, a partir de un análisis de incremento de tensiones en el elemento. Esto es fundamental para un comportamiento elasto-plástico ya que los esfuerzos dinámicos se redistribuyen para cada caso de tiempo. Sigma/w calcula un vector de incremento de carga en base a la diferencia de la tensión entre dos pasos de tiempo.

**2.5.6 Análisis de múltiples etapas.** Es la capacidad de llevar un análisis mudando las condiciones iniciales. Fundamentalmente estos análisis permiten especificar diferentes propiedades del material y diferentes condiciones de contorno a través del tiempo y del espacio. Esto significa que se puede modelar secuencias de construcción que dependen o no del tiempo y de las condiciones de contorno del modelo, es decir puede ser un análisis de estado estacionario independiente dentro de un único archivo del modelo o puede ser un análisis de secuencia del tiempo vinculado donde los resultados de una nueva etapa dependen de la solución de una etapa anterior.

**2.5.7 Análisis de poropresión.**  $\sigma/w$  esta formulado para resolver los problemas de poro presión y de variación de volumen de un suelo, usando simultáneamente un análisis de esfuerzo-deformación (acoplado o no acoplado) y ecuaciones de disipación de infiltración (Teoría de Darcy). Básicamente se crea tres ecuaciones para cada nodo de la malla de elementos finitos, dos son las ecuaciones de equilibrio (desplazamiento) y la tercera es una ecuación de continuidad (flujo). Resolver estas tres ecuaciones en conjunto resuelve tanto el desplazamiento como los cambios de poro presión. En un análisis acoplado se requiere definir las condiciones de contorno para el desplazamiento y las ecuaciones hidráulicas.

## 2.6 Asignación de materiales

Los parámetros de entrada para la asignación de materiales, dependen directamente del modelo constitutivo seleccionado.

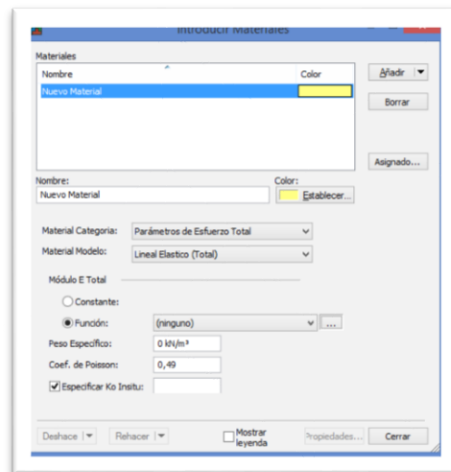
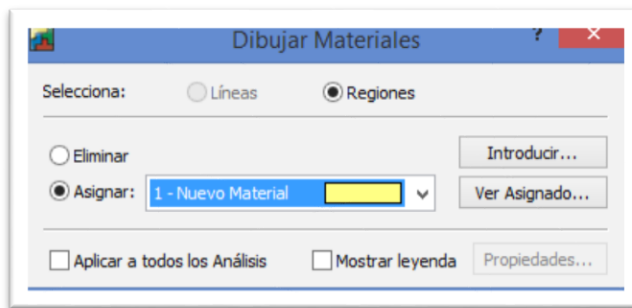
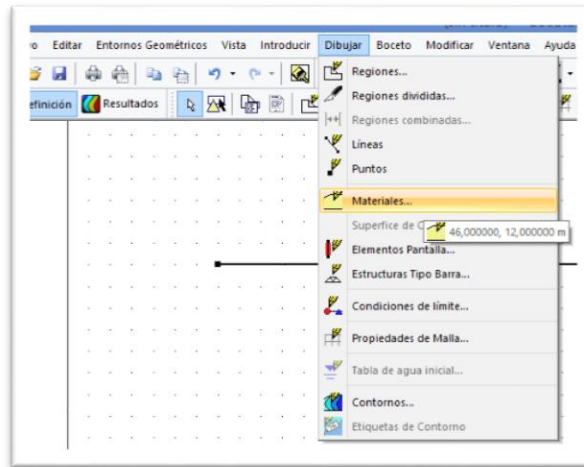


Figura 21. Parámetros requeridos para la asignación de material, en un suelo con comportamiento lineal-elástico. Adaptado de: Sigma W

Si los parámetros predeterminados por sigma no son suficientes y el usuario desea suministrar más información el programa, se puede modificar estos parámetros por medio de funciones como se muestra en la figura anterior. Un ejemplo es la función de la conductividad hidráulica de los suelos que se basa en una función de contenido de agua. Varios modelos de materiales en Geostudio requieren de funciones que pueden ser estimados si aún no dispone de un conjunto completo de datos. Las funciones que el programa ofrece son:

**2.6.1 Funciones curvas (spline).** Es una interpolación que se usa para llenar vacíos a partir de puntos adyacentes con segmentos o líneas curvas. Desafortunadamente todos los puntos de datos no siempre encajan muy bien a lo largo de una trayectoria con una curvatura predecible tal como logarítmica o exponencial.

**2.6.2 Funciones lineales (linear).** Utiliza el mismo principio de la función anterior, con ajuste de curvatura hasta el 0% como se muestra en la figura 22.

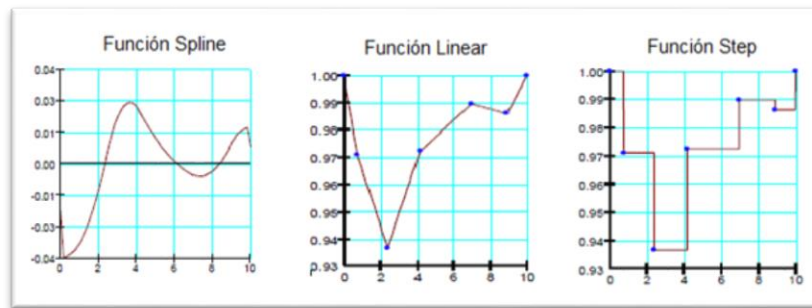


Figura 22. Comparación de las diversas funciones para asignación de materiales. Adaptado de: Sigma W

**2.6.3 Complemento de funciones (add-in).** Finalmente, si las anteriores funciones no cumplen las expectativas del usuario, Geostudio tiene la opción de pasar por alto las funciones predeterminadas y crear su propia función.

## 2.7 Elementos estructurales

Los elementos estructurales se pueden utilizar solo en un análisis de carga-deformación. En sigma existen dos tipos de elementos estructurales:

**2.7.1 Elemento tipo barra.** Un elemento tipo barra es capaz de resistir únicamente fuerzas axiales, la flexión es considerada nula. Por lo tanto, los nodos de estos elementos no requieren el grado de libertad de rotación y no necesita ser concurrente con un borde de elemento de suelo, se puede conectar entre elemento tipo barra y solo tienen conectividad en los puntos de región. Adicionalmente se pueden activar diferentes fases de modelado. Las fuerzas de tensión y compresión en un elemento tipo barra se introducen con un valor negativo y positivo respectivamente. En la figura 20 se muestra un elemento tipo barra.

**2.7.2 Elemento tipo viga.** El elemento tipo viga se formula utilizando la teoría de la viga convencional la cual resiste a flexión y fuerza axial. Cada nodo asociado con un elemento de viga debe tener un grado de libertad de rotación, además de los dos grados de libertad de desplazamiento. Este elemento de viga requiere el valor de la pendiente, así como el desplazamiento lateral del elemento. En la figura 23 se muestra el elemento tipo viga.



Figura 23. Muestra grafica de los elementos tipo barra y tipo viga. Adaptado de: Sigma W

## 2.8 Secuencia de construcción por etapas

Sigma/w permite modelar por etapas, con el fin de simular secuencias de construcción. Esto implica la adición y/o eliminación de elementos de malla o activación y desactivación de regiones. En el proceso de ejecución, el software permite realizar una serie de análisis concatenando por medio de una secuencia en el tiempo. La hora de inicio de un análisis es la hora de finalización del análisis anterior. El proceso de excavación consiste en la desactivación de regiones, mediante la eliminación del material de la región requerida, tal como lo indica en la figura 24:

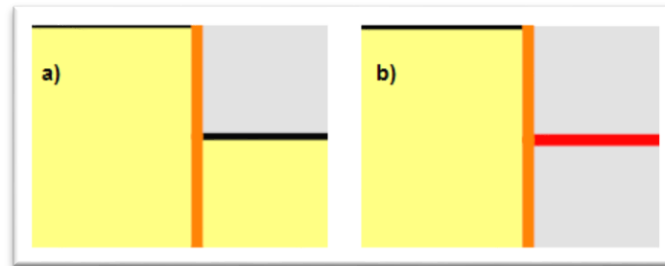


Figura 24. a) Primera etapa de excavación y activación de tablestacas, b) Segunda etapa de excavación y activación de abrazadera superior. Adaptado de: Sigma W

Los elementos estructurales también pueden ser analizados o eliminados en cualquier análisis. Un ejemplo de ello es la primera etapa de la excavación, reemplazada por una pared de tablestacas y el diagrama de la derecha muestra la segunda etapa y la activación de la abrazadera superior.

## 2.9 Visualización de resultados

Una característica atractiva de sigma/w son las formas variadas y flexibles en que los resultados se pueden ver, evaluar y visualizar. Esto es importante para cualquier análisis de elementos finitos debido a la gran cantidad de datos usados. Gran parte de los datos solo pueden ser interpretados a través de la visualización gráfica utilizando contornos y gráficos, a partir de una malla deformada, este último considerando que sea una fase de carga inmediata.

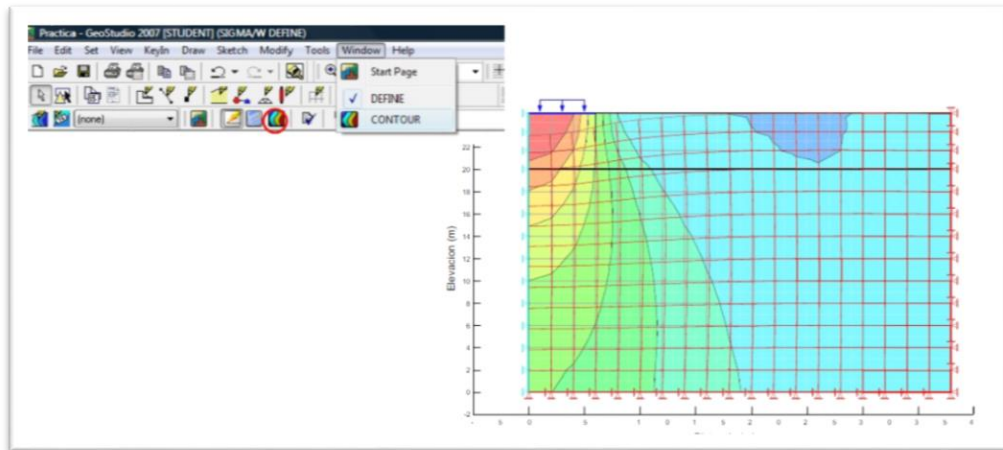


Figura 25. Resultados de una carga aplicada. Adaptado de: Sigma W

Cuando se trata de un análisis por etapa es decir incrementos de carga respecto al tiempo, esta opción presenta el incremento de carga final. Existen diferentes formas de visualizar los resultados de deformaciones, presiones, esfuerzos etc. En sigma/w las opciones presentes son:

- Curvas de nivel
- Etiquetas de contorno
- Isolíneas
- Vectores
- Círculos de Mohr
- Gráficos

**2.9.1 Modificaciones de contorno.** Una vez realizados los cálculos es posible modificar y obtener la visualización de los resultados deseados. La figura 23 ilustra varias opciones de software con los que podremos manipular la presentación de contornos.

