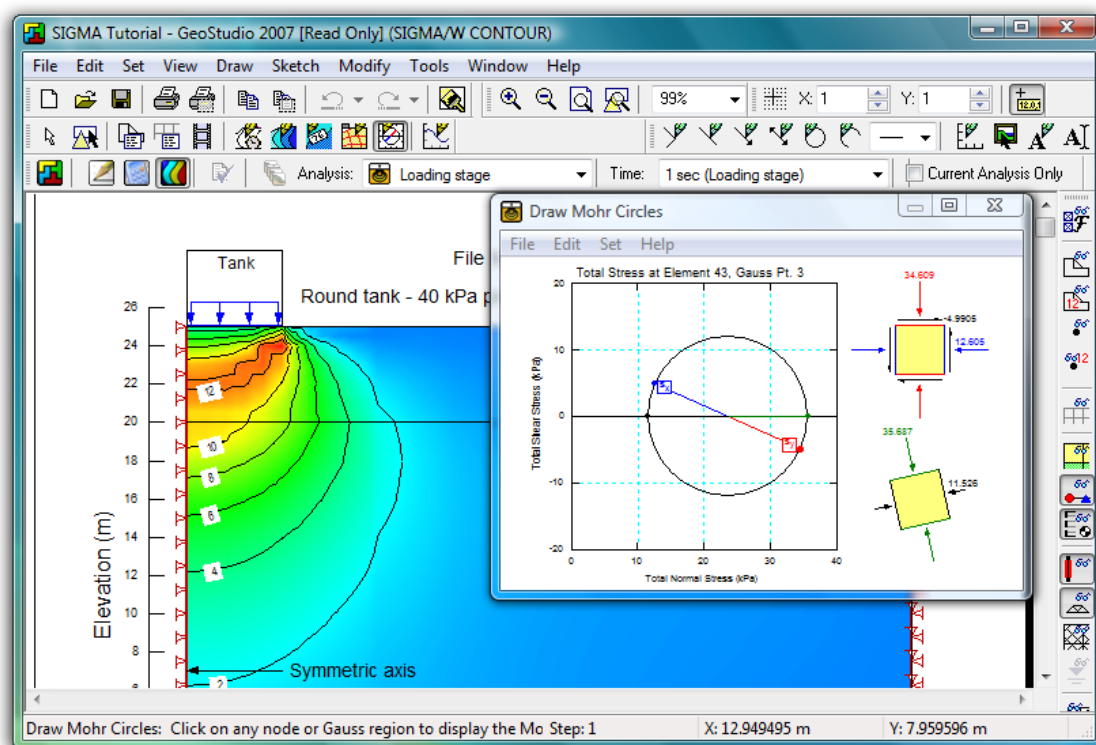


**CURSO DE MÉTODOS NUMÉRICOS APLICADOS A LA
INGENIERÍA DEL TERRENO
UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA**

**INTRODUCCIÓN A LA MODELIZACIÓN DE
TENSIONES Y DEFORMACIONES EN EL
TERRENO MEDIANTE EL USO DEL
PROGRAMA SIGMA/W 2007™.**



Germán López Pineda

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

EPS de Belmez

Departamento de Mecánica

Universidad de Córdoba

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
1.1	Características del programa y aplicaciones.....	5
1.1.1	Tipos de análisis:	5
1.1.2	Geometría y estratigrafía:.....	5
1.1.3	Propiedades y Modelos del terreno:.....	5
1.1.4	Condiciones de contorno del problema:	6
1.2	Limitaciones del programa.....	6
1.3	Iniciando el programa	6
1.4	Especificar la identificación del proyecto.....	10
1.5	Opción Settigs	12
1.6	Opción control	12
1.7	Opcion Convergence	12
1.8	Opción Time	13
2	PROBLEMA DE EJEMPLO.....	16
2.1	Definición del área de trabajo	17
2.2	Definición de la escala y unidades de cálculo	18
2.3	Definir el espaciado de malla.....	20
2.4	Ejes del boceto	21
2.5	Guardar el archivo del problema.....	23
2.6	Realizar un zoom sobre el trabajo.	25
2.7	Definir las propiedades de los suelos	26
2.8	Introducir los puntos de los contornos	31
2.9	Condiciones de Contorno	37
2.10	Regiones	37
2.11	Asignación de materiales.....	40
2.12	Generación y modificación de la malla del modelo de elementos finitos. ..	45
2.13	Tipificación de la condiciones de contorno.....	51
2.14	Valoración de las condiciones de contorno.....	54
2.15	Aplicación de las condiciones de contorno.	57
2.16	Verificar la existencia de errores.....	62

2.17	Resolver el problema.....	63
2.18	Ver resultados del cálculo.....	65
2.19	Dibujo de contornos.....	66
2.20	Modificación de los contornos.....	67
2.21	Cálculo del asientos.....	71
2.22	Etiquetas en los contornos	72
2.23	Obtención de los círculos de Mohr de modelo	74

INICIO

1 Introducción

Dentro del Curso de Métodos Numéricos Aplicados a la Ingeniería del Terreno se hace una introducción al uso del programa SIGMA/WTM, para la modelización de redes de flujo a través del Método de Elementos Finitos. La elección del programa SIGMA/W se debe fundamentalmente a :

- Es un programa muy difundido en las consultoras de Geotécnia.
- Posee una licencia para uso de estudiantes sin coste, con algunas limitaciones de uso, pero suficiente para su aprendizaje.
- Es fácil de aprender y muy intuitivo

Dentro de los programas del paquete **Geoestudio** de la empresa **Geoslope**, nos introduciremos en el uso del programa **SIGMA/W**, para la modelización de estados tensionales en el terreno inducidos por cargas así como de los asentos producidos por dichas cargas .

Esperando que este texto de introducción al programa **SIGMA/W 2007** sea útil a estudiantes de la asignatura, así como a profesionales de la geotécnia que quieren usar este tipo de herramientas de cálculo en la toma de decisiones dentro de las modelizaciones de estados tensionales y cálculo de asentos en el terreno.

En la página web de la empresa propietaria del paquete : <http://www.geoslope.com>, es posible bajarse la versión para estudiantes comentada anteriormente con algunas limitaciones de uso, éste manual se adecua a dicha versión limitada pero suficiente para introducirse en el uso del programa.

Se intenta con este manual de introducción, que el alumno una vez termine de poner en práctica los pasos descritos esté capacitado para al menos en un estado inicial poder enfrentarse a problemas tensodeformacionales en el terreno.

Este texto está basado en el tutorial de la versión 5.11, que se usó adaptándolo a la versión 2007.

Se entiende que el lector tiene conocimientos básicos de Ingeniería del Terreno en lo concerniente a distribución de tensiones y cálculo de deformaciones.

Además se le suponen al lector unos conocimientos matemáticos mínimos del método de los Elementos Finitos, usado en este programa.

El ejemplo usado lo es a título meramente académico cuyo objeto en la introducción al uso del programa.

Como es la primera versión no es extraño encontrar erratas, omisiones etc por lo que se ruega al lector lo comunique para solucionar este tipo de incidencias en próximas ediciones.

Cualquier sugerencia, que el usuario o lector de este manual quiera comentar, puede ser remitida a la dirección de correo electrónico me1lopig@uco.es

1.1 Características del programa y aplicaciones

El programa a cuyo uso nos vamos a introducir tiene fundamentalmente en su versión 2007 las siguientes características definidas a continuación:

1.1.1 Tipos de análisis:

El programa permite realizar cálculos tensodeformacionales de las siguientes naturalezas:

- Análisis de deformaciones.
- Simulación de fases de construcción y por lo tanto de carga del terreno.
- Cálculo de exceso de presiones de poro.
- Interacción suelo estructura.
- Análisis de consolidación.

1.1.2 Geometría y estratigrafía:

La introducción de los condicionantes geométricos son muy versátiles y se adaptan prácticamente a cualquier geometría:

- Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones de materiales y/o contornos.

1.1.3 Propiedades y Modelos del terreno:

Con objeto de modelizar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios tipos constitutivos, entre ellos:

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

- Modelo Cam-Clay.
- Modelo Cam-Clay Modificado.

De todos ellos en la versión de estudiante sólo es posible estudiar los problemas con el modelo Lineal Elástico.

1.1.4 Condiciones de contorno del problema:

Para el estudio del comportamiento del modelo además de la parametrización del terreno es necesario definir las propiedades de los contornos del modelo, para ello disponemos de la siguientes opciones.

En cuanto a modelización de cargas:

- **Fuerza/Desplazamientos**
- **Fuerzas de Volumen.**

En lo que respecta a colocación en dominios:

- **Condiciones de contorno nodales** (restricciones de movimientos puntuales o cargas puntuales)
- **Condiciones de contorno en caras de dominio** (restricciones de movimientos o cargas sobre un contorno determinado)

En este manual sólo usaremos las tres primeras, que serán explicadas en el apartado de definición de las condiciones de contorno.

1.2 Limitaciones del programa

Este programa en su versión Student tiene las siguientes limitaciones

- Máximo 500 nodos.
- Tres tipos de materiales.
- Sólo es aplicable el modelo lineal elástico.
- No son aplicables funciones para condiciones de contorno.
- El uso del motor de cálculo de SEEP/W sólo es posible para suelos saturados.

1.3 Iniciando el programa

El paquete de programas Geostudio está compuesto de varias herramientas con distintos usos y funcionalidades:

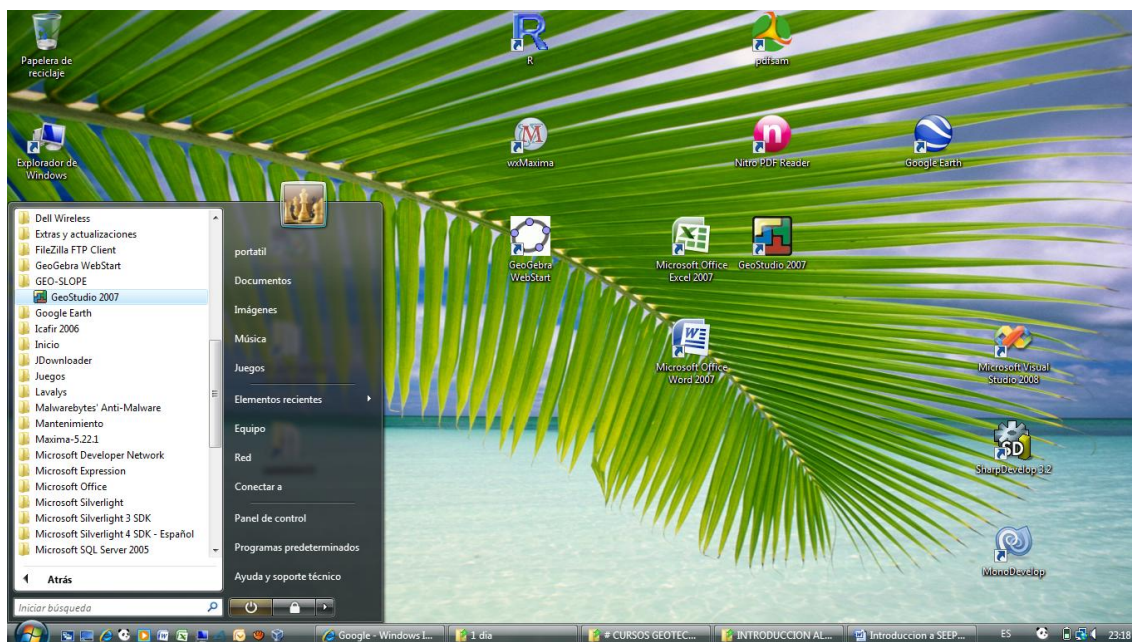
- **Slope/W** para cálculo de estabilidad de taludes

- **Seep/W** para cálculo de redes de flujo y filtración.
- **Sigma/W** orientado al cálculo de tensiones y deformaciones de suelos o rocas sometidos a carga.
- **Quake/W** para cálculo de los efectos de sismos en suelos y estructuras de suelos (presas, terraplenes, etc)
- **Temp/W** aplicación de la ecuación del calor sobre estructuras de suelos.
- **Ctran/W** aplicado a fenómenos de difusión de contaminantes en suelos
- **Vadose** usado en la modelización de acuíferos.