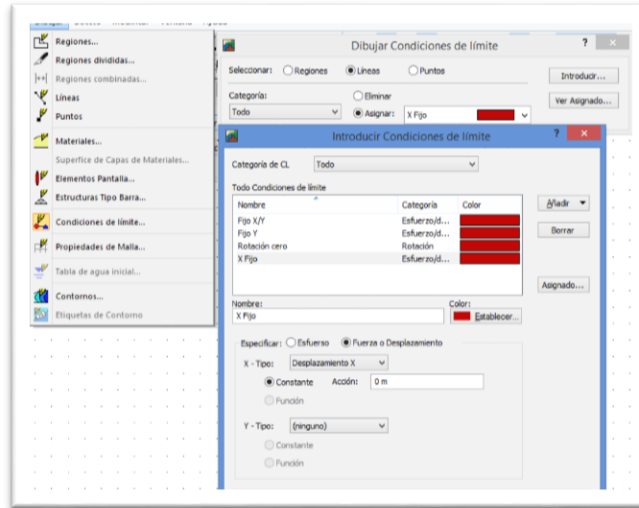


Figura 26. Muestra grafica de como modificar un contorno en sigma/w. Adaptado de: Sigma W

La opción categoría indica el tipo de resultados requeridos, ya sea deformaciones, esfuerzos totales, esfuerzos efectivos, porpresiones entre otros. Al referirse a parámetros se especifica el tipo de resultado, es decir, al elegir deformaciones podría indicarse en qué dirección se necesita en el eje x o y.

**2.9.2 Etiquetas de contorno.** Una vez obtenidos los campos de valores, sigma/w permite colocar etiquetas que nos indiquen sus valores asociados, una vez seleccionada esta opción, el cursor se transforma en una cruz y al pinchar cada contorno (en este caso asentamientos) se obtiene su respectiva etiqueta, tal como se describe en la figura 24.

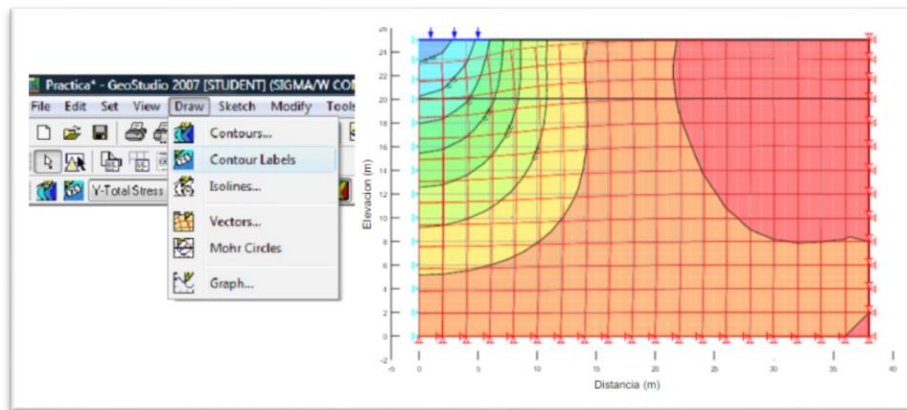


Figura 27. Como asignar etiqueta a los contornos. Adaptado de: Sigma W

**2.9.3 Circulo de Mohr.** Para la obtención de los círculos de Mohr, indicando los esfuerzos bidimensionales de cualquier punto del terreno, se realiza el mismo procedimiento anterior, es decir selecciona la opción y el cursor se convierte en una cruz y pulsa en la parte del terreno que se desea conocer los datos de la siguiente manera:

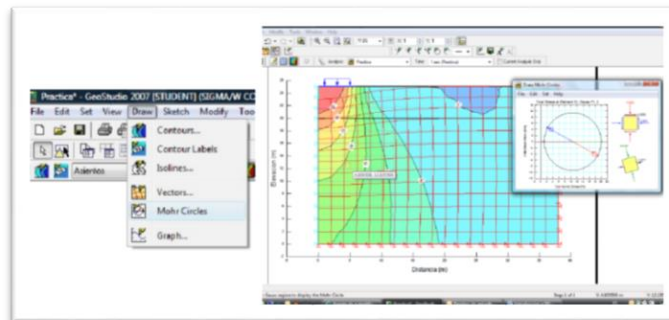
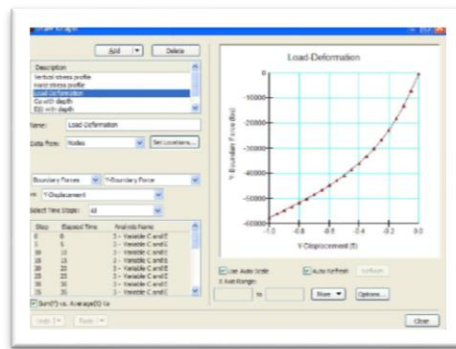


Figura 28. Circulo de Mohr. Adaptado de: Sigma W

**2.9.4 Gráficos.** En esta versión (sigma/w 2007) existe la posibilidad de representar gráficamente la suma de todas las variables dependientes del nodo seleccionado es decir considerando una gráfica de carga-deformación en la base de una zapata, ya no es necesario extraer los datos de fuerza y desplazamiento para cada nodo base de la zapata y luego tabularlos en Excel para sumar las fuerzas y promediar el desplazamiento.

Esto se puede hacer automáticamente ahora como se muestra en la figura 26, en la que todos los nodos por debajo de la zapata se seleccionan y se grafica la suma de las fuerzas contra el desplazamiento promedio.



*Figura 29.* Visualización de resultados por la opción de gráfico: Carga-deformación en base de una zapata.

El programa permite analizar los resultados por medio de gráficos de diversas maneras como lo son:

- Gráficos de deformación y/o desplazamientos en cualquier punto de la función.
- Gráficos de tensión total y efectiva, la tensión y la presión de agua de poros.

- Gráfico de tensión en cualquier nodo o elemento de punto de Gauss como un círculo de Mohr con los diagramas espacio-fuerza asociadas.
- Líneas de falla probables en cualquier punto de la fundación.
- Distribución de esfuerzos a lo largo de los elementos estructurales.

## 2.10 Modelamiento de casos en SIGMA W

Como se ha mencionado con anterioridad, la modelación de las obras geotécnicas por los métodos de los elementos finitos se ha hecho posible por un grupo de hipótesis basadas en la geometría de las obras, de su entorno, los materiales y su comportamiento, las cargas, las condiciones límites y las condiciones iniciales. Estas hipótesis, muchas veces simplificadas (pero que deben respetar los fenómenos mecánicos esenciales) deben acoplarse a las condiciones reales de campo, las cuales quedan bajo la responsabilidad del ingeniero encargado del estudio. Por otra parte, los resultados obtenidos a través de la modelación demuestran la posibilidad de la utilización de los métodos numéricos para la modelación de las cimentaciones superficiales y profundas abordadas en el trabajo.

### 2.10.1. Ejercicios

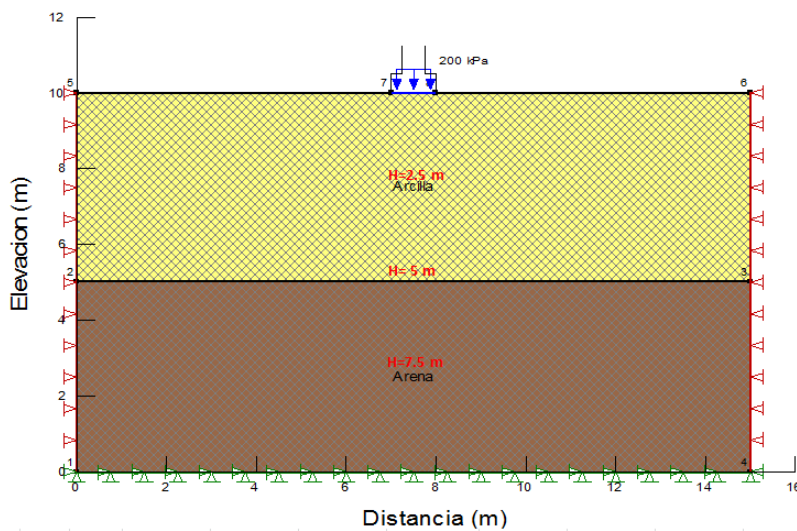
#### *2.10.1.1 Análisis teórico y análisis por medio de sigma/w de una cimentación superficial.*

Calcular el asentamiento de una zapata apoyada sobre un sistema formado por dos tipos de suelos de distinto comportamiento deformacional; mediante el programa sigma/w, los parámetros del análisis son relacionados a continuación:

Tabla 13.

*Parámetros del terreno de un análisis de cimentación superficial*

Parámetros del terreno.			
Deformación	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E(kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$
Arcilla	17	7000	0.42
Arena	18	13000	0.38



*Figura 30. Condiciones graficas de una zapata superficial. Adaptado de: Sigma W*

#### - Análisis teórico

Aumento de Tensiones:  $\Delta\sigma = 200 \text{ kN/m}^2$

Base:  $B = 1 \text{ m}$

Longitud:  $L = 2 \text{ m}$

### Cálculo de Asentamientos

Para el cálculo de los asentamientos utilizamos la siguiente Ecuación:

$$S_i = 4q * B' * \frac{1 - \mu^2}{E_s} * I_s * I_f$$

Donde, (q) es la presión neta aplicada a la fundación, (B') ancho del cimiento dividido entre 2, ( $\mu$ ) relación de Poisson, (Es) Módulo de elasticidad del suelo, (Is) factor de influencia (Steinbrenner, 1934) y (If) factor de forma Fox, 1948.

Para calcular los factores A0, A1 y A2 utilizamos las siguientes ecuaciones:

$$A_0 = m * \text{Ln} \frac{1 + \sqrt{m^2 + 1} * \sqrt{m^2 + n^2}}{m * 1 + \sqrt{m^2 + n^2 + 1}}$$

$$A_1 = \text{Ln} \frac{m + (m^2 + 1)(n^2 + 1)}{m + (m^2 + n^2 + 1)}$$

$$A_2 = \frac{m}{n(m^2 + n^2 + 1)}$$

Para el cálculo de los parámetros F1 y F2 utilizamos las siguientes Ecuaciones:

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

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

Para el cálculo del factor de influencia se hace uso de las ecuaciones:

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

Solución Teórica:

$\alpha = 4$  Para el centro de la fundación.

$$m = \frac{L}{B} = \frac{2}{1} = 2$$

$$n = \frac{H}{B/2} = \frac{2.5}{1/2} = 4 \text{ Este es el valor para } H= 2.5 \text{ m}$$

Después de realizar los cálculos correspondientes en las ecuaciones anteriores se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 14.

*Resultados del análisis de una cimentación superficial*

Cuadro de resultados			
Para	H= 2.5 m	H= 5 m	H= 7.5 m
$\alpha =$	4	4	4
$m =$	2	2	2
$n =$	5	10	15
$A_0 =$	0,5931	0,7666	0,8304

Tabla 14. *Continuación*

Cuadro de resultados			
A <sub>1</sub> =	1,0608	1,2459	1,311
A <sub>2</sub> =	0,073	0,0195	0,0088
F <sub>1</sub> =	0,5265	0,6406	0,6816
F <sub>2</sub> =	0,058	0,0311	0,021
I <sub>s</sub> =	0,5425	0,6492	0,6874
S <sub>i(m)</sub> =	<b>0,0511</b>	<b>0,0306</b>	<b>0,0162</b>

- **Análisis mediante SIGMA/W**

Para hacer un análisis en el software es primordial definir la geometría de la zapata superficial, a continuación, en la tabla 15 se muestran las coordenadas de los puntos de contorno de la zapata.

Tabla 15.