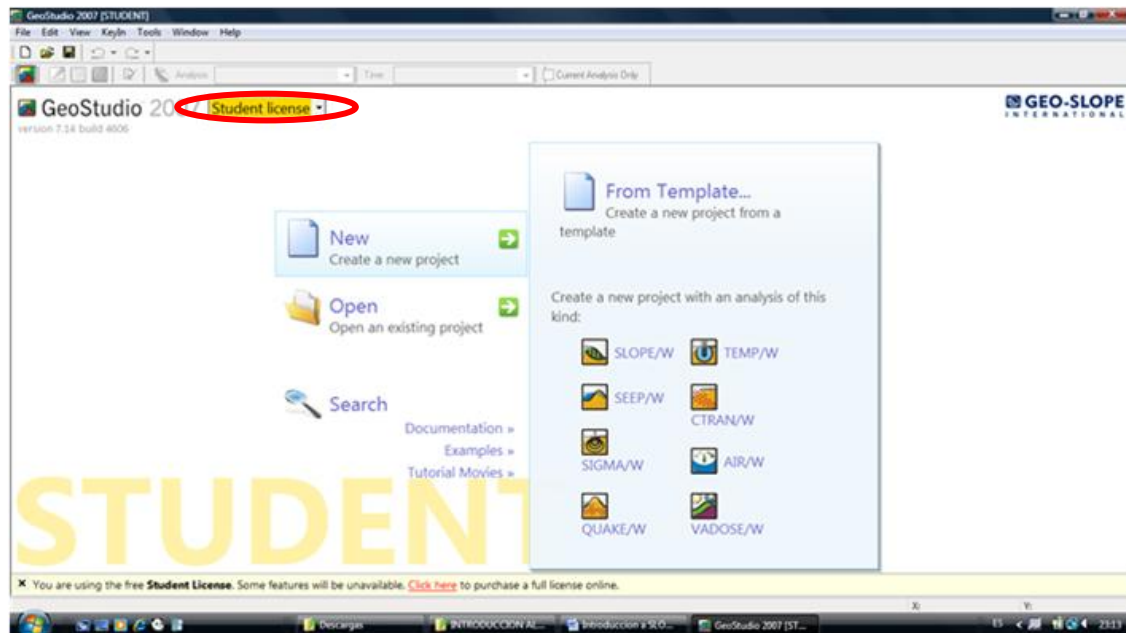
Todos estos programas están interrelacionados por lo que una geometría planteada para un tipo de problema, por ejemplo cálculo de asentos en un terraplén puede servir para un cálculo de estabilidad sin más que dar los correspondientes parámetros resistentes de los materiales, no necesitando introducir los puntos que definen la geometría, ya que estos se importan directamente.

En este texto sólo nos vamos a adentrarnos en los primeros pasos para poder aplicar con cierta soltura el programa **Sigma/W** dentro del paquete Geostudio 2007, y poder comenzar a introducirnos en la aplicación de la potencia de este programa orientado al estudio del comportamiento tensodeformacional de suelos sometidos a cargas.

Para proceder a arrancar el programa podemos hacerlo desde el escritorio o desde el menú de inicio tal como vemos en la siguiente figura:



Una vez que pulsamos el icono de arranque del programa ya sea desde el escritorio o desde el menú de inicio nos aparecerá la pantalla que vemos debajo de este texto.



En la parte derecha vemos varios iconos cada uno correspondiente a un programa distinto del paquete Geostudio, en la zona del centro inferior aparecen unos enlaces a manuales, ejemplos y videos desde la red de cada uno de los programas que componen el paquete.

En la parte central aparece un listado desde donde podemos acceder a nuestros últimos trabajos .

En la lista desplegable **licensing**, marcada en rojo en la figura siguiente, tenemos varias opciones:

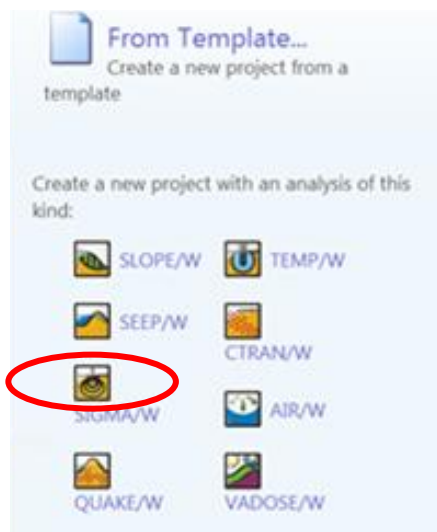
- **Full License** si tenemos la licencia completa del programa, podemos usar todas sus características sin limitaciones.
- **Basic License** si tenemos licencia de uso restringido a algunas aplicaciones, podemos realizar cálculos con ciertas limitaciones en cuanto a los modelos que podemos generar.
- **Student License**, que es la licencia que vamos a usar en este manual, y que activaremos por defecto se pueden usar funcionalidades de todos los programas limitados a ciertos aspectos concernientes a la generación de modelos, métodos de cálculo etc.

- **Viewer License**, usada para visualizar cualquier archivo generado, pero sin poder calcular ni guardar cambios.

Activamos por lo tanto la opción **Student license**, tal como puede apreciarse en la figura siguiente.

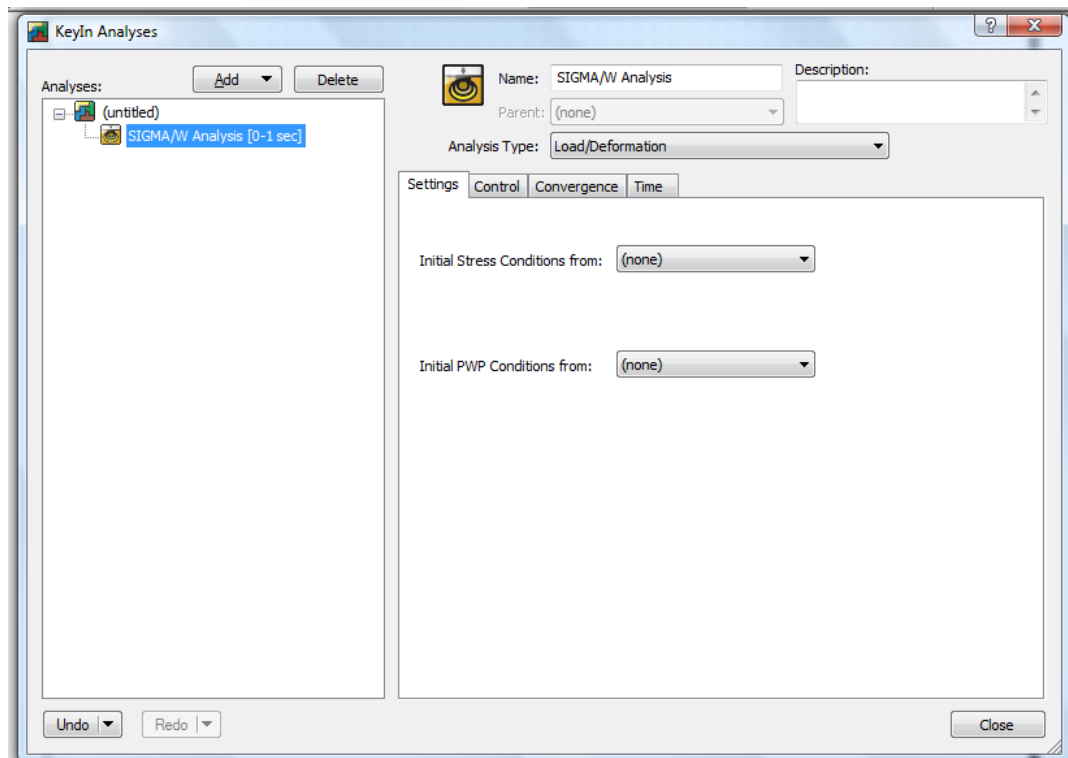


Dentro de esta misma columna más arriba encontramos los iconos de los programas del paquete, en nuestro caso pulsaremos en el icono **Create a SEEP/W analysis**, tal como aparece en la figura siguiente.



Una vez pulsado en icono que aparece dentro del recuadro en rojo aparece la pantalla principal del programa, con la que vamos a seguir varios pasos para identificar el proyecto y configurar los parámetros asociados al modelo que vamos a crear.

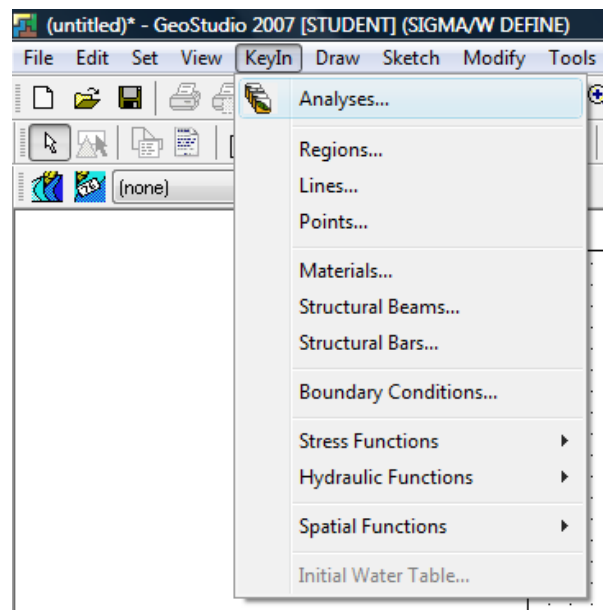
Esta es la pantalla inicial con la que vamos a proceder a la identificación de nuestro problema.



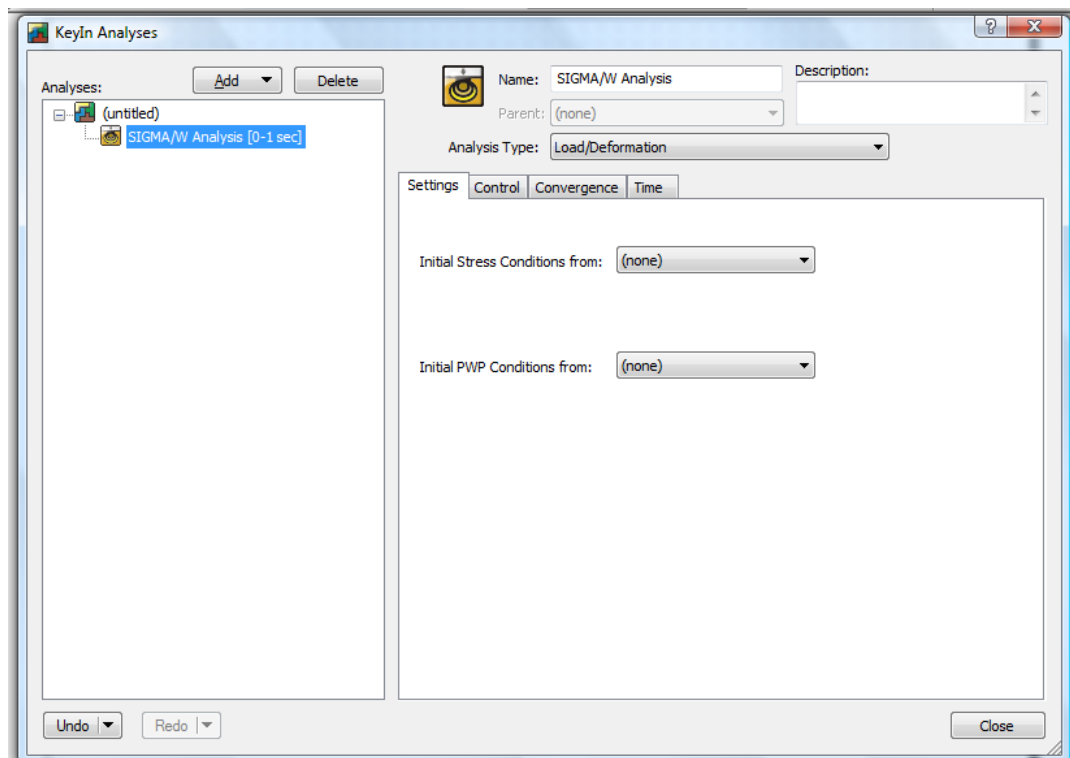
Pulsamos Close.

1.4 Especificar la identificación del proyecto

- Además de esta opción existe otra con la que podemos acceder a la pantalla anterior
 - Seleccionar **Analyses...** en el menú desplegable **KeyIn**. Tal como se ve en la figura.



- Aparecerá la misma pantalla que en el punto anterior



- Rellenamos los casilleros **Name** indicamos en nombre del proyecto que no tiene por que coincidir con el del archivo que estamos usando.

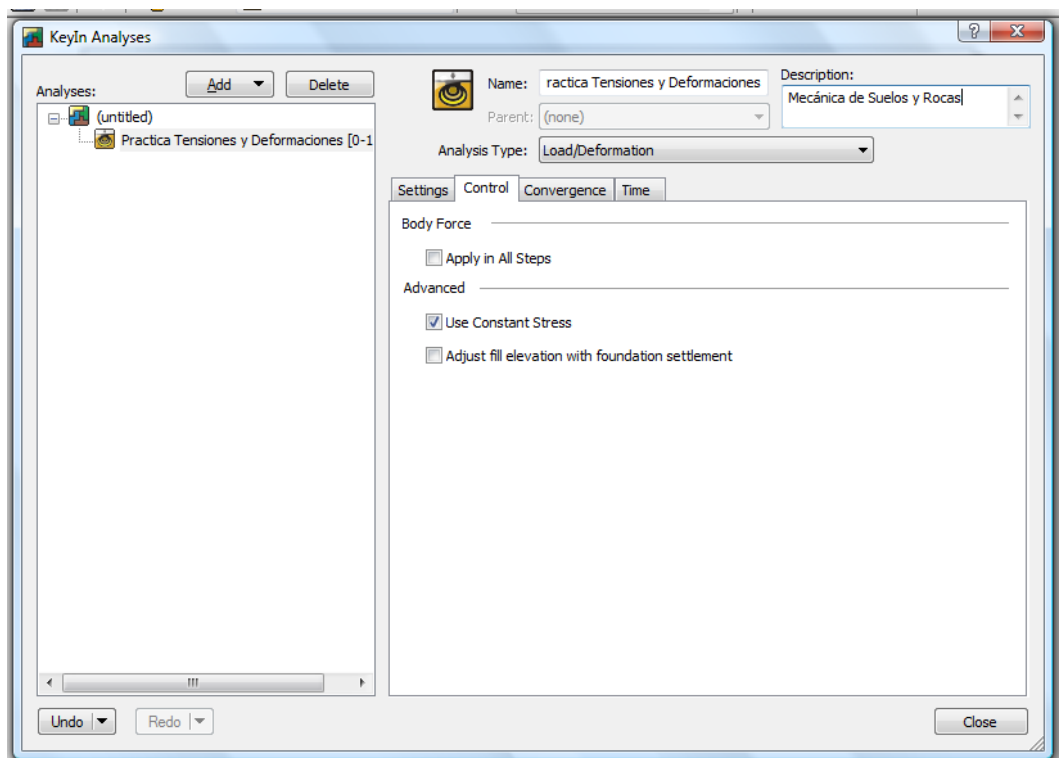
- En el casillero **Description** colocamos una breve descripción del proyecto.
- En la opción Analysis Type (lista desplegable) seleccionamos Load/Deformatio)

1.5 Opción Settigs

- Las opciones las dejamos tal como están a no ser que tengamos que importar datos de presiones de poro o tensiones efectivas iniciales de otros archivos de Geostudio 2007.