*Coordenadas puntos de contorno de una zapata*

Coordenadas puntos de contorno.		
Punto número	x(m)	y(m)
1	0	0
2	0	5
3	15	5
4	15	0
5	0	10
6	15	10
7	7	10
8	8	10

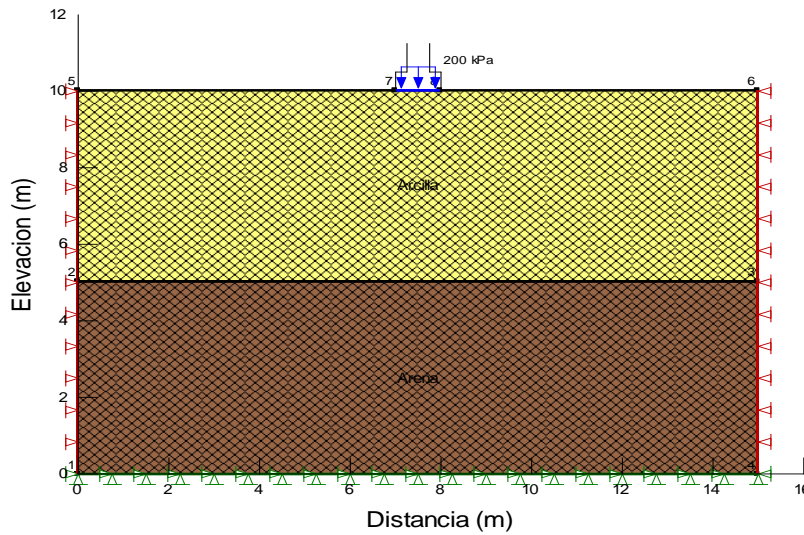


Figura 31. Condiciones graficas de una zapata analizada en sigma/w. Adaptado de: Sigma W

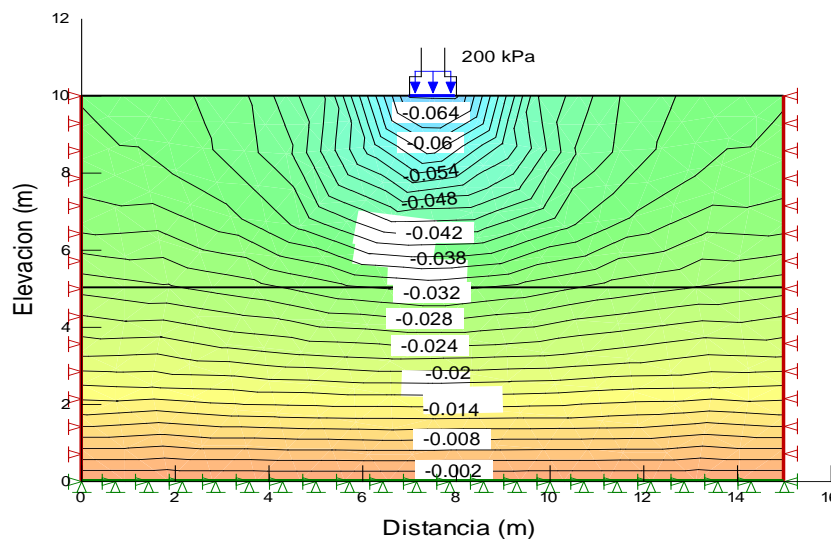


Figura 32. Desplazamientos en Y de una zapata analizada en sigma/w. Adaptado de: Sigma W

**2.10.1.2. Análisis teórico y análisis por medio de SIGMA/W de un terraplén.** Calcular los asentamientos generados por el terraplén mostrado a continuación:

Tabla 16.

*Parámetros del análisis de un terraplén*

Parámetros del terreno.			
Deformación	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	$E(\text{kN/m}^2)$	$\nu$
Suelo N° 1	16	7000	0.4
Suelo N° 2	18	16000	0.35
Relleno	19	15000	0.32

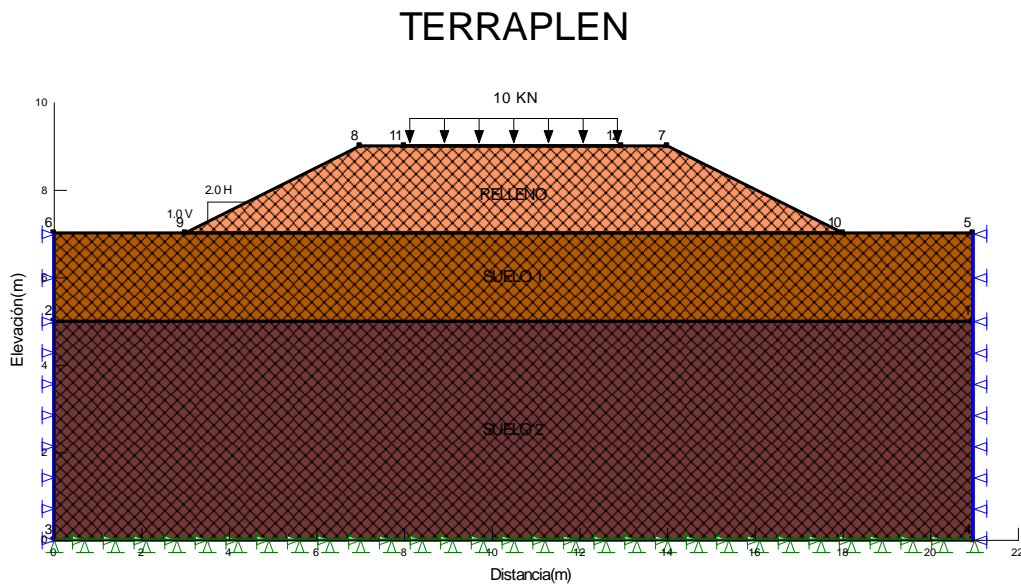


Figura 33. Condiciones graficas del terraplén a analizar. Adaptado de: Sigma W

- **Análisis teórico**

$$s_e = q_0(\alpha B') \frac{1-\mu_s^2}{E_s} I_s I_f$$

$q_0$  = Presión neta aplicada sobre la cimentación

$\mu_s$  = Relación de Poisson del suelo

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

$$z = 4B$$

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

$= B$  Para una esquina de la cimentación

### Para el incremento en la mitad del relleno

Para el cálculo de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  utilizamos las siguientes ecuaciones:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left( \frac{B_1 + B_2}{z} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{B_1}{z} \right)$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1} \left( \frac{B_1}{z} \right)$$

Para hallar  $\Delta\sigma_z$  utilizamos la ecuación:

$$\Delta\sigma_z = q \frac{1}{\pi} \left[ \left( \frac{B_1 + B_2}{B_2} \right) (\alpha_1 + \alpha_2) - \frac{B_1}{B_2} (\alpha_2) \right]$$

Calculo carga vertical:

$$\Delta_q = \Delta\sigma_z / q$$

Para hallar el valor de  $\Delta\sigma_z/q$  ingresamos a la tabla 9.4 del libro fundamentos de ingeniería geotécnica con valores de  $2z/B$  y  $2x/B$ .

Para hallar los valores de  $I_s$  se ingresa a la Figura con valores de  $n = H/B$  y  $m = L/B$ .

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	0.03162	0.06202	0.09019	0.11544	0.13745	0.15622	0.17196	0.18502	0.19576	0.20457	0.21769	0.22654
∞	0.03162	0.06202	0.09019	0.11544	0.13745	0.15623	0.17197	0.18502	0.19577	0.20458	0.21770	0.22656

Figura 34. Variación del valor de influencia I.

<i>m</i>	<i>n</i>										
	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	0.15326	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

Figura 35. Continuación variación del valor de influencia I.

Calculo de Asentamientos:

$$S_i = qB' * \frac{1 - \mu^2}{E_s} * I_s * I_f$$

Tabla 17.

*Cuadro de resultados análisis teórico de un terraplén*

Incremento en la mitad del relleno (B1=3.5 m y B2=4 m)									
Punto	Coordenada		$\alpha$ (radianes)	$\Delta\sigma_z$ (kPa)	Carga Vertical	Total ( $\Delta\sigma$ )	Ancho (B)	Is (Tablas)	Asentamiento (m)
A1	Y=6	X=10.5	$\alpha_1= 0,145748$ $\alpha_2= 1,292497$	37,879	7,55	45,429	15	0,05	0,002044305
A2	Y=5	X=10.5	$\alpha_1= 0,258544$ $\alpha_2= 1,05165$	37,16838	6,42	43,588	15	0,09	0,001613607
A3	Y=2.5	X=10.5	$\alpha_1= 0,369334$ $\alpha_2= 0,661043$	32,74432	4,47	37,214	15	0,03	0,000459215

- **Análisis mediante SIGMA/W**

Inicialmente definimos los puntos de contorno que definen la geometría del terraplén en sigma/w:

Tabla 18.

*Coordenadas puntos de contorno de un terraplén*

Coordenadas puntos de contorno.		
Punto número	x(m)	y(m)
1	21	5
2	0	5
3	0	0
4	21	0
5	21	7

Tabla 18. Continuación

Coordenadas puntos de contorno.		
Punto número	x(m)	y(m)
6	0	7
7	14	9
8	7	9
9	3	7
10	18	7
11	8	9
12	13	9

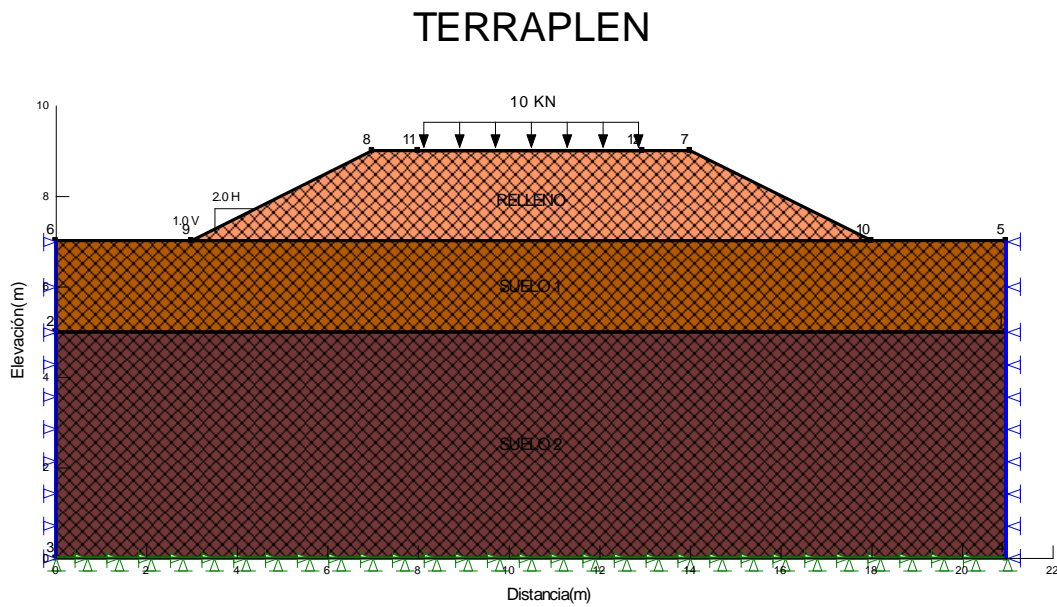


Figura 36. Condiciones graficas de terraplén analizado en sigma/w. Adaptado de: Sigma W

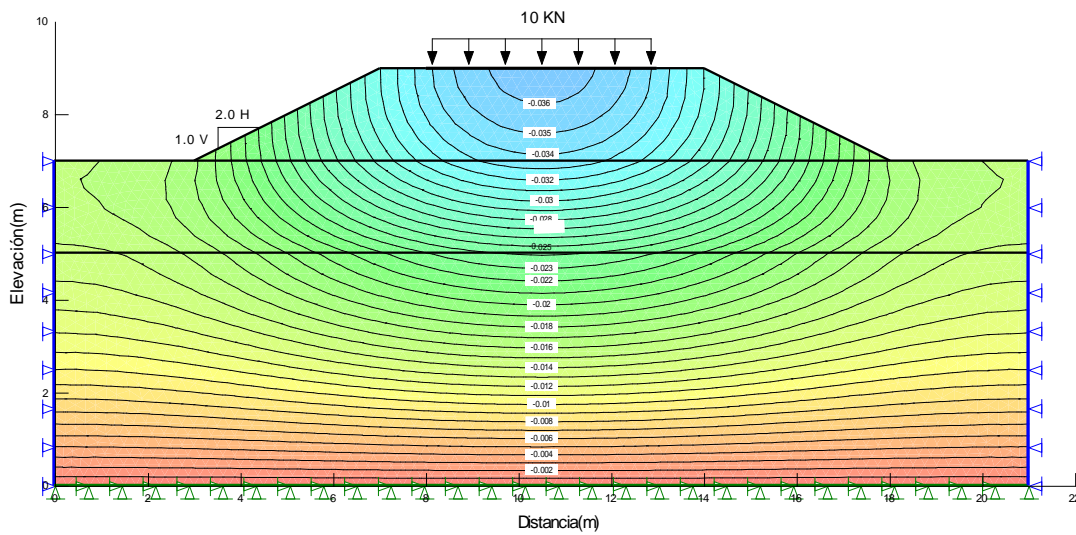


Figura 37. Desplazamiento total en Y de un terraplén analizado en sigma/w. Adaptado de: Sigma W

### 3. Conclusiones

- Cuando se realiza el proceso de diseño se destaca el uso del software SIGMA/W ya que este nos permite realizar cambios en las secciones de las cimentaciones y en las resistencias de los mismos en un tiempo mínimo, con el fin de obtener un diseño final que cumpla con la normativa exigida, que soporte las cargas a las que será sometida y que nos lleve a realizar un diseño ideal y que mejor se nos ajuste al presupuesto de obra.

- A través del manejo del programa se pudo analizar el comportamiento de cimentaciones superficiales cuando son sometidas a diferentes tipos de carga.

- Después de realizar el cálculo del desplazamiento en la dirección y, por el método teórico y usando el software sigma/w se observa una diferencia en los resultados aproximadamente de un 6%; diferencia que puede ser dada por la falta de precisión de los cálculos realizados a mano a diferencia del programa, el cual realiza cálculos con un mayor número de decimales.

**Bibliografía**

- Blazquez, L. B. (2010). Rúa. Obtenido de <https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/25641/21/Tema%2021%20-%20Elementos%20de%20contenci%C3%B3n.pdf>
- Das, B. M. (2001). diegovc. Obtenido de [http://diegovc.ublog.cl/archivos/13166/braja\\_das\\_principios\\_de\\_ingenieria\\_de\\_cimentaciones.pdf](http://diegovc.ublog.cl/archivos/13166/braja_das_principios_de_ingenieria_de_cimentaciones.pdf)
- Engineers, U. A. (2012). U.S Army. Obtenido de <https://www.usa.gov/federal-agencies/u-s-army-corps-of-engineers>
- Hooke, L. d. (2010). Fisicalab. Obtenido de <https://www.fisicalab.com/apartado/ley-hooke#contenidos>
- Inti. (2009). Inti.gob. Obtenido de [https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/13- Seccion\\_12\\_2004.pdf](https://www.inti.gob.ar/cirsoc/pdf/publicom/13- Seccion_12_2004.pdf)
- NSR 10. (1997). IDR.D. Obtenido de <https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/9titulo-i-nsr-100.pdf>
- R, D. (2000). publicaciones eafit. Obtenido de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/viewFile/162/161>
- Schmertmann, & Hartman. (1978). Unicauca. Obtenido de <https://www.google.com.co/search?q=cuadro+del+U.S+Army+Corps+of+Engineers%2C+cuyo+objetivo+es+mostrar+las+diferentes+causas+de+asentamientos+de+cimentaci%C3%B3n>

&oq=cuadro+del+U.S+Army+Corps+of+Engineers%2C+cuyo+objetivo+es+mostrar+las+dif  
erentes+causas+deSigma W. (s.f.)

## Apéndices

### Apéndice A. Análisis por medio de $\sigma/w$ del desplazamiento de una excavación sencilla

Calcular la expansión inmediata por excavación, de la excavación de un edificio que tiene las siguientes características:

Tabla 19.

*Parámetros del terreno para el análisis de una excavación.*

Parámetros del terreno.			
Deformación	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	E(kN/m <sup>2</sup> )	$\nu$
Suelo N° 1	18	10000	0.35
Suelo N° 2	19	20000	0.30

Los puntos que definen el contorno exterior del problema son:

Tabla 20.

*Coordenadas de los puntos de contorno de una excavación.*

Coordenadas puntos de contorno.		
Punto número	x(m)	y(m)
1	0	0
2	36	0
3	36	17
4	24	17

Coordenadas puntos de contorno.		
Punto número	x(m)	y(m)
5	24	14
6	12	14
7	12	17
8	0	17
9	0	22
10	12	22
11	24	22
12	36	22
13	9	22
14	27	22
15	23.407	179.118
16	81.363	194.647
17	278.637	194.647
18	336.593	179.118
19	278.637	164.647
20	81.363	164.647
21	23.407	149.118
22	23.407	119.118
23	81.363	134.647
24	278.637	134.647
25	336.593	119.118
26	336.593	149.118
27	12	20.5
28	12	17.5

Coordenadas puntos de contorno.		
Punto número	x(m)	y(m)
29	12	14.5
30	24	20.5
31	24	17.5
32	24	14.5

Las siguientes graficas muestran el comportamiento del suelo al someterlo a las diferentes etapas constructivas, según la simulacion analizada en el programa:

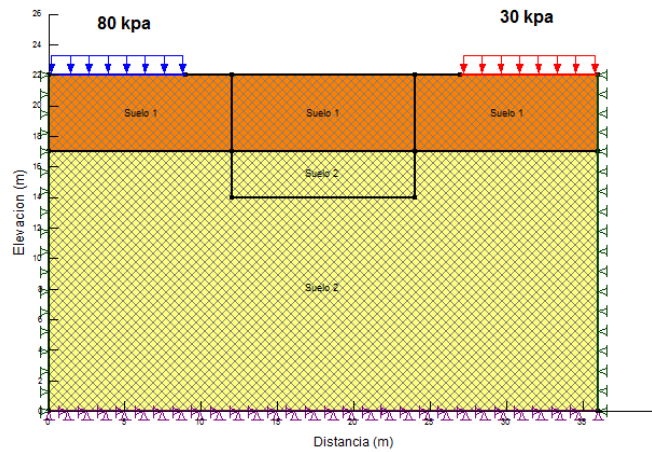


Figura 38. Condiciones graficas de una excavacion para analizar en sigma/w. Adaptado de Sigma

W

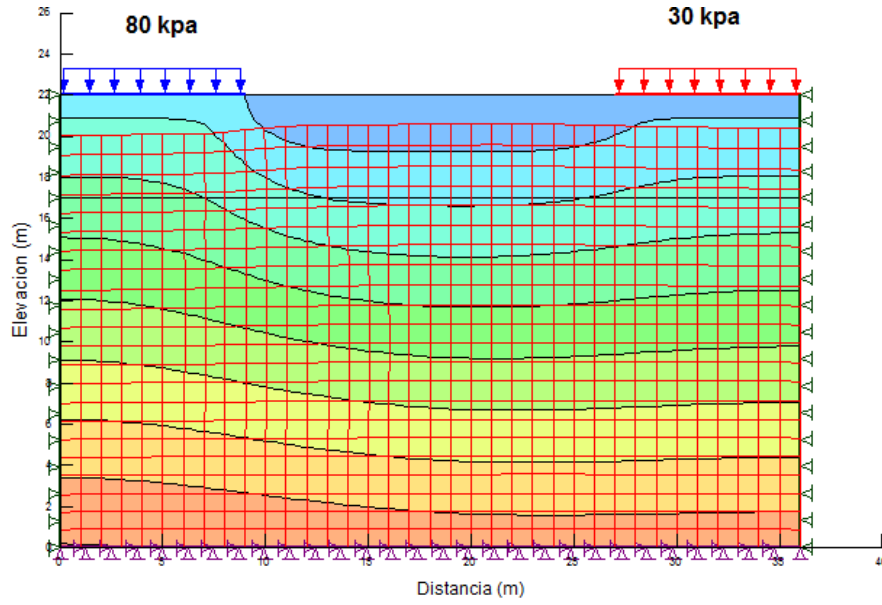


Figura 39. Condiciones graficas de una excavacion para analizar en sigma/w. Adaptado de Sigma

w

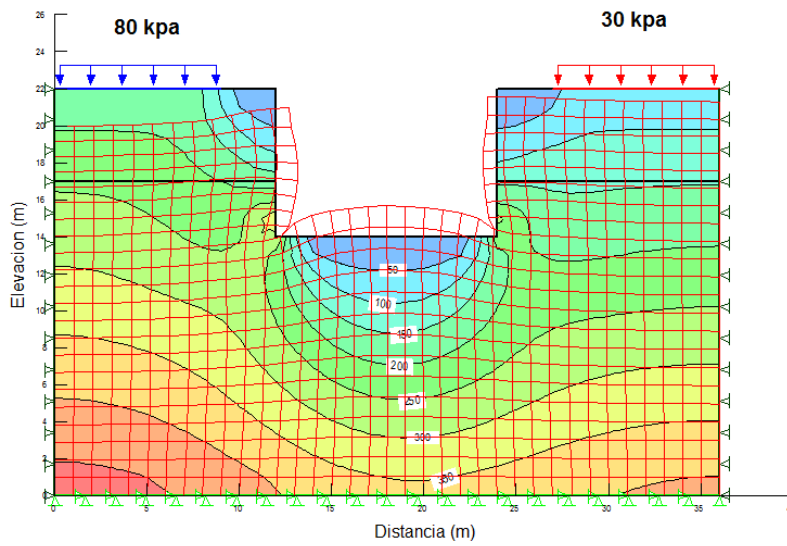


Figura 40. Variación de esfuerzos verticales. Adaptado de Sigma w

### Apéndice B. Análisis por medio de SIGMA/W de un pilote

Análisis por medio de SIGMA/W de un pilote

En este ejemplo observaremos el comportamiento que ejercen los pilotes sobre una obra de concreto realizada para la adecuación de una vía. Por ser este ejercicio de mayor complejidad lo realizaremos paso a paso para que futuros estudiantes entiendan más sobre el manejo del software. Los parámetros del terreno son los relacionados en la tabla 1.

Tabla 21.

#### *Parámetros del Terreno*

<b>Parámetros del terreno.</b>			
<b>Deformación</b>	<b><math>\gamma</math>(kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>E(kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\nu</math></b>
Suelo N° 1	16	5.000	0.35
Suelo N° 2	19	30.000	0.30
Concreto	24	210.000	0.20

Los puntos que definen el contorno exterior del problema son:

Tabla 22.