1.6 Opción control

Seleccionamos la pestaña Control .

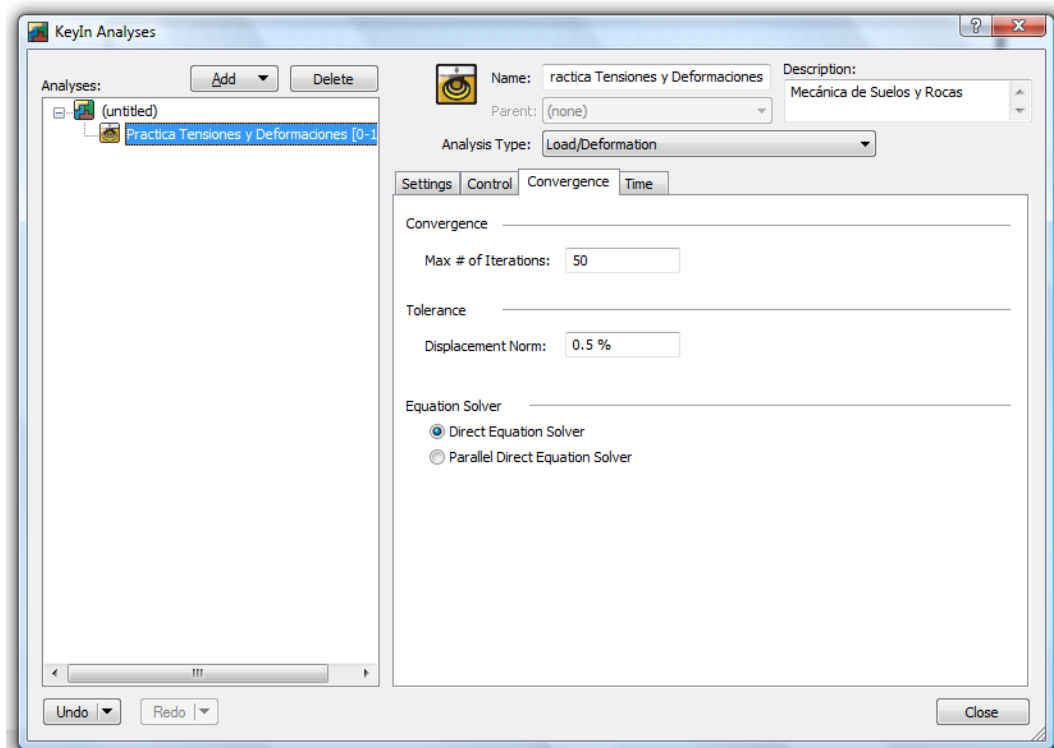


- Marcamos el casillero Use constant Stress.

Pasamos a la siguiente opción

1.7 Opcion Convergence

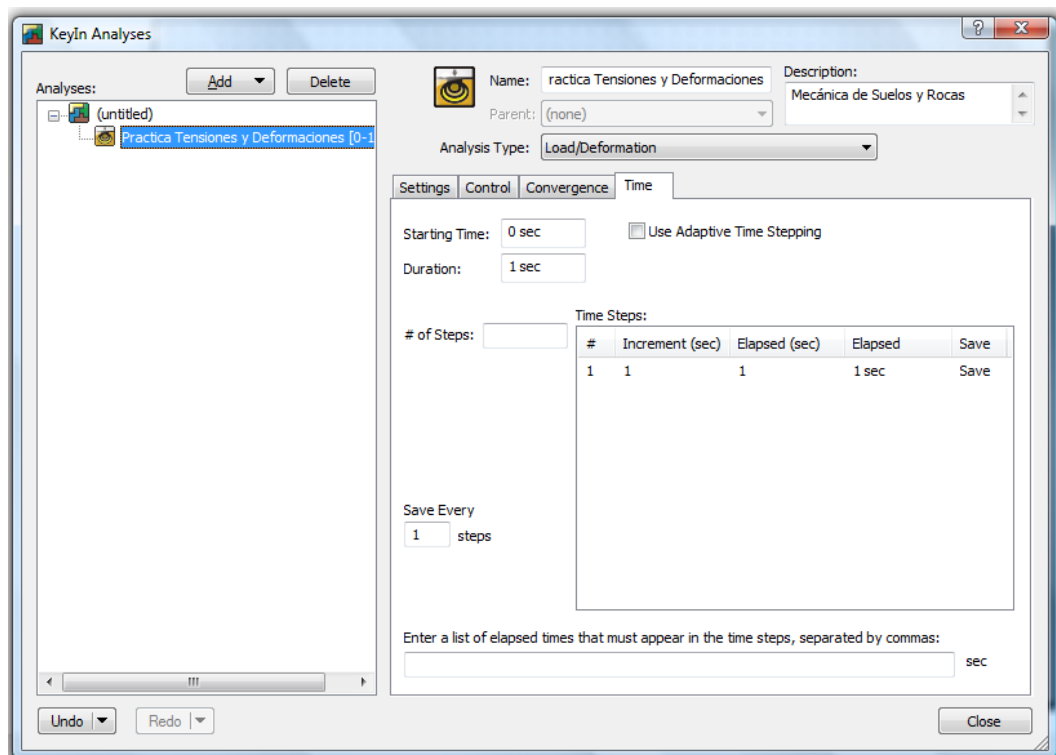
Pulsamos en la pestaña **Convergence**, con esta opción vamos a ajustar los parámetros de cálculo de nuestro modelo.



- Colocamos el valor 50 en la casilla **Max # of iterations** (máximo número de iteraciones)
- El valor 0,5 % en el casillero **Displacemento Norm** (tolerancia)
- Activamos el casillero **Direct Equation Solve**.
- Continuamos con la siguiente opción **Time**.

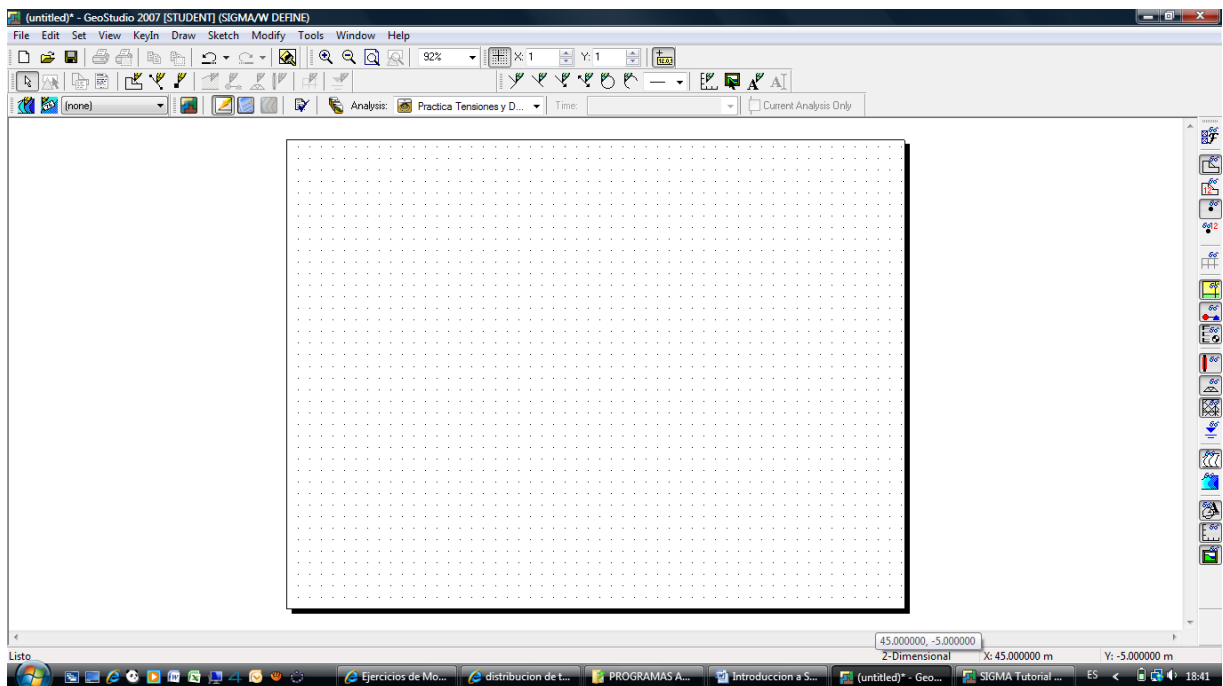
1.8 Opción Time

Seleccionamos la pestaña Time, nos aparecerá una cuadro de diálogo tal como vemos en la pantalla siguiente.



- Dejamos por defecto los valores que aparecen en la imagen anterior.

Después de esto damos por concluida la modificación de parámetros y pulsamos **close** , nos aparecerá la siguiente pantalla:



A partir de aquí podemos empezar a introducir geometrías, mallas parámetros y todos los datos necesarios para modelizar el comportamiento tensodeformacional en un terreno sometido a cargas con unas determinadas condiciones de contorno.

2 Problema de ejemplo

Comenzamos con un sencillo problema en el que se va a calcular las tensiones y deformaciones de un sistema formado por una la interacción de una cimentación de tipo circular sobre un terreno compuesto por dos materiales de distinta naturaleza deformacional.

Las características geométricas del problema indicadas en la siguiente figura corresponden a la mitad del depósito, el porqué se usa sólo la mitad se especifica en párrafos siguientes al croquis:

Vamos a definir dos tipos de terreno con las siguientes características:

TABLA 1. Parámetros del terreno			
Denominación	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Suelo nº 1	17	4000	0,35
Suelo nº 2	18	3000	0,35

Dado que el modelo es simétrico y tenemos limitaciones de uso del programa tenemos que aprovechar estos modelos geométricos para usar el mayor número de nodos posibles (hasta 500).

Es evidente que antes de afrontar cualquier problema es necesario tener acotado geométricamente los contornos exteriores contactos entre distintos materiales, puntos de borde, condiciones de contorno, etc.

Definición del problema

Para la definición completa del problema necesitamos los siguientes datos:

- Geometría de contorno del problema
- Límites entre capas de terreno, si existieran varios terrenos.
- Valores de los parámetros deformacionales de los distintos terrenos.
- Condiciones de contorno, cargas, limitaciones de movimiento etc..

En los puntos que se desarrollan a continuación vamos a aprender a modelizar un problema con un dos suelos de comportamiento distinto y vamos a generar dos regiones con distinto mallado para cada tipo de suelo.

Los puntos que definen el contorno exterior que definen el problema son:

TABLA 2. Puntos del contorno.		
1	0	25
2	10	25
3	10	20
4	0	20
5	38	25
6	38	20
7	10	0
8	0	0
9	38	0
10	6	25

De estos puntos los correspondientes desde el 1 al 10 corresponden al contorno del material y de las regiones donde se van a definir las condiciones de contorno y las mallas.

Es conveniente tener a mano un boceto realizado a mano alzada o con programas de CAD donde esté bien definido el problema para así poder definir bien los contornos y contactos de los materiales, por lo tanto se considera casi un paso previo recomendable, por lo menos el tener un boceto con los puntos acotados y numerados.

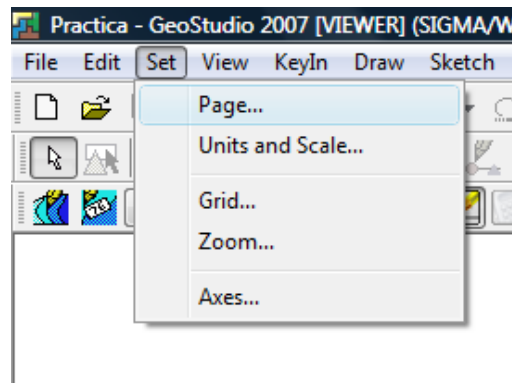
2.1 Definición del área de trabajo

El área de trabajo, es el área establecida por el usuario para definir el problema. El área puede ser más pequeña, igual o más grande que el tamaño del papel.

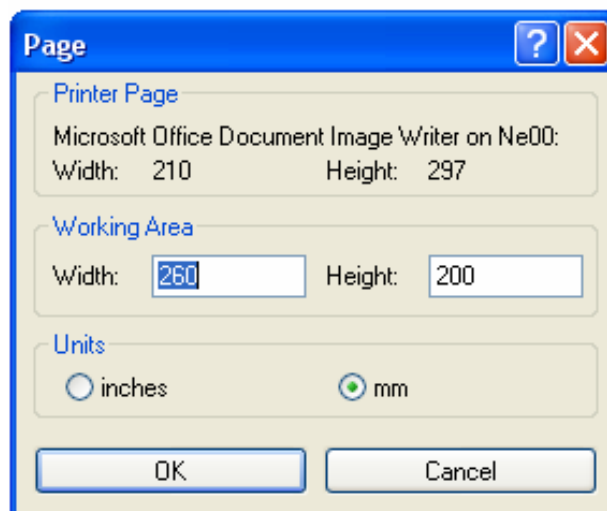
Para el ejemplo, vamos a definir un área de trabajo de 260 mm de ancho x 220 mm de alto.