#### *Puntos de Contorno*

<b>Puntos de contorno</b>		
<b>Punto</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
1	50	0

Puntos de contorno		
Punto	X	Y
2	50	16.384587
3	50	23.857125
4	49.426872	23.465367
5	48.83493	22.965367
6	48.337018	22.465367
7	47.888297	21.965367
8	47.428272	21.465367
9	46.960393	20.965367
10	46.49447	20.465367
11	45.987263	19.965367
12	45.466459	19.465367
13	44.923865	18.965367
14	44.381271	18.465367
15	43.825327	17.965367
16	43.276835	17.465367
17	40.500342	16.559493
18	37.755297	16.16495
19	35.464362	15.479015
20	32.018478	15.46351
21	29.787075	15.465367
22	28.595029	15.465367
23	28.595029	14.965367
24	30.595029	14.965367
25	30.595029	13.965367

Puntos de contorno		
Punto	X	Y
26	27.595029	13.965367
27	27.595029	15.465367
28	26.134233	14.965367
29	25.798195	14.465367
30	25.390149	13.965367
31	24.554148	13.465367
32	23.029977	12.965367
33	21.430613	12.465367
34	19.99045	11.965367
35	18.542356	11.465367
36	17.119309	10.965367
37	15.689734	10.465367
38	14.255572	9.9653672
39	12.80631	9.4653672
40	11.37068	8.9653672
41	9.9463794	8.4653672
42	8.5102876	7.9653672
43	7.2981502	7.4653672
44	6.444388	6.9653672
45	5.5906558	6.4653672
46	4.7085557	5.9653672
47	3.8384573	5.4653672
48	2.960453	4.9653672
49	2.3363819	4.4653672

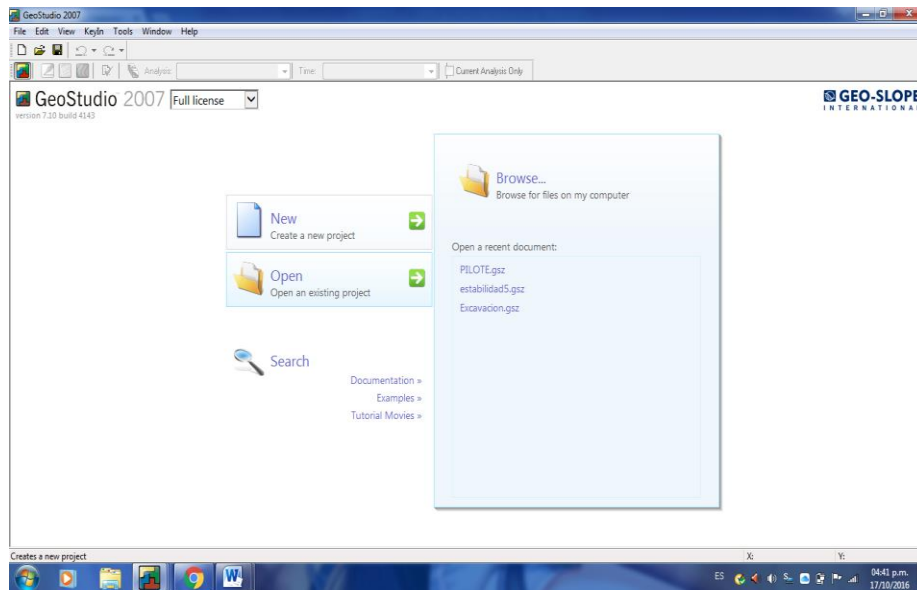
Puntos de contorno		
Punto	X	Y
50	0	4.0816599
51	0	0
52	7.5763405	0
53	17.990896	4.7409925
54	25.101241	7.2153672
55	33.899532	8.2153672
56	37.865205	10
57	45	14.045315

Tabla 23.

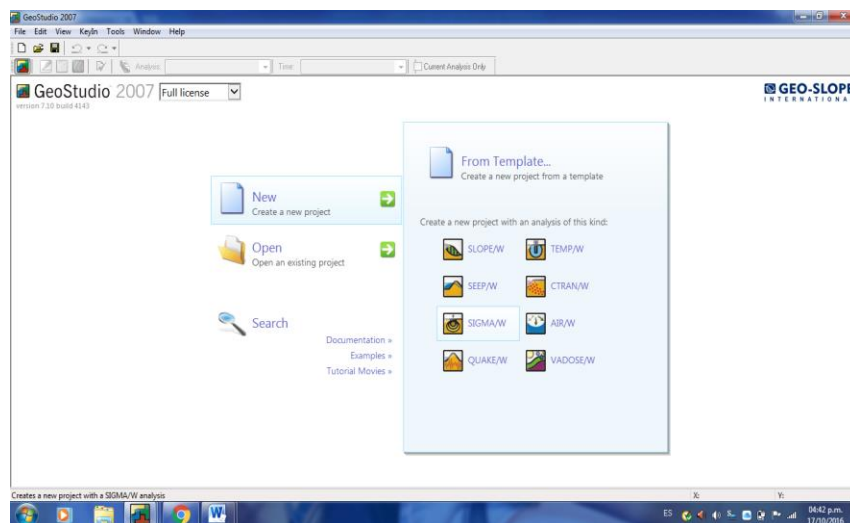
*Coordenadas de los pilotes*

Coordenadas Pilotes		
Punto	X	Y
58	28.9	14.5
59	28.9	4.5
60	28.1	14.5
61	25.5	4.8
62	29.7	14.5
63	32.3	4.8

**Pasó 1:** Ventana de inicio de nuestro programa seleccionamos New para crear un nuevo proyecto y seleccionamos la opción SIGMA/W



*Ilustración 1. Paso 1. Adaptado de: Sigma W*



*Ilustración 2. Paso 1.1. Adaptado de: Sigma W*

**Paso 2:** Ingreso de puntos de contorno al programa. Se ingresa por KeyIn y se le da clic a la opción puntos, los colocamos y para finalizar le damos clic en close.

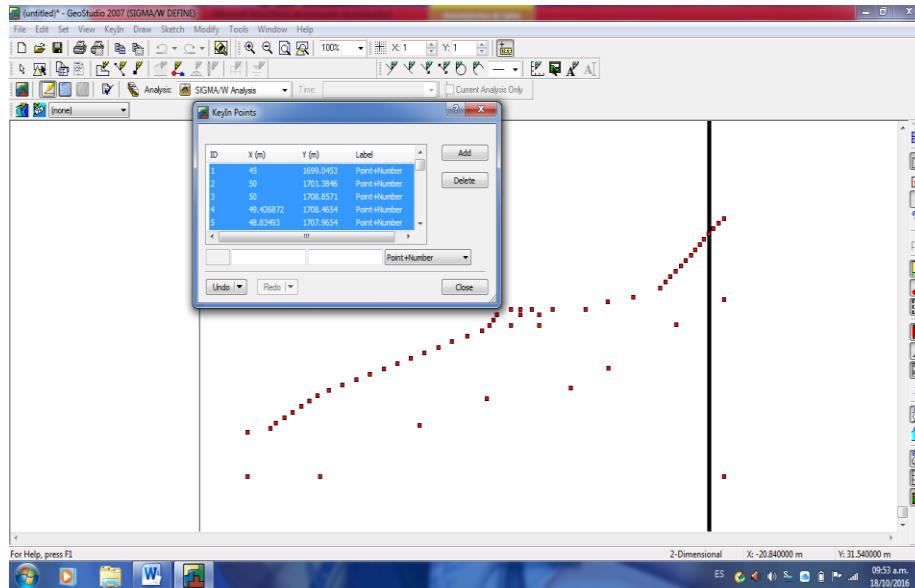


Ilustración 3. Paso 2. Adaptado de: *Sigma W*

Como podemos observar nuestros puntos quedan fuera de la hoja para solucionar este inconveniente vamos en el programa a la opción Set y damos clic en Units and Scale y para este caso configuramos en Scale y para este caso solo modifíco la escala horizontal.

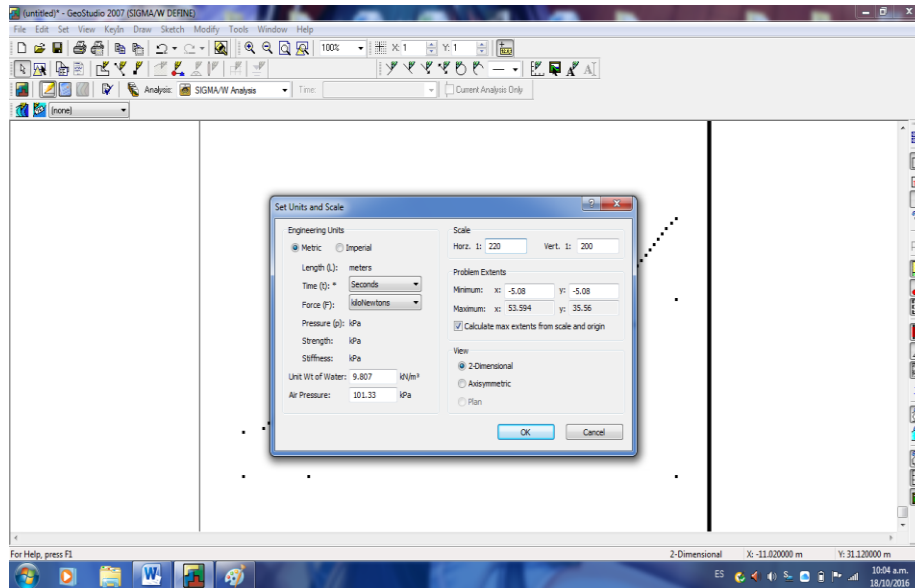


Ilustración 4. Paso 2. Adaptado de: *Sigma W*

**Paso 3:** Dibujar líneas para crear las regiones voy a Draw y doy clic en Lines.

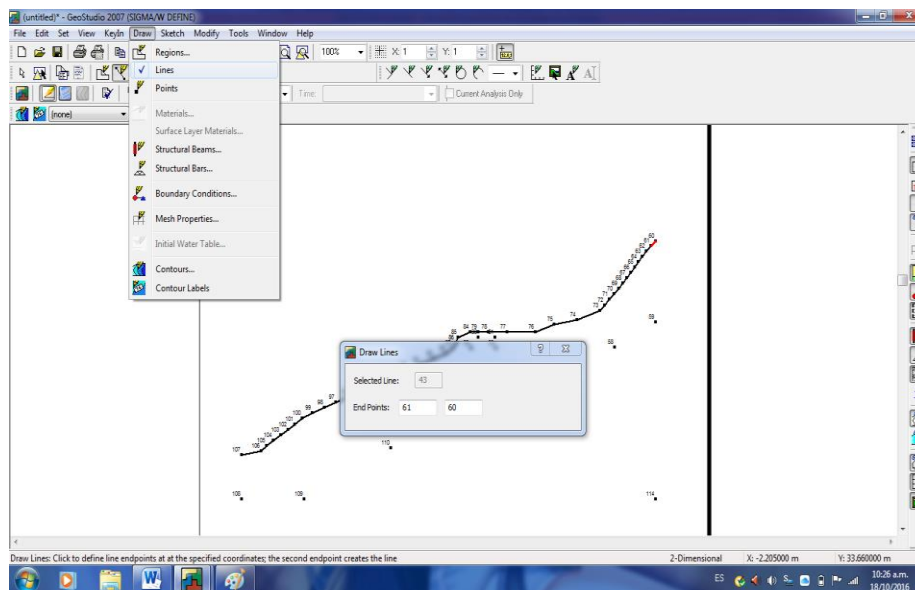


Ilustración 5. Paso 3. Adaptado de: *Sigma W*

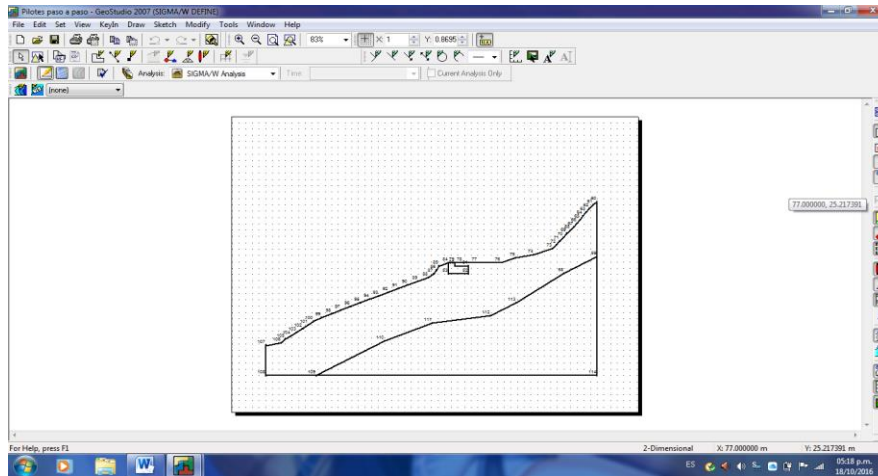


Ilustración 6. Paso 3.1. Adaptado de: *Sigma W*

**Paso 4:** Crear materiales vamos a KeyIn y damos clic en la opción Materials nos sale el cuadro de KeyIn Materials y damos clic en Add. Para modificar nombre, color, el tipo de categoría (Material Category) y el tipo de modelo (Material Model) dando clic en New Material.