Para definir el tamaño del área de trabajo:

- Seleccionamos **Page** en el desplegable **Set** tal como se ve en la siguiente figura



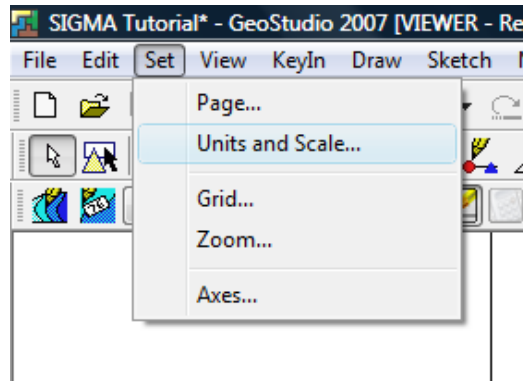
y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



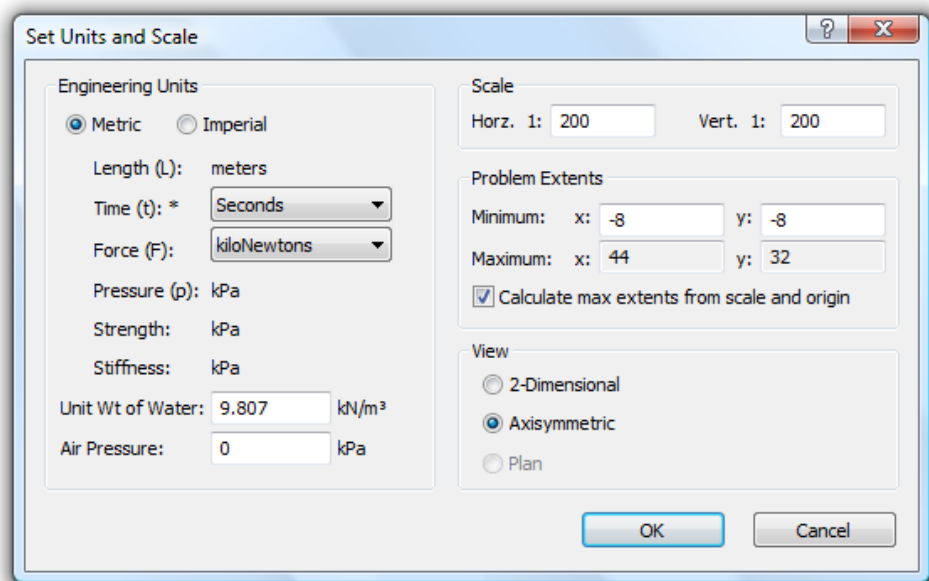
- Nos informa de la impresora preseleccionada introducimos en las casillas **Width** (ancho) y **Height** (alto) respectivamente los valores del tamaño del área de trabajo: 260 x 200.
- Aceptamos en OK.

2.2 Definición de la escala y unidades de cálculo

- Seleccionamos **Units and Scale** en el desplegable **Set** tal como se indica en la siguiente figura



- Y aparecerá el cuadro de diálogo:



- Establecemos los límites en -8 (mínimo de X) y en -8 (mínimo de Y)
- La escala horizontal cambia a 200 y la vertical a 200.
- Marcamos como Unidades de ingeniería (Engineering Units) *Metric*
- Fijamos como unidades de Fuerza (Force) KiloNewtons
- Seleccionamos OK después de comprobar que la densidad del agua vale 9.807 KN/m³.

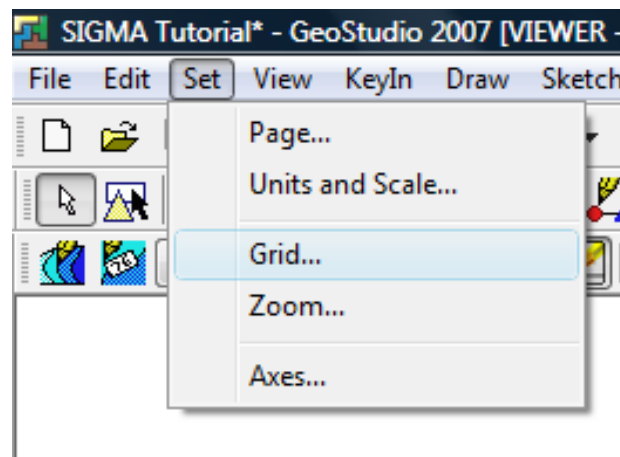
- En View marcamos Axisymmetric ya que la cimentación circular tiene simetría de revolución.

2.3 Definir el espaciado de malla

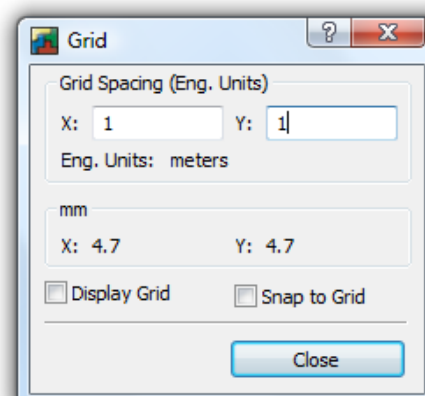
La visualización de la malla en el fondo del área de trabajo constituye una ayuda fundamental a la hora de dibujar y visualizar el perfil del talud. De tal modo que, se puede ajustar a la malla cualquier punto de nuestro perfil, esta herramienta es similar a las que existen en los programas de CAD.

Para definir la malla:

- Seleccionamos **Grid** en el desplegable **Set** y tal como se indica a continuación.



- Y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:

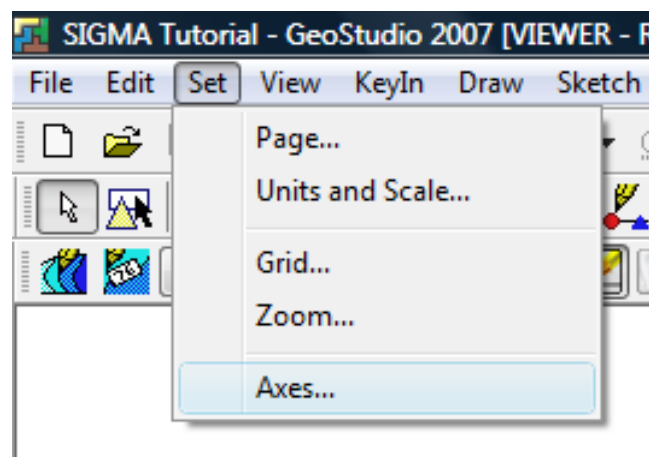


- Desactivamos las casillas **Display Grid** y **Snap to Grid**, en caso de querer dejarlas activadas se visualizará la rejilla y los saltos entre ella .
- Pulsamos Ok y continuamos.

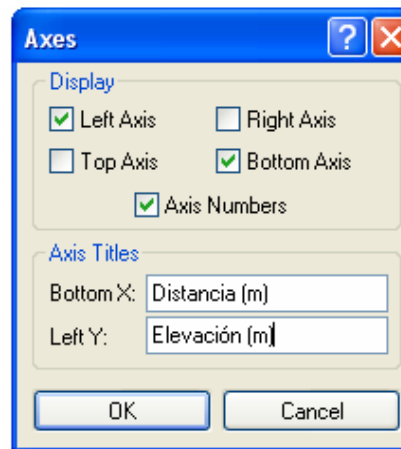
2.4 Ejes del boceto

Para definir los ejes del perfil y poder interpretarlo después de ser impreso, así como para poder acotar geométricamente nuestro problema se debe proceder como sigue:

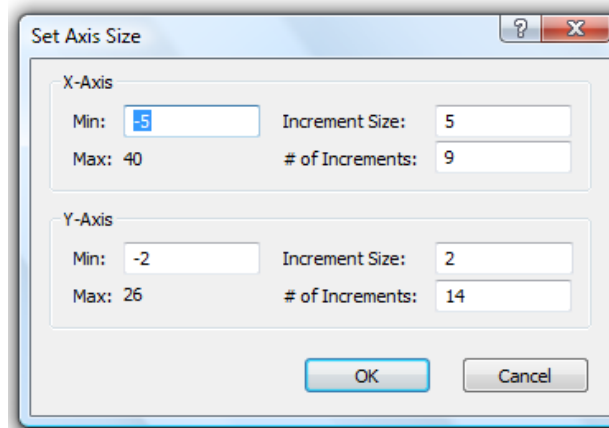
- Seleccionar **Set** del menú **Axes**.



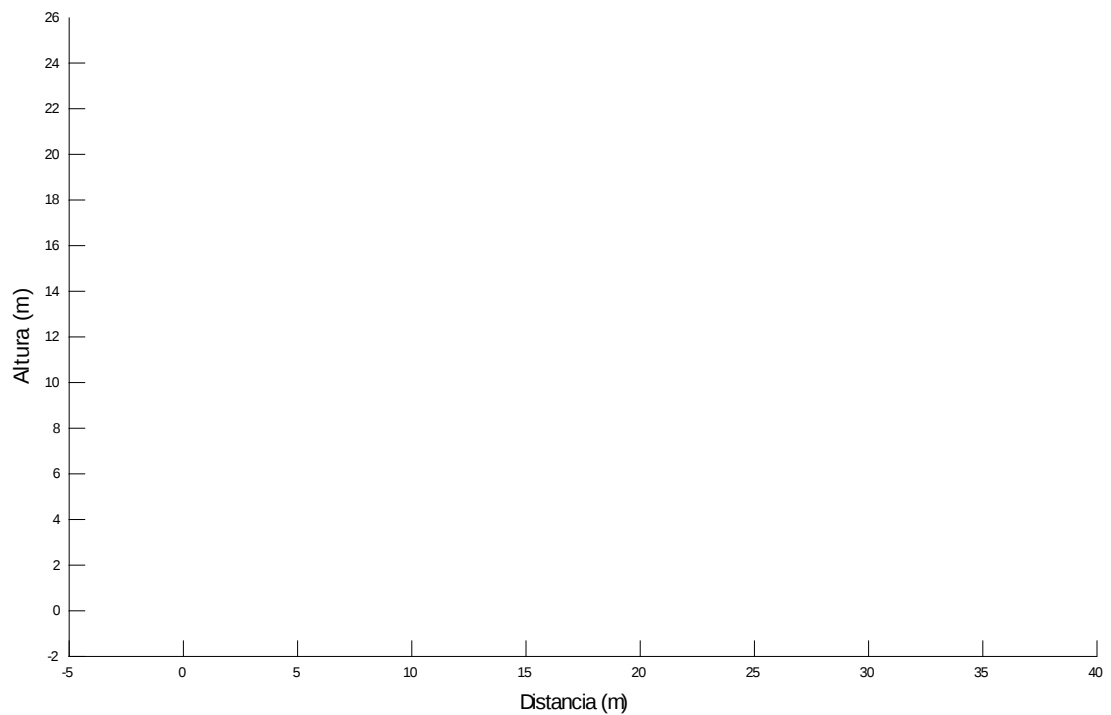
- El siguiente cuadro de diálogo aparecerá:



- Marcamos las casillas Left axis (eje izquierdo-ordenadas), Bottom Axis (inferior-abcisas) y Axis Number, es decir queremos que se visualicen los valores de situados en los ejes.
- Escribir el título de los ejes:
Bottom X: Distancia (m).
Left Y: Elevación (m).
- Pulsamos O.K y pasamos a la siguiente fase del cuadro de diálogo
- Se colocan los valores que se indican en la figura adjunta



- Pulsamos O.K y continuamos dando como resultado:

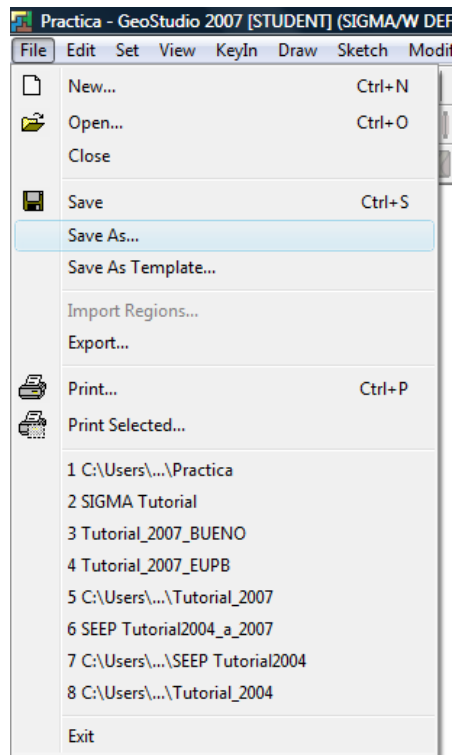


2.5 Guardar el archivo del problema

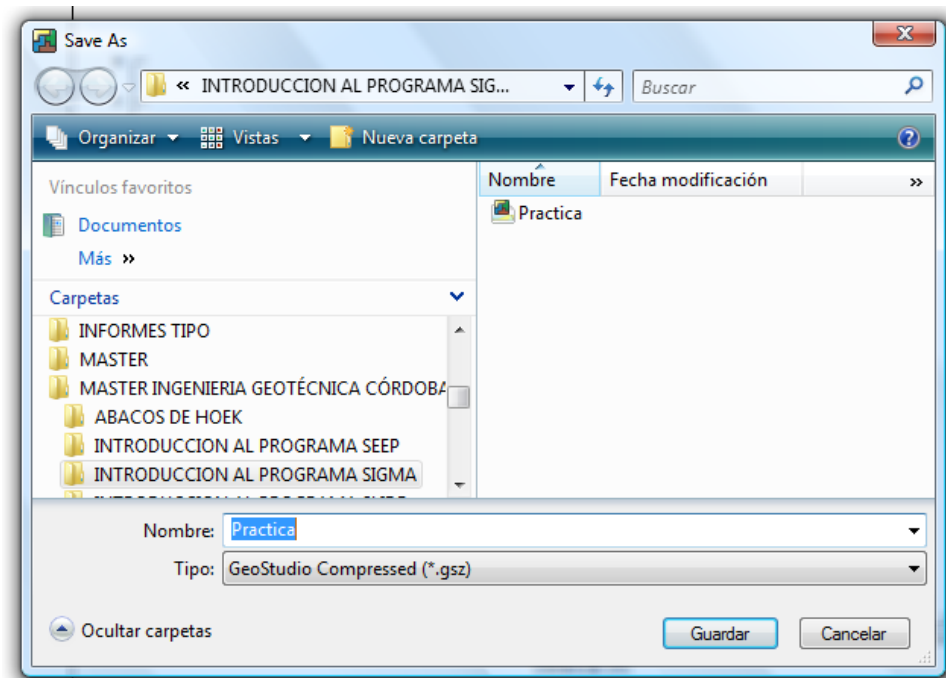
Es una buena práctica comenzar a guardar el archivo de nuestro trabajo, además de almacenar su información en un directorio de trabajo se le asigna un nombre relacionado con la trabajo a realizar, las extensiones de esta versión son **GSZ** que son formatos comprimidos cuya lectura se puede hacer con cualquier programa del paquete Geostudio, leyendo sólo la parte que le puede ser útil.

Para grabar el problema:

- Seleccionamos **Save as** en el menú desplegable **File** tal como vemos a continuación:



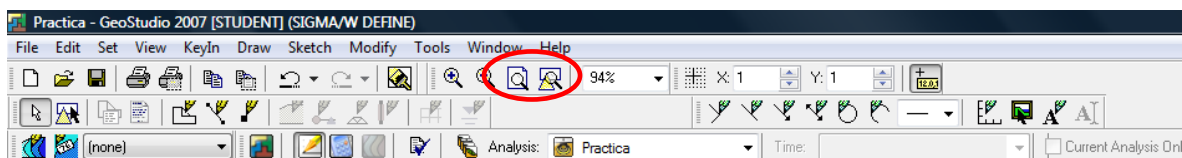
- Y aparecerá el cuadro de diálogo siguiente:



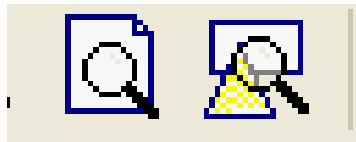
- Seleccionamos la carpeta donde queremos guardar nuestro archivo y asignamos un nombre relacionado con el proyecto en el que estamos trabajando por ejemplo: Practica.gsz.
- OK para aceptar y salir.
- Para guardar en sucesivos cambios en el mismo archivo, sólo es necesario seleccionar **Save** en lugar de **Save as**.

2.6 Realizar un zoom sobre el trabajo.

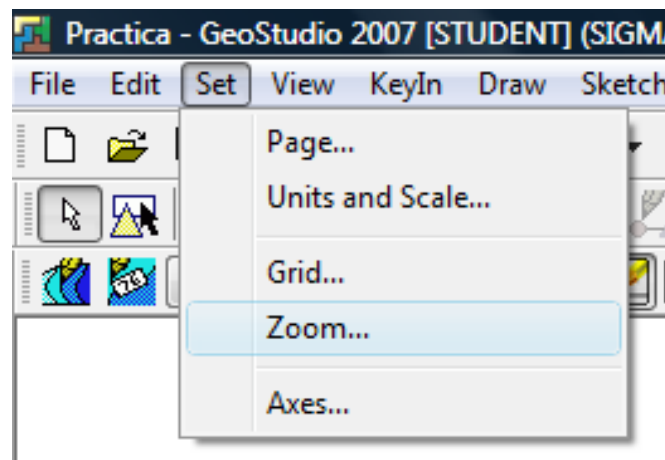
Antes de comenzar y cuantas veces lo necesitemos realizaremos un zoom sobre la pantalla usando los métodos que aparecen en la tabla de herramientas, marcados en rojo:



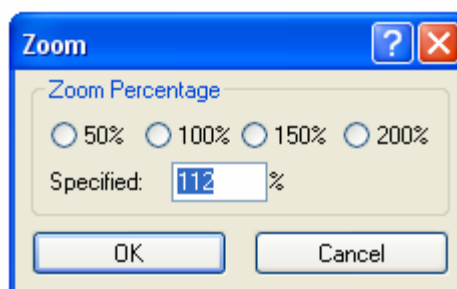
En la anterior figura se sitúan las herramientas para realizar un Zoom, esta imagen se presenta con más detalle en la siguiente figura.



- Situándose a la izquierda **Zoom Page** que realiza un zoom sobre los márgenes de la página y a la derecha **Zoom Objects** que realiza un zoom sobre los elementos activos.
- O también se puede realizar seleccionando **Zoom** del menú de **Set** tal como se ve en la siguiente figura:

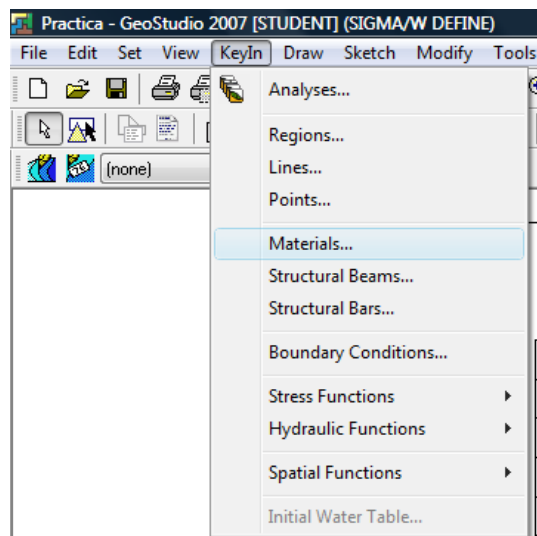


- Aparecerá el siguiente cuadro de diálogo donde podremos poner en factor de zoom que más nos interese

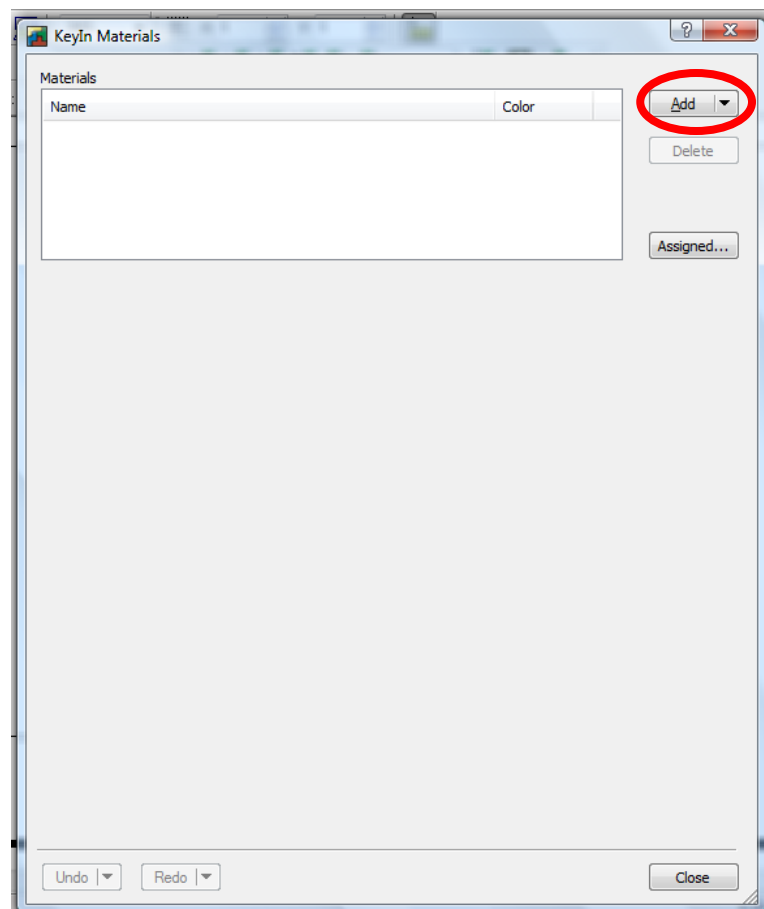


2.7 Definir las propiedades de los suelos

- Para definir las propiedades de los suelos:
 - Seleccionar **Materiales** en el menú desplegable **KeyIn.**, tal como se ve en la siguiente figura.

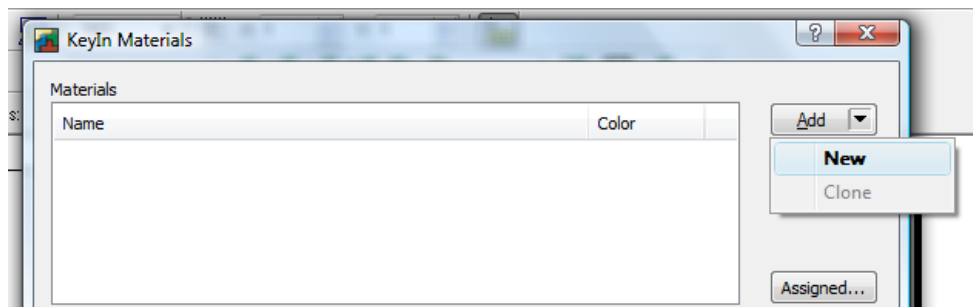


- Una vez hecho en clic aparecerá el siguiente cuadro de diálogo

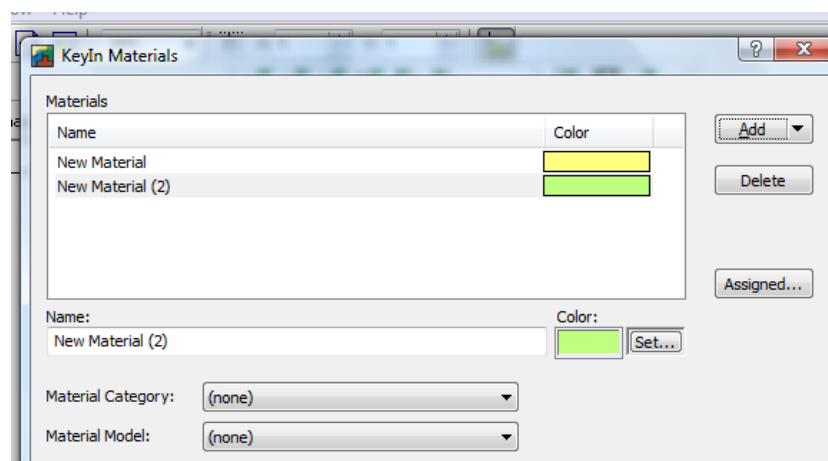


Aquí hay que definir el número de materiales (en la versión Student sólo dos), no aparece ningún terreno, por lo que hay que definirlos.

Pulsando en la lista Add, tal como está marcado en la anterior imagen podemos crear terrenos y sus características.



Pulsamos dos veces sobre Add/New y nos aparecerá un resultado como en la siguiente figura:



Vamos a definir en este cuadro de diálogo las características del comportamiento en cuanto a las condiciones tensodeformacionales de los suelos que vamos a estudiar.

Comentamos a continuación los contenidos de los casilleros del cuadro de dialogo y su contenido:

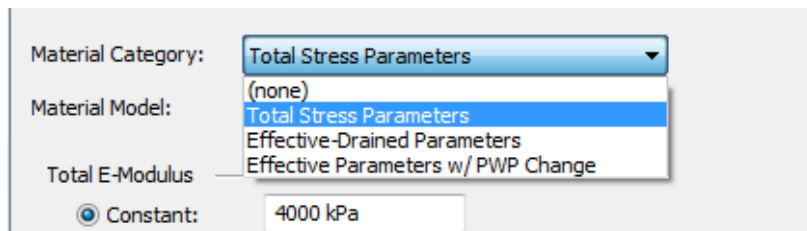
Después de pulsar sobre uno de los tipos de terreno podemos ingresar sus características.

En el cuadro **Name** indicamos el nombre del terreno al que vamos a asignar los parámetros, para introducir más terrenos pulsamos en **Add** en la parte arriba derecha

y para borrar suelos, primero los marcamos y después pulsamos **Delete** justo debajo de **Add**

En la opción, **Material Model** seleccionar la otra opción Lineal Elastic (Sólo está disponible este tipo en la versión Student).