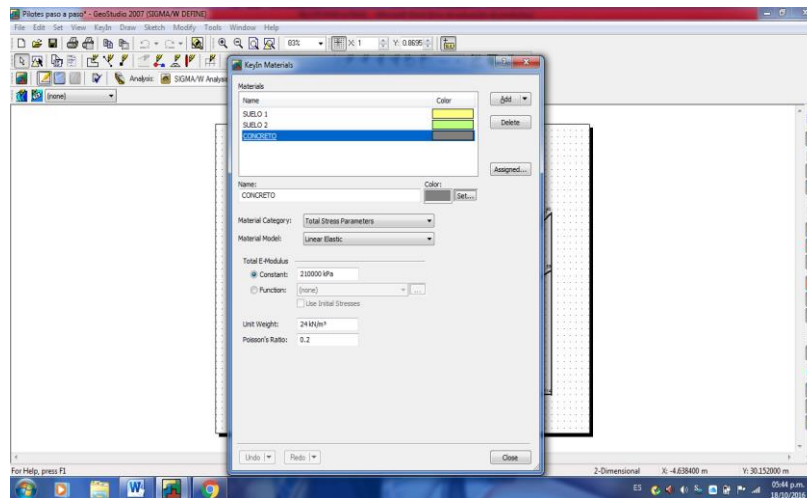


Ilustración 7. Paso 4. Adaptado de: *Sigma W*

**Paso 5:** Para dibujar las regiones voy a Draw, selecciono Regions y ubico doy clic punto por punto para crear la Región requerida. Debes seleccionar todos los puntos de cada region o te marcara error cuando medeles en el programa.

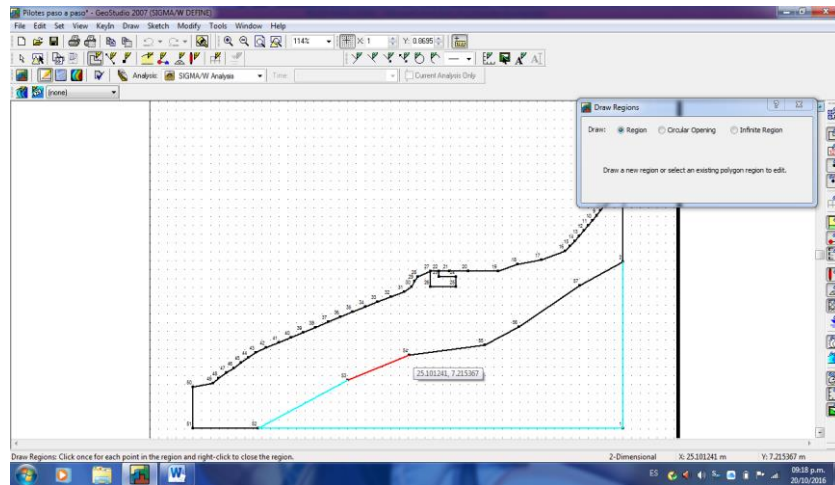


Ilustración 8. Paso 5. Adaptado de: *Sigma W*

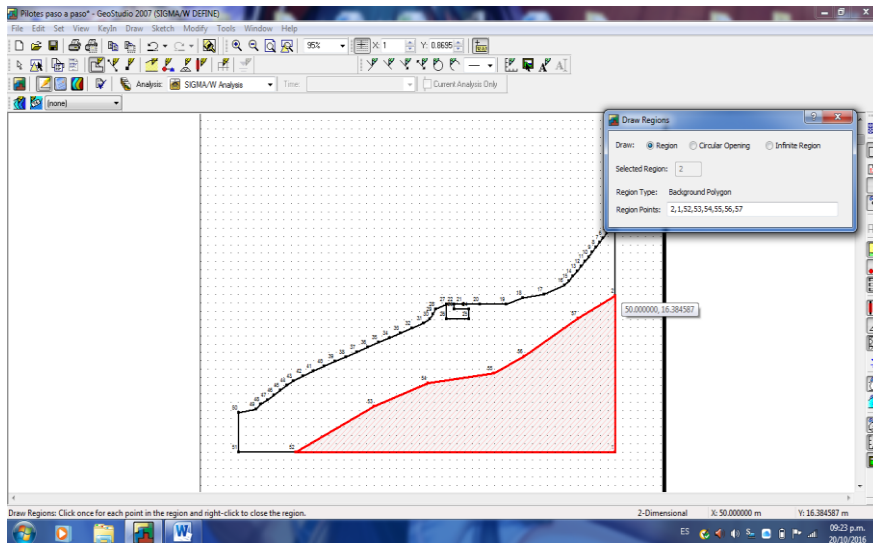


Ilustración 9. Paso 5.1. Adaptado de: *Sigma W*

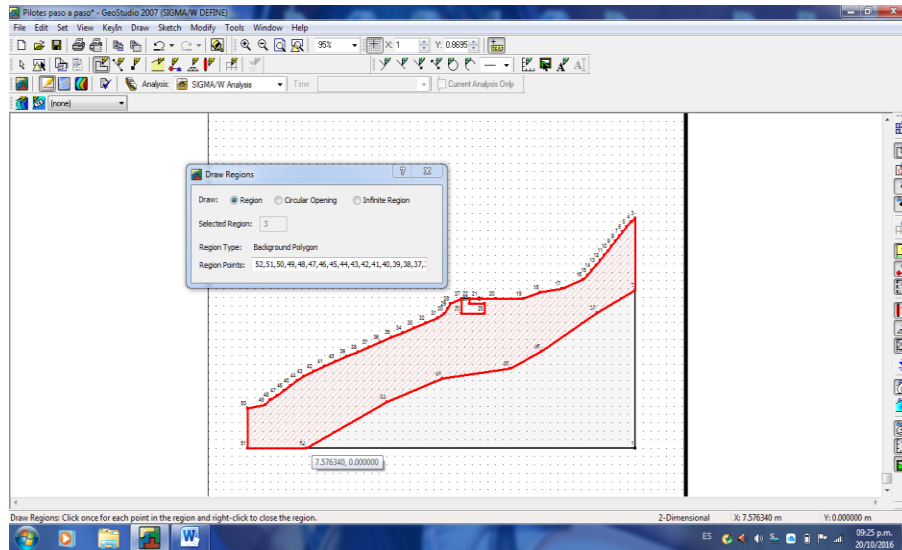


Ilustración 10. Paso 5.2. Adaptado de: Sigma W

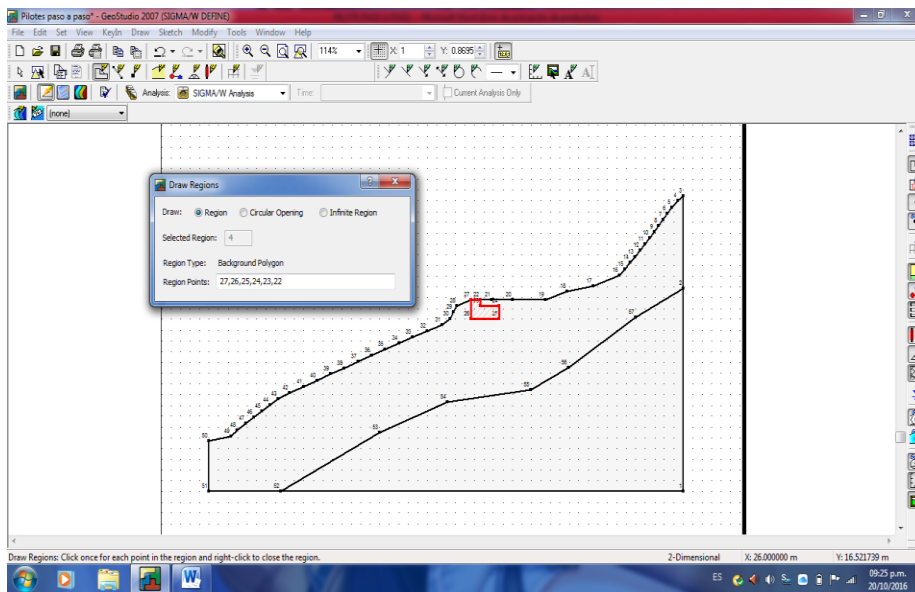


Ilustración 11. Paso 5.3. Adaptado de: Sigma W

**Paso 6:** Asignar Material para este paso vamos a Draw, materiales y asignamos según la región solo dando clic en le región, pero previamente se debe haber seleccionado el tipo de material.

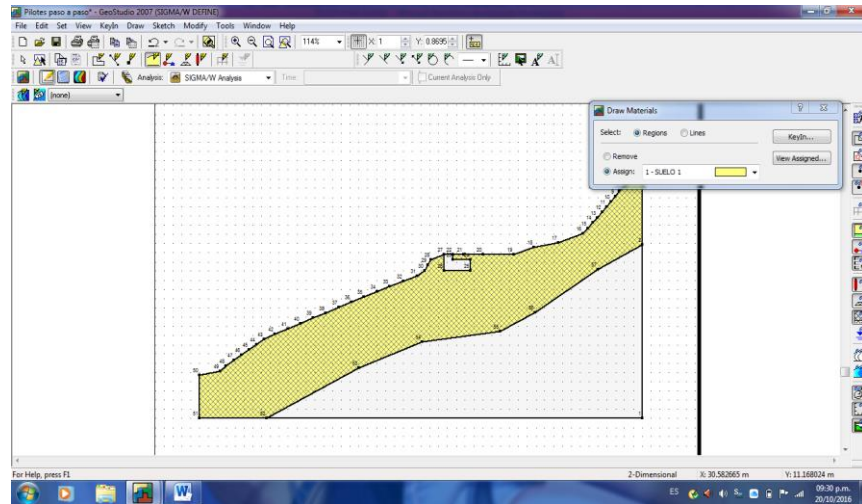


Ilustración 12. Paso 6.1. Adaptado de: Sigma W

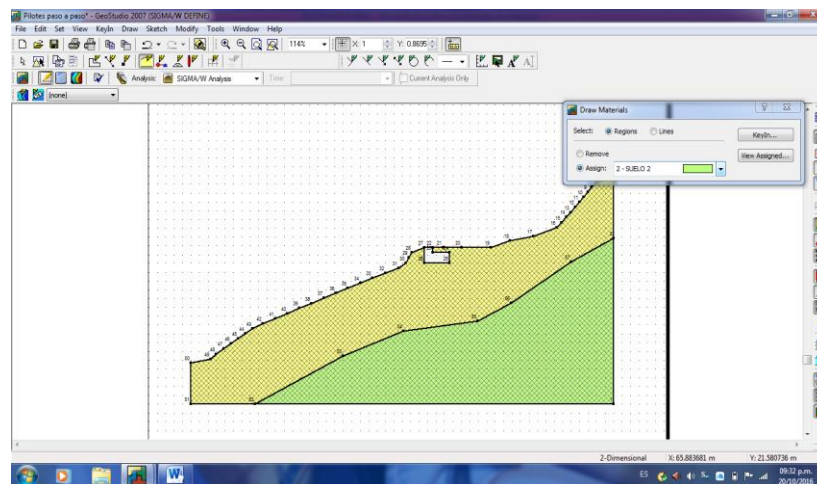


Ilustración 13. Paso 6.2. Adaptado de: Sigma W

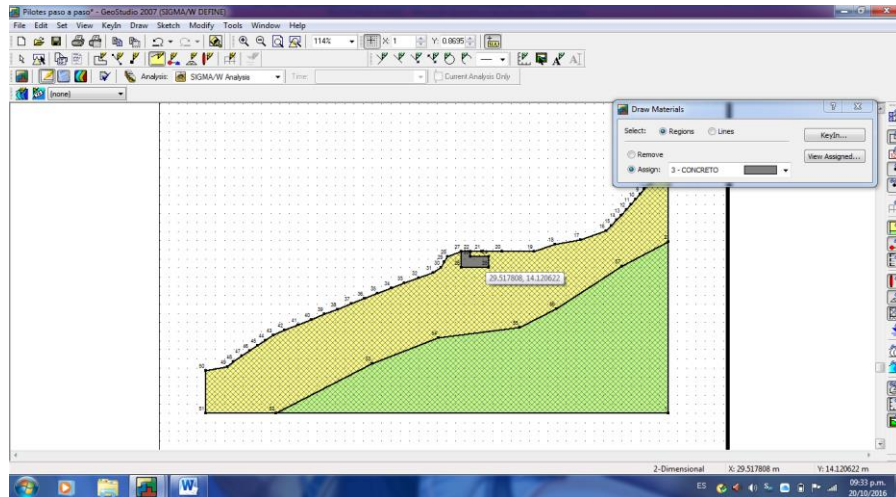


Ilustración 14. Paso 6.3. Adaptado de: Sigma W

**Paso 7:** Ahora para poderlo correr o modelar en el programa le ponemos restricciones de movimientos. Para crearlas vamos a KeyIn, Boundary Conditions allí podemos cambiarle las características y para dibujarlas vamos a Draw, Boundary Conditions