En la opción **Material Category** seleccionamos las características de nuestro material en cuanto a disipación de tensiones dentro de esta opción podemos seleccionar las opciones que se indican en la lista desplegable en la siguiente figura:



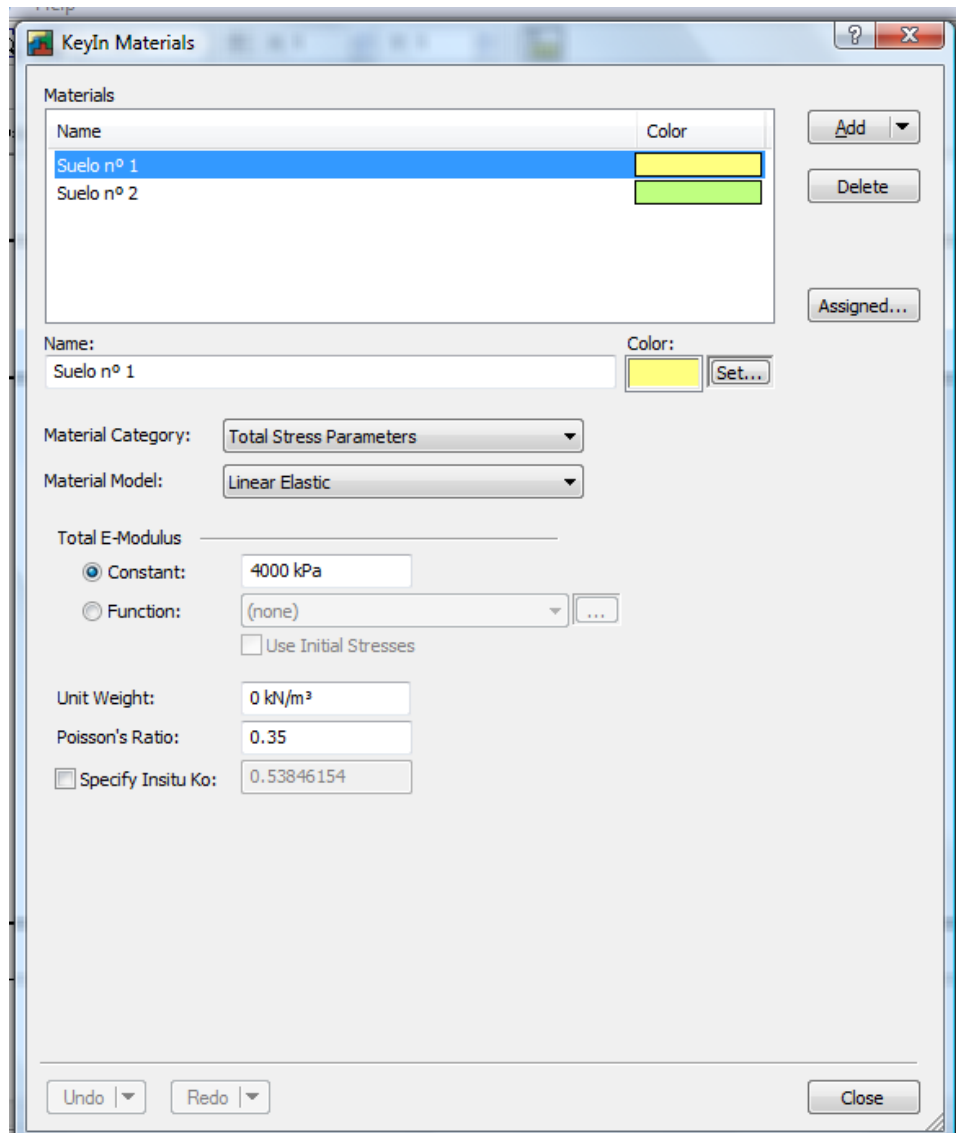
Seleccionamos para los dos casos Total Stress Parameters

Para los parámetros resistentes se colocan tal como se indica en las dos siguientes figuras contenida en la tabla adjunta:

TABLA 3. Parámetros del terreno			
Denominación	γ (kN/m ³)	E (kN/m ²)	ν
Suelo nº 1	17	4000	0,35
Suelo nº 2	18	3000	0,35

Indicar que los valores de los módulos de elasticidad son bastante bajos

Para el suelo nº 1 se indican los datos en la siguiente imagen:



KeyIn Materials

Materials

Name	Color
Suelo nº 1	Yellow
Suelo nº 2	Green

Name: Suelo nº 1 Color: Yellow Set...

Material Category: Total Stress Parameters

Material Model: Linear Elastic

Total E-Modulus

☒ Constant: 4000 kPa

☐ Function: (none) Use Initial Stresses ☐

Unit Weight: 0 kN/m³

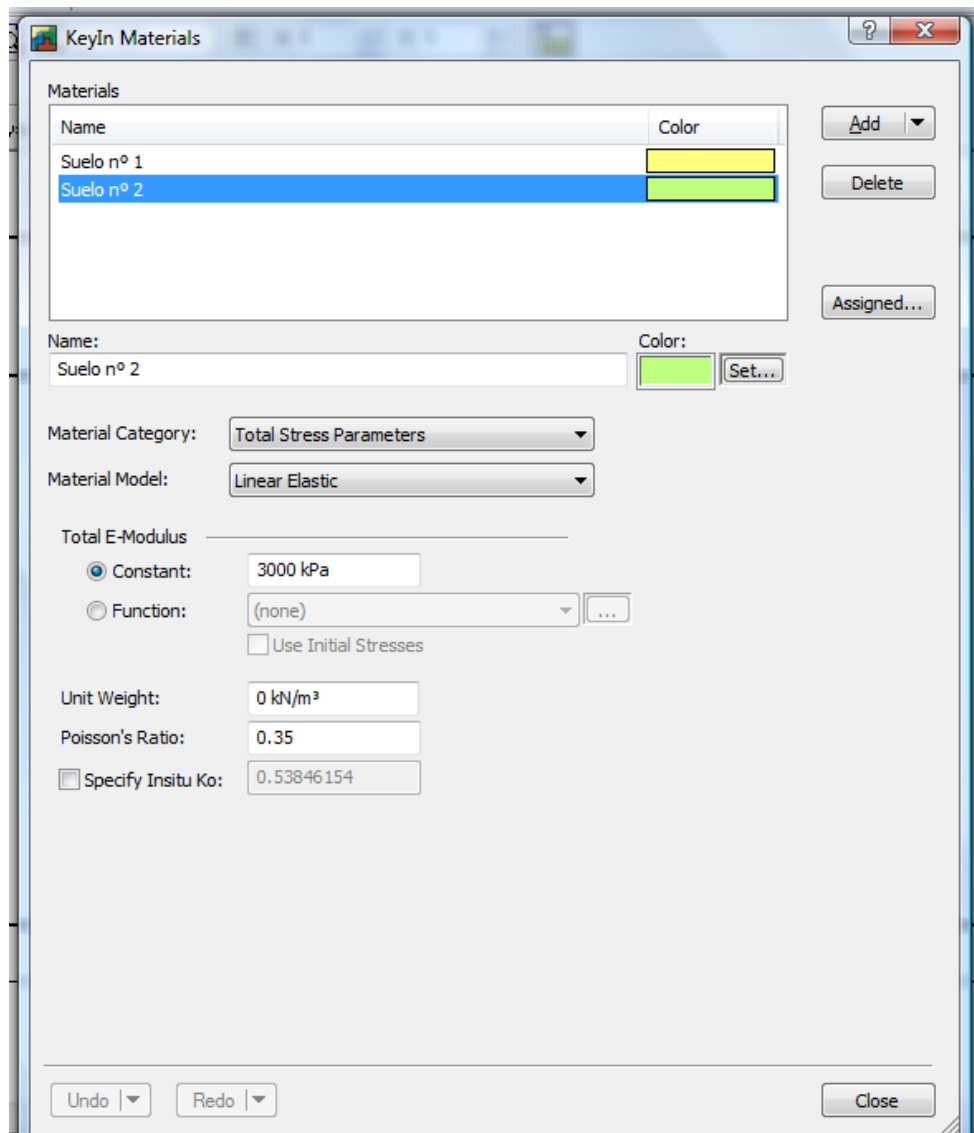
Poisson's Ratio: 0.35

☒ Specify Insitu Ko: 0.53846154

Undo Redo Close

Se indica que el peso específico no se deja a 0, ya que así sólo se tendrán en cuenta las tensiones provocadas por la carga de la cimentación y no las sumadas del peso del terreno+peso de la cimentación.

Para el suelo nº 2 análogamente se indica en la figura adjunta:

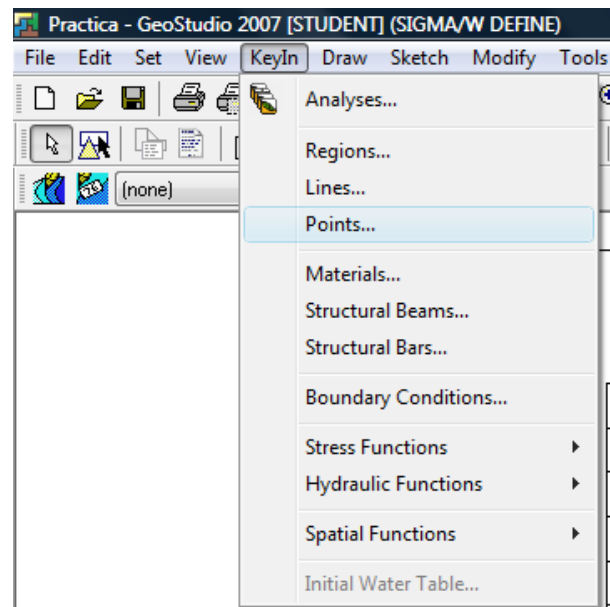


Pulsamos **Close**.

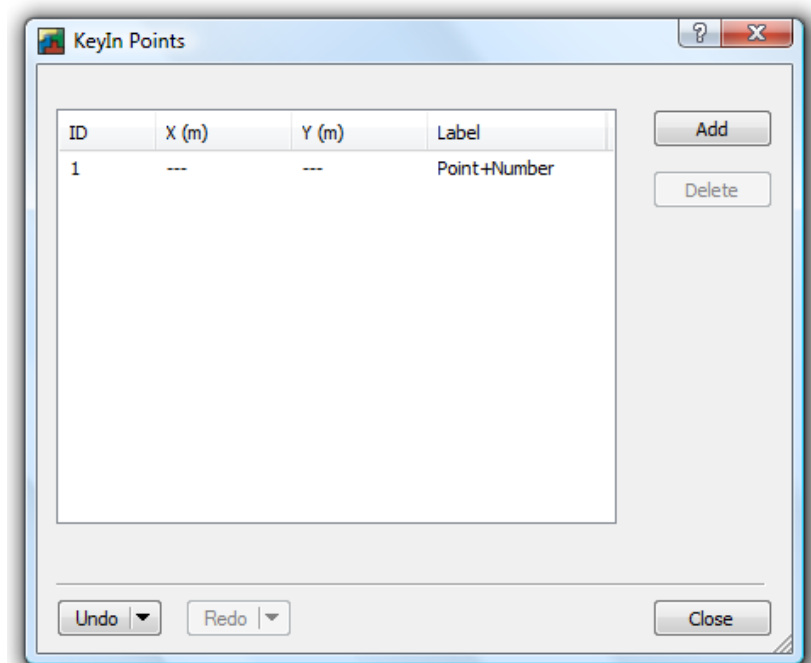
2.8 Introducir los puntos de los contornos

Para definir los contornos del perfil, vamos a introducirlos numéricamente aunque existe una opción de introducción de forma gráfica, se procede de la siguiente forma numérica más precisa.

- Seleccionar **Points** en el menú desplegable **KeyIn.**, tal como se ve en la siguiente figura.



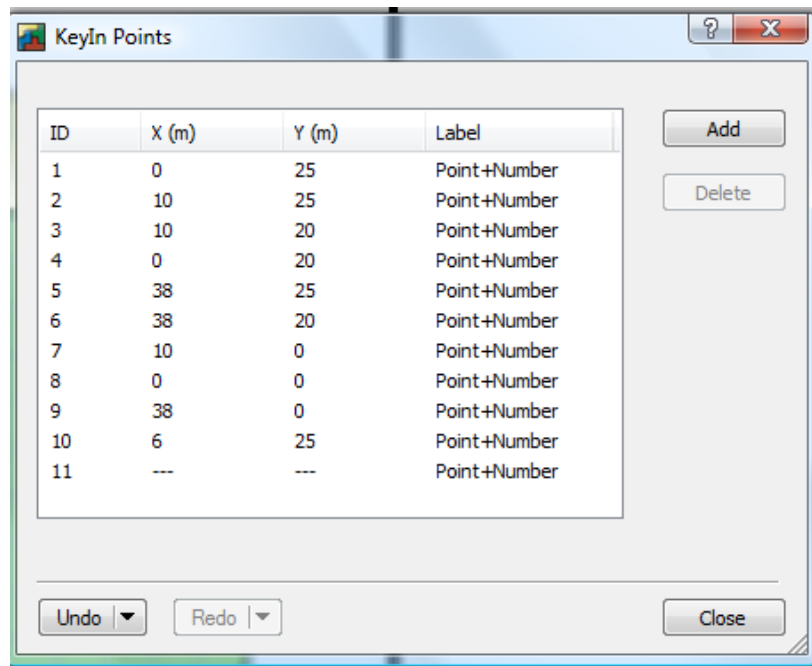
- Apareciendo el siguiente cuadro de diálogo



- En la casilla ID se introduce automáticamente el número de orden, en las otras dos las coordenadas x e y respectivamente y en la lista desplegable se activa la opción Point+Number
- Se introducen los siguiente puntos que definen la geometría.