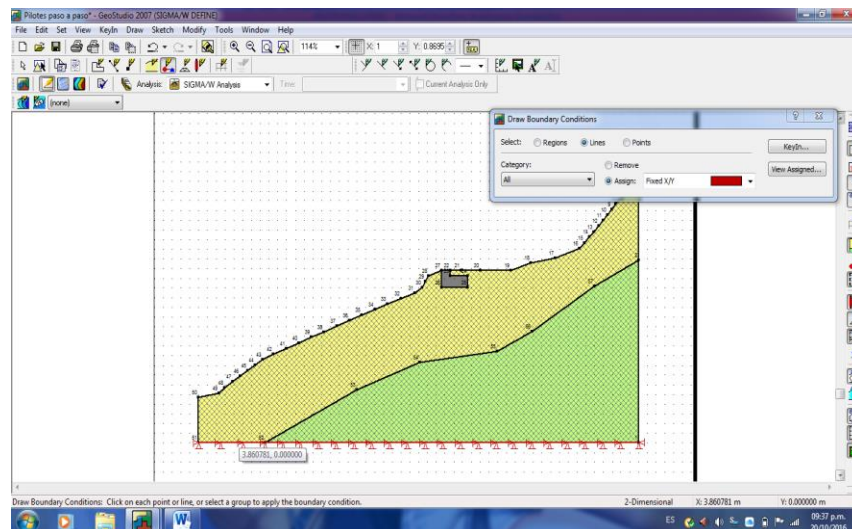


Ilustración 15. Paso 7.1. Adaptado de: Sigma W

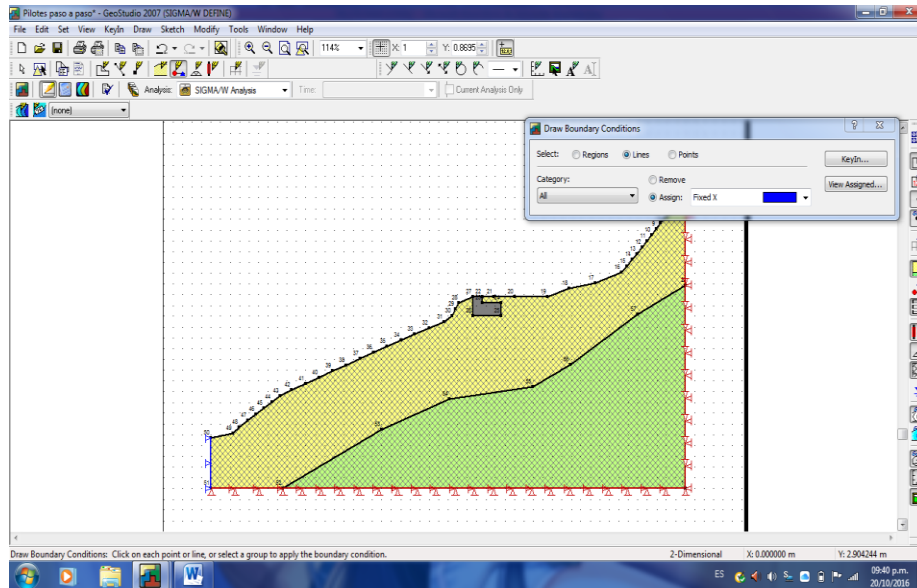


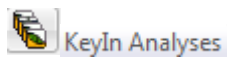
Ilustración 16. Paso 7.2. Adaptado de: Sigma W

**Paso 8:** Vamos a modelar, para esto vamos a realizar los siguientes pasos

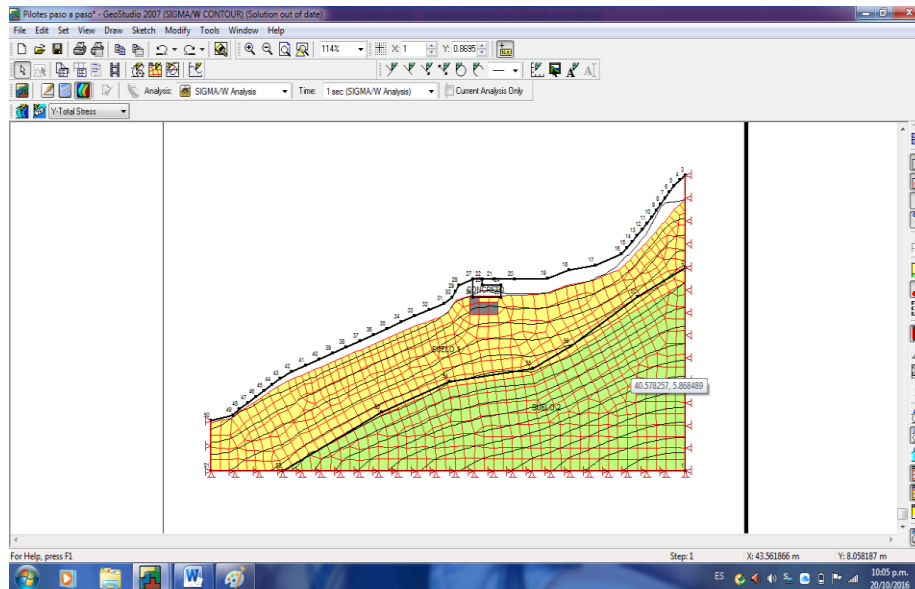
- Verificamos si hay errores en el botón



- Guardamos el análisis.



- Resolvemos el análisis



*Ilustración 17.* Grafico del análisis sin pilotes. Adaptado de: Sigma W

### **Paso 9:** Coordenadas Pilotes.

Lo primero que hacemos es crear los puntos y las líneas que nos identifican cada pilote, para eso seleccionamos las coordenadas de los pilotes y las pegamos utilizando en el programa la Herramienta KeyIn-Points y dibujo las líneas utilizando Draw-Lines.

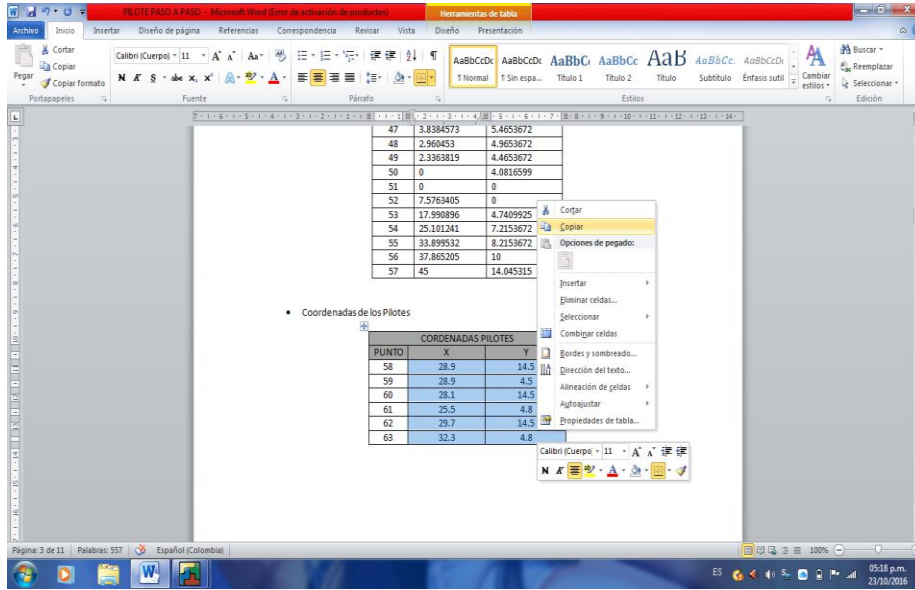


Ilustración 18. Paso 9.1. Adaptado de: Sigma W

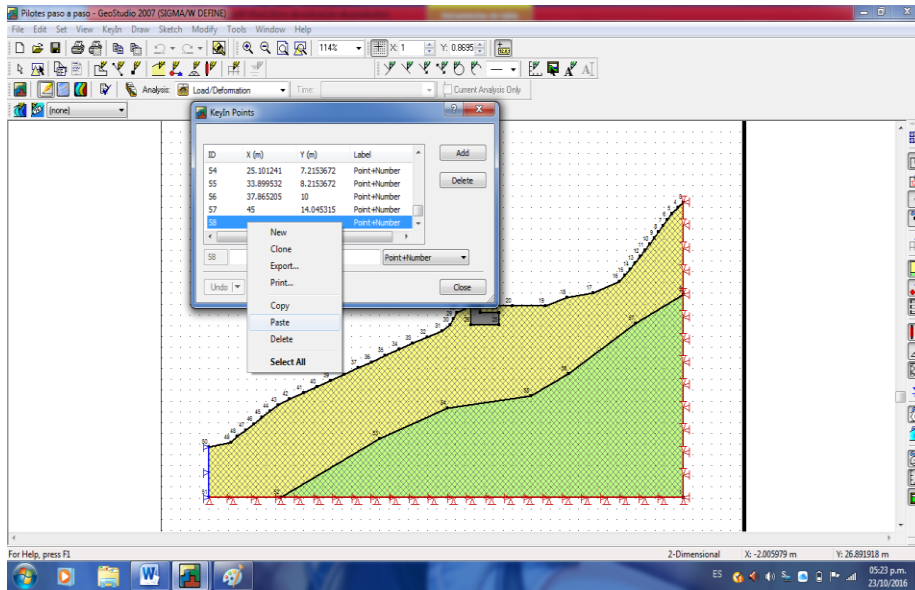


Ilustración 19. Paso 9.2. Adaptado de: Sigma W

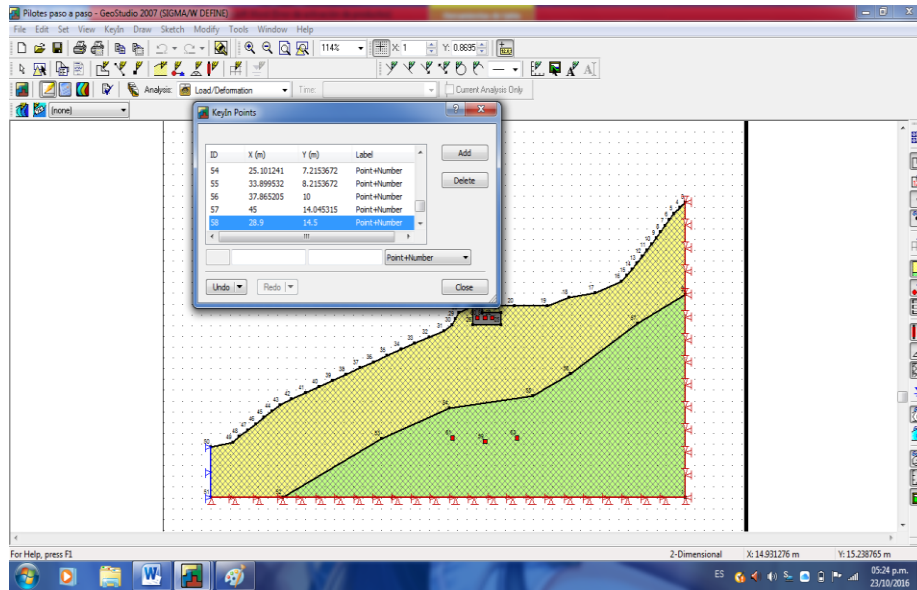


Ilustración 20. Paso 9.3. Adaptado de: Sigma W

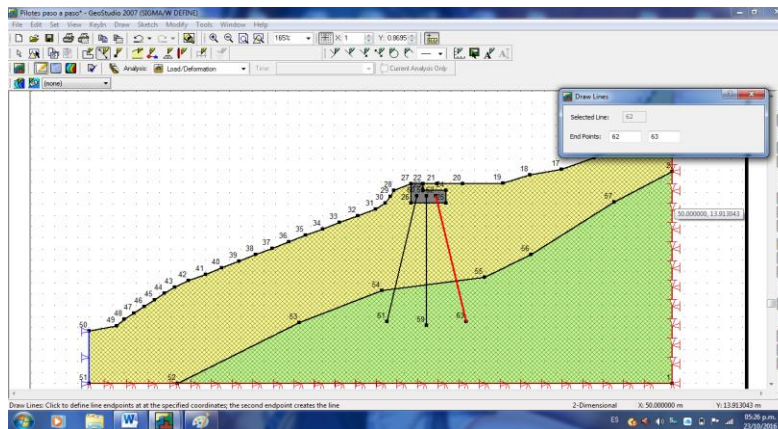


Ilustración 21. Paso 9.4. Adaptado de: Sigma W

**Paso 10:** Características de cada pilote.

Ya tenemos las líneas que nos identifican cada pilote. Ahora vamos a KeyIn-Structural Beams, lo creamos y le damos las características necesarias para modelar.