TABLA 4. Puntos del contorno.		
1	0	25
2	10	25
3	10	20
4	0	20
5	38	25
6	38	20
7	10	0
8	0	0
9	38	0
10	6	25

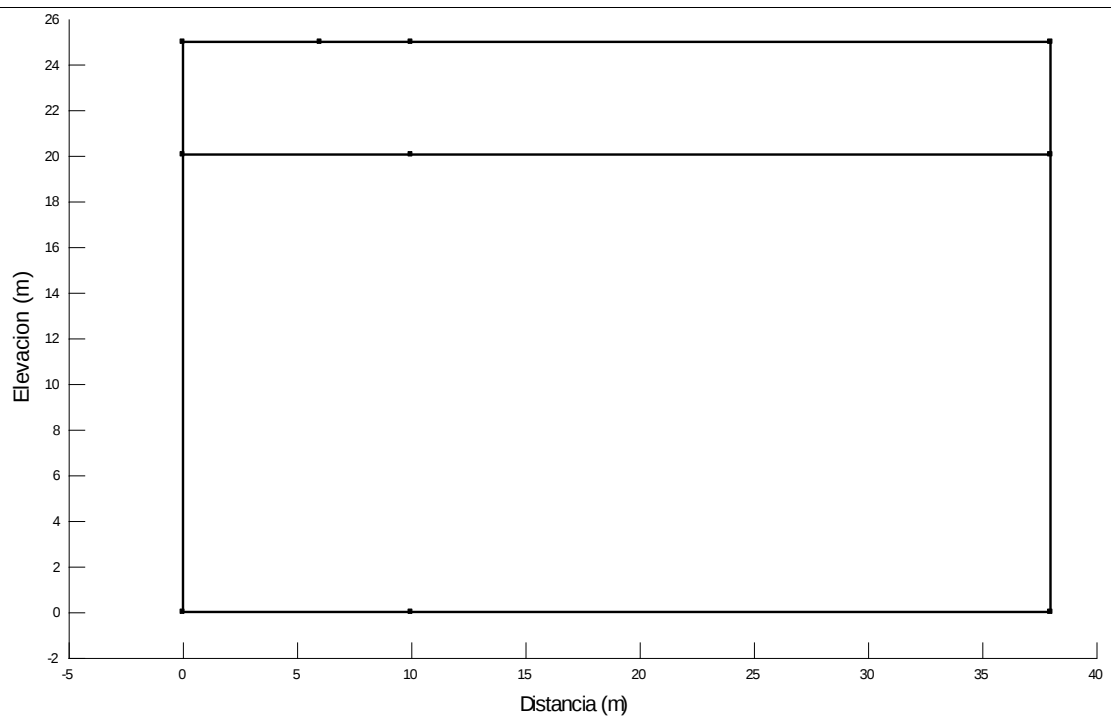
- Tras la introducción de cada punto se pulsa **Enter** y se introducen en la lista, para ver los puntos en la pantalla se pulsa **Apply** y ya se pueden visualizar.
- Existe también las opciones **Add** y **Delete** para introducir y borrar números respectivamente



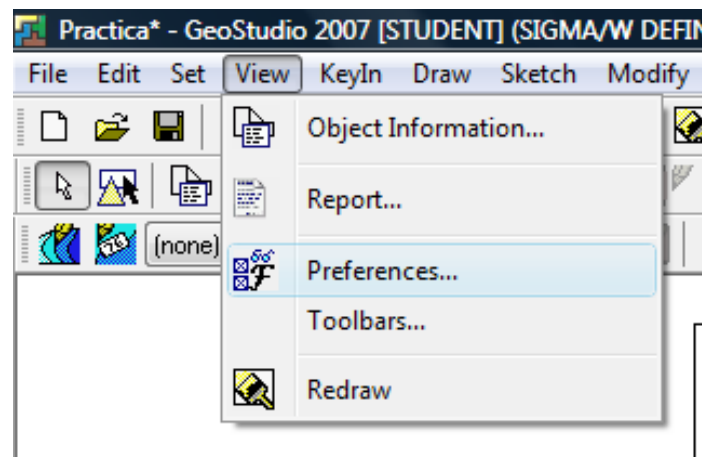
ID	X (m)	Y (m)	Label
1	0	25	Point+Number
2	10	25	Point+Number
3	10	20	Point+Number
4	0	20	Point+Number
5	38	25	Point+Number
6	38	20	Point+Number
7	10	0	Point+Number
8	0	0	Point+Number
9	38	0	Point+Number
10	6	25	Point+Number
11	---	---	Point+Number

- La introducción de los datos termina pulsando **Close**.

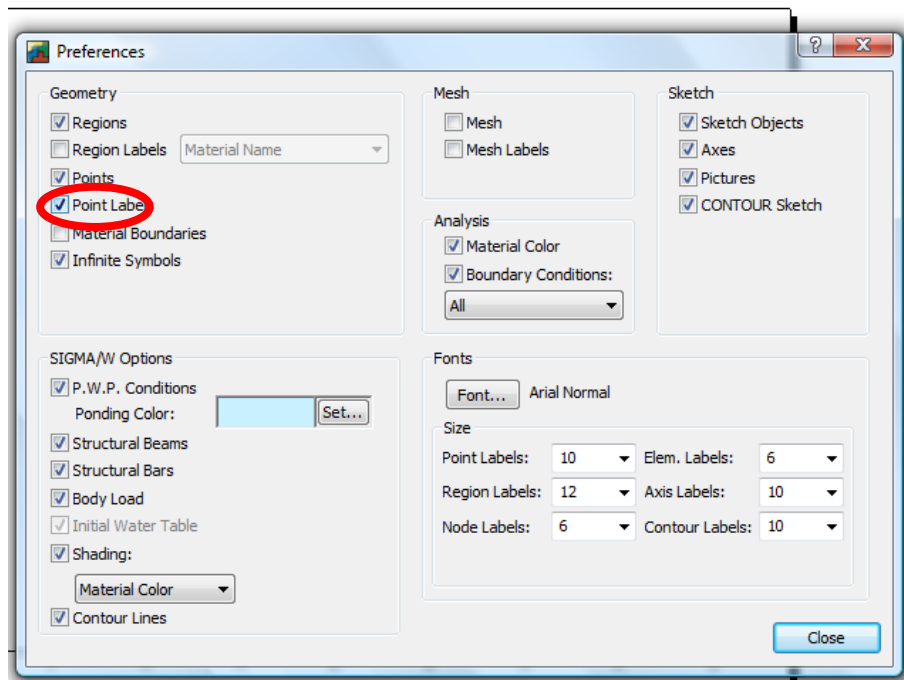
La introducción de los puntos en este orden da como resultado lo indicado en la siguiente figura:



Para ver la numeración de los puntos View/Preferences como se ve en la siguiente figura

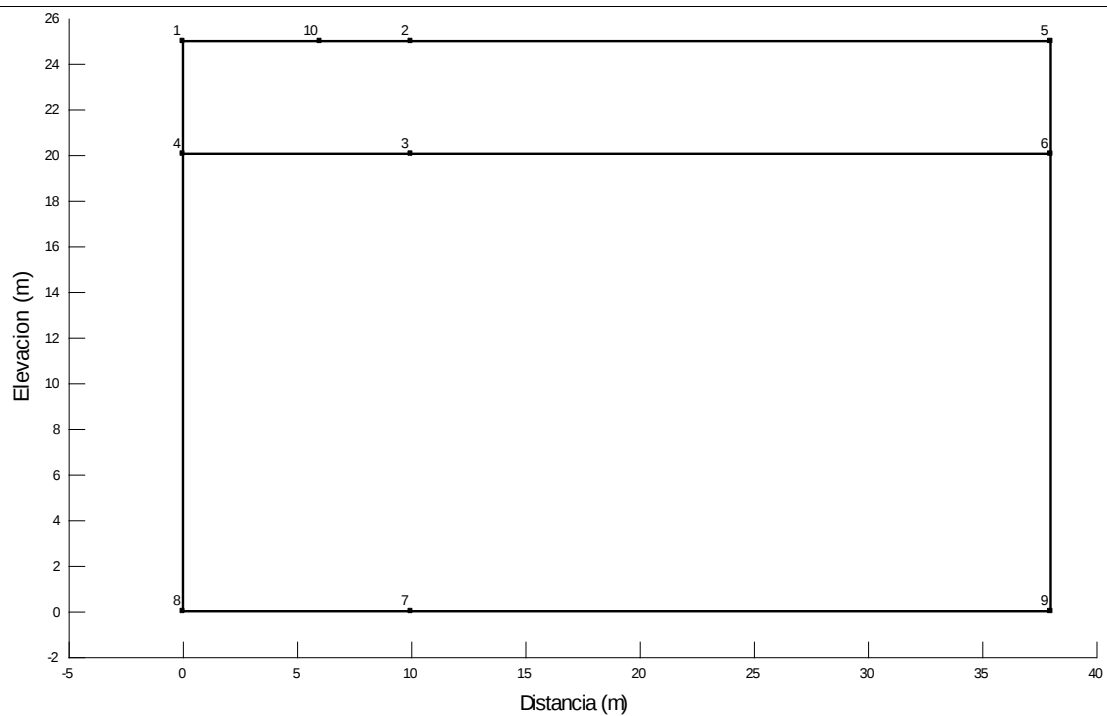


Después de pulsar esta opción nos aparece el siguiente cuadro de diálogo:



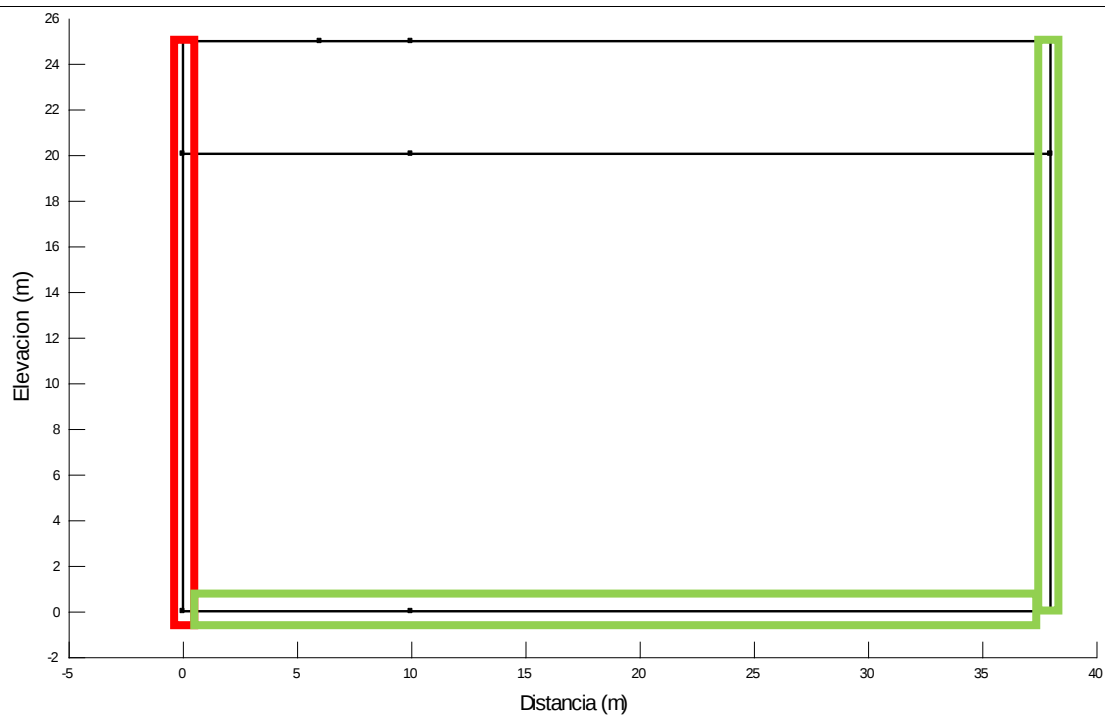
En este cuadro hay muchas opciones que veremos posteriormente, activamos la opción **Point Labels**

Ya nos aparecen los puntos y su numeración.



2.9 Condiciones de Contorno

Tras definir las propiedades de los terrenos que van a estar implicados en el cálculo vamos a definir las condiciones de contorno que definen las fronteras del modelo matemático que vamos a construir



Se definen las siguientes condiciones de contorno:

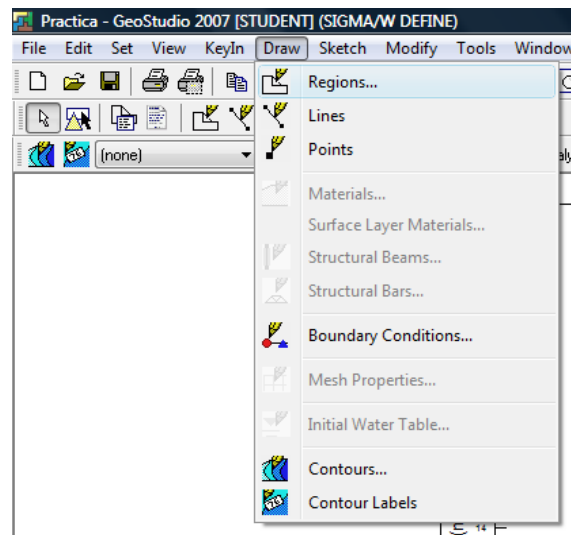
- Zonas de puntos del terreno con desplazamiento horizontal impedido, que corresponde a zonas del eje de simetría del problema, de color rojo..
- Zonas de puntos del terreno que corresponden a zonas con coacción al desplazamiento horizontal y vertical, en verde, que corresponden a los límites del dominio que no corresponden al eje .