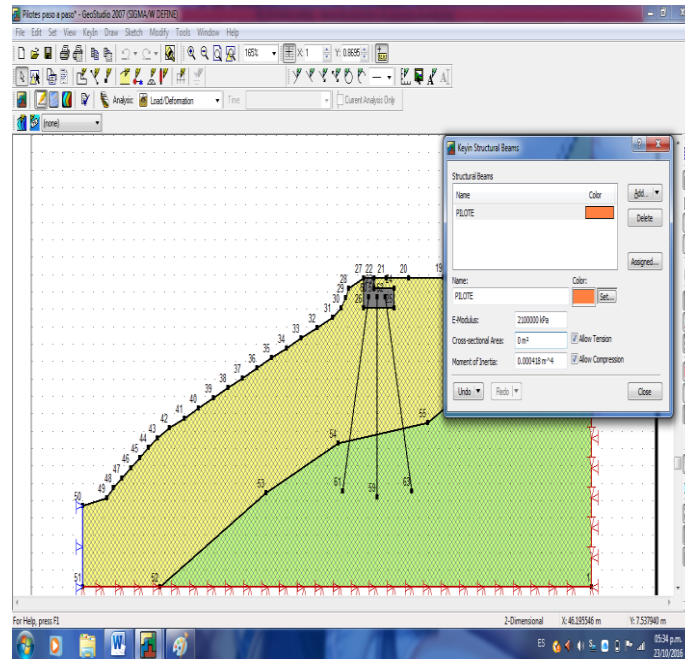


Ilustración 22. Paso 10.1. Adaptado de: Sigma W

Con las características definidas lo podemos dibujar dando clic en Drawy buscando la pestaña de Structural Beams.

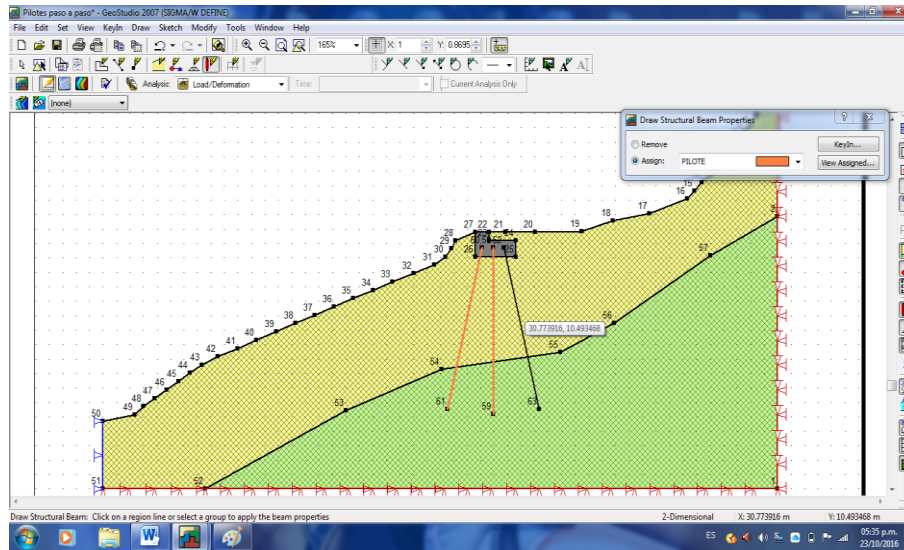


Ilustración 23. Paso 10.2. Adaptado de: Sigma W

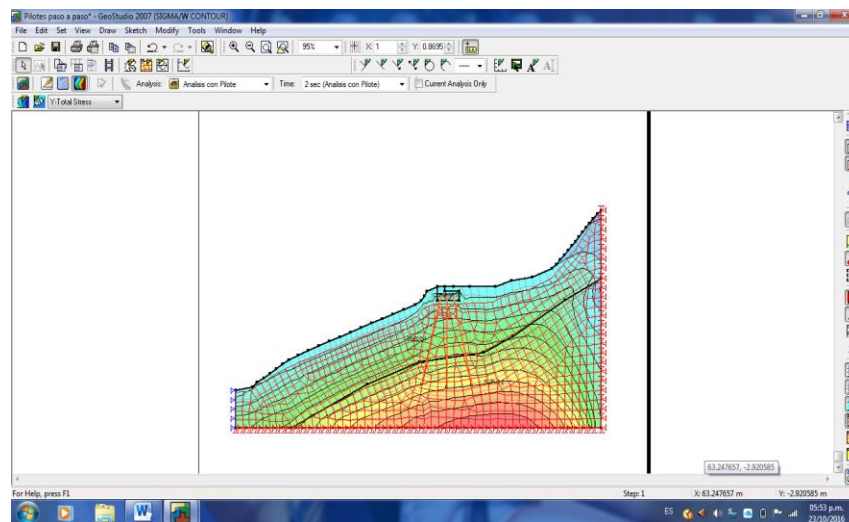


Ilustración 24. Grafica del análisis con pilote. Adaptado de: Sigma W

### Apéndice C. Ejemplo excavación con pantallas ancladas

**Ejemplo excavación con pantallas ancladas:** En este ejemplo analizaremos el comportamiento de una excavación en la construcción de edificios, el sistema de pantallas ancladas se recomienda debido a que los suelos en ocasiones son muy inestables y esto nos garantiza la seguridad del personal que ejecuta las actividades. Los parámetros del terreno son los relacionados en la tabla 24.

Tabla 24

#### *Parámetros del Terreno*

<b>Parámetros del terreno.</b>			
<b>Deformación</b>	<b><math>\gamma</math>(kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>E(kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>\nu</math></b>
Suelo N° 1	18	10000	0.35
Suelo N° 2	19	20000	0.30

Los puntos que definen el contorno exterior del problema son:

Tabla 25

#### *Coordenadas puntos de contorno*

<b>Coordenadas puntos de contorno.</b>		
<b>Punto número</b>	<b>x(m)</b>	<b>y(m)</b>
1	0	0
2	36	0

Coordenadas puntos de contorno.		
Punto número	x(m)	y(m)
3	36	17
4	24	17
5	24	14
6	12	14
7	12	17
8	0	17
9	0	22
10	12	22
11	24	22
12	36	22
13	9	22
14	27	22
15	23.407	179.118
16	81.363	194.647
17	278.637	194.647
18	336.593	179.118
19	278.637	164.647
20	81.363	164.647
21	23.407	149.118
22	23.407	119.118
23	81.363	134.647
24	278.637	134.647
25	336.593	119.118
26	336.593	149.118

Coordenadas puntos de contorno.		
Punto número	x(m)	y(m)
27	12	20.5
28	12	17.5
29	12	14.5
30	24	20.5
31	24	17.5
32	24	14.5

Las siguientes graficas muestran el comportamiento del suelo al someterlo a diferentes etapas constructivas, según la simulacion realizada en el programa.

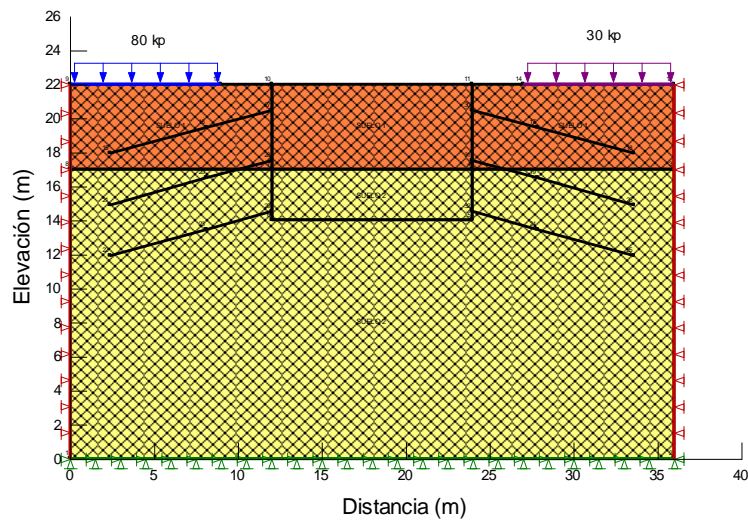


Figura 41. Modelo de análisis para excavación con pantallas ancladas. Adaptado de: Sigma W

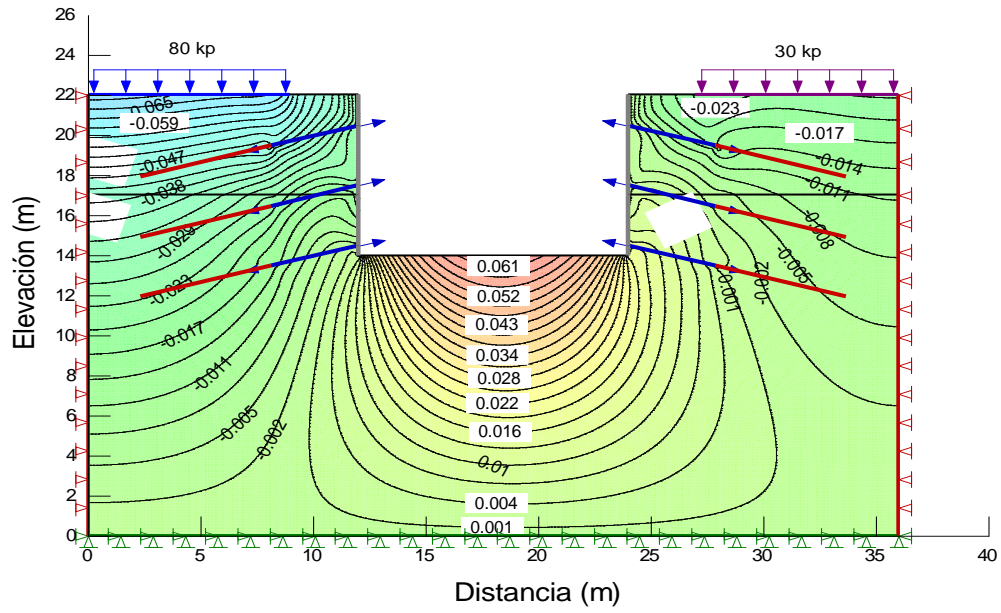


Figura 42. Muestra las deformaciones en Y. Adaptado de: Sigma W