2.10 Regiones

Como modificación fundamental de la metodología de introducción de las zonas con los distintos tipos de suelos de versiones anteriores del programa, en esta versión 2007 se mantiene el innovador método de las regiones que puede introducirse de dos formas identificando puntos o mediante una herramienta CAD que dispone el programa, usaremos esta última opción.

Se van a definir cuatro regiones con diferencias de mallado y de condiciones de contorno.

- Seleccionamos **Region** en el menú desplegable **Draw.**, tal como se ve en la siguiente figura.

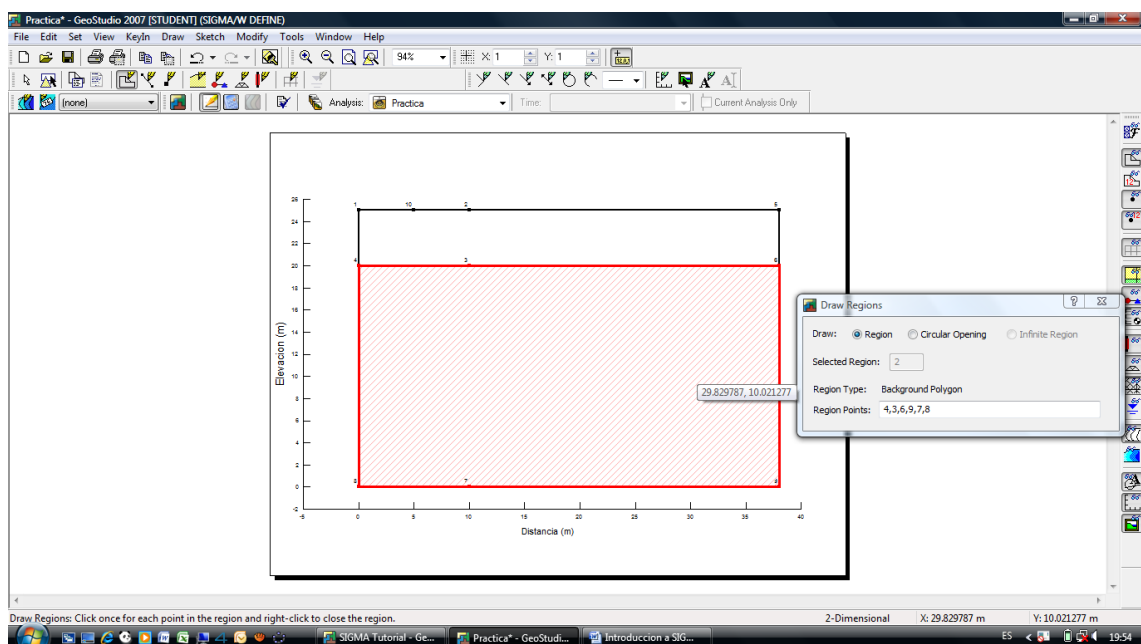
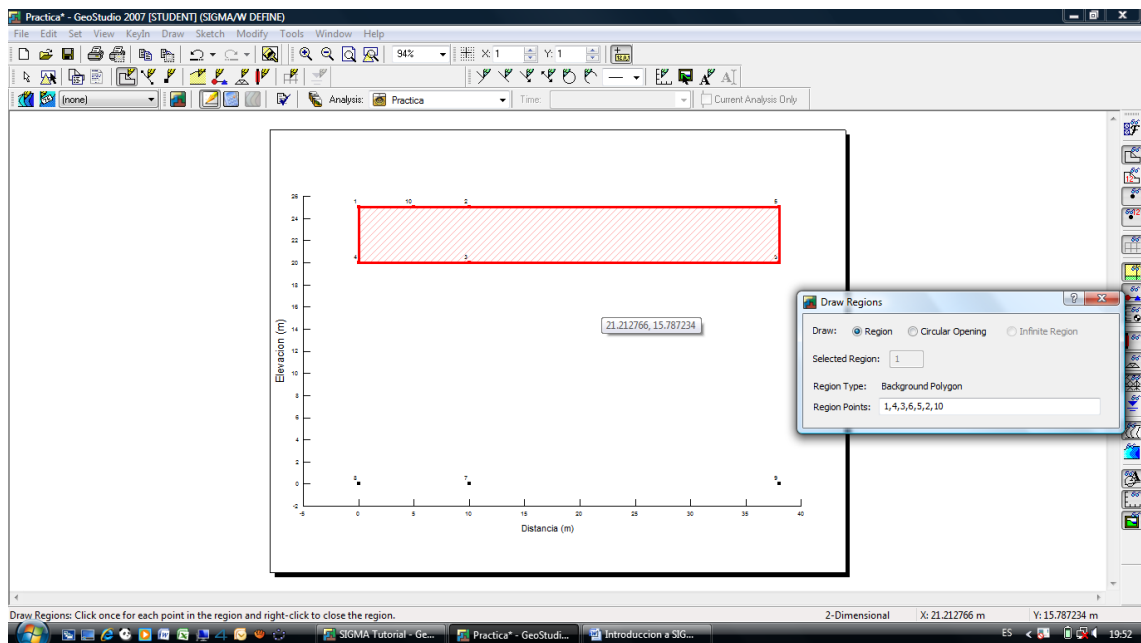


O pulsando en el icono de la barra de herramientas marcado con un rectángulo en rojo

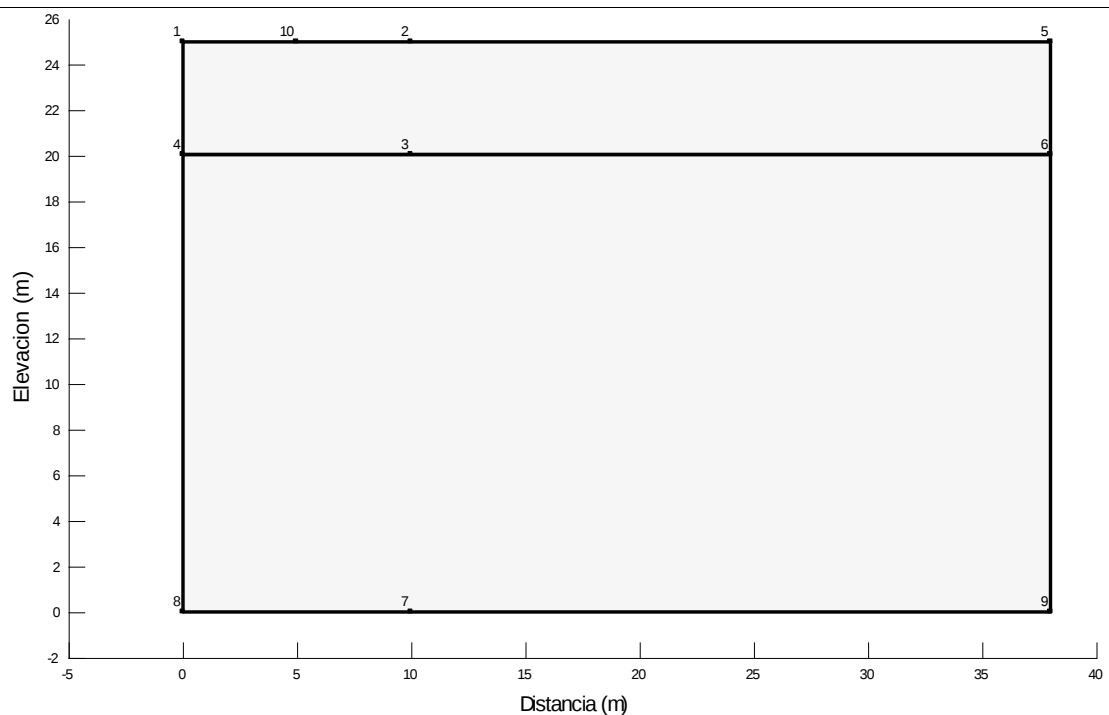
Las regiones definen zonas con materiales de distinta permeabilidad y zonas con el mismo material pero distintas condiciones de contorno.

- Se va pulsando con el botón izquierdo del ratón los puntos que definen el contorno cerrando el contorno en el punto de origen

A continuación se visualiza la secuencia de creación de regiones



Nos quedaría algo parecido a los representado en al siguiente figura:

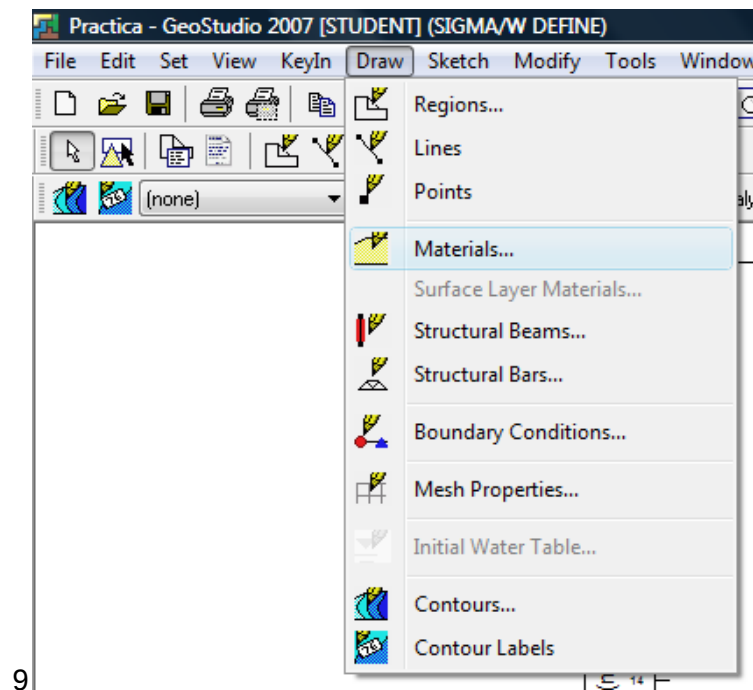


Es importante tener en cuenta en la creación de regiones que en una misma línea no nos podemos dejar puntos geométricos intermedios sin incluir en la región, ya el modelo no sería congruente y nos aparecería un error de contorno.

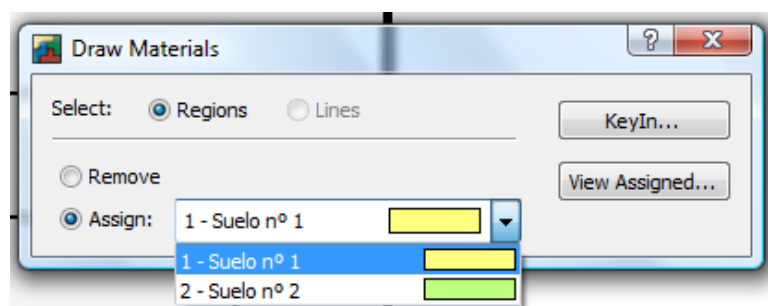
2.11 Asignación de materiales

Una vez hemos definido las regiones, tenemos que asignar propiedades de los suelos que definen el modelo del problema que vamos a manejar, para ello seguimos los siguientes pasos:

En la opción **Draw** del menú seleccionamos la opción **Materials**, tal como se ve en la siguiente figura.



Tras lo cual aparecerá la siguiente ventana.

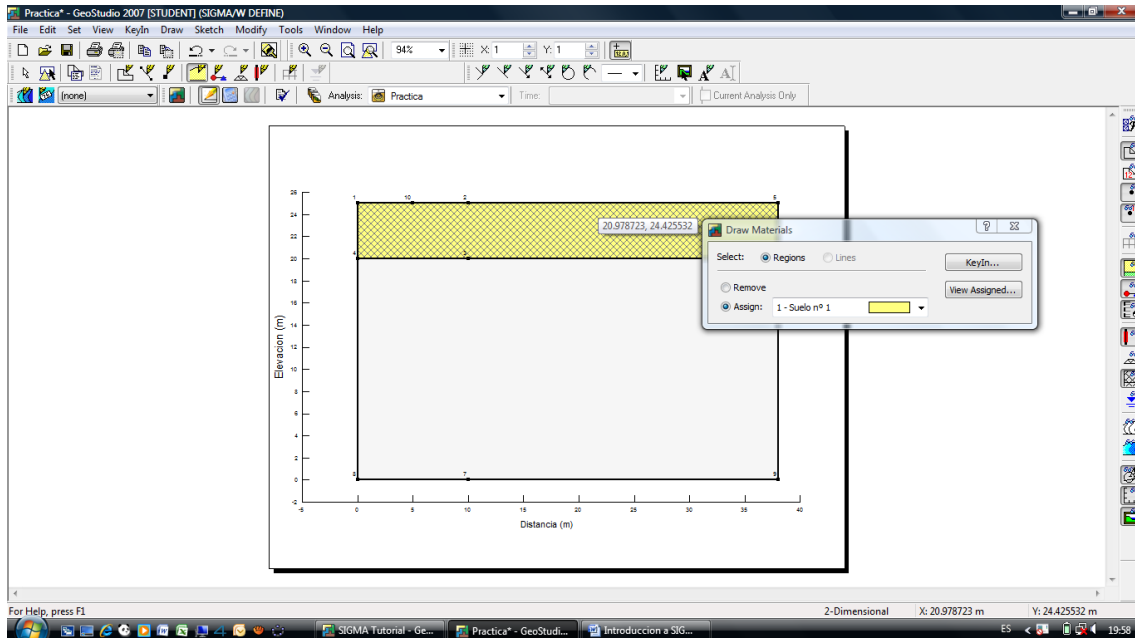


En la zona central inferior hay una lista desplegable, en ella seleccionaremos el tipo de suelo que queremos asignar a una región en concreto, en este caso sólo tenemos dos suelos.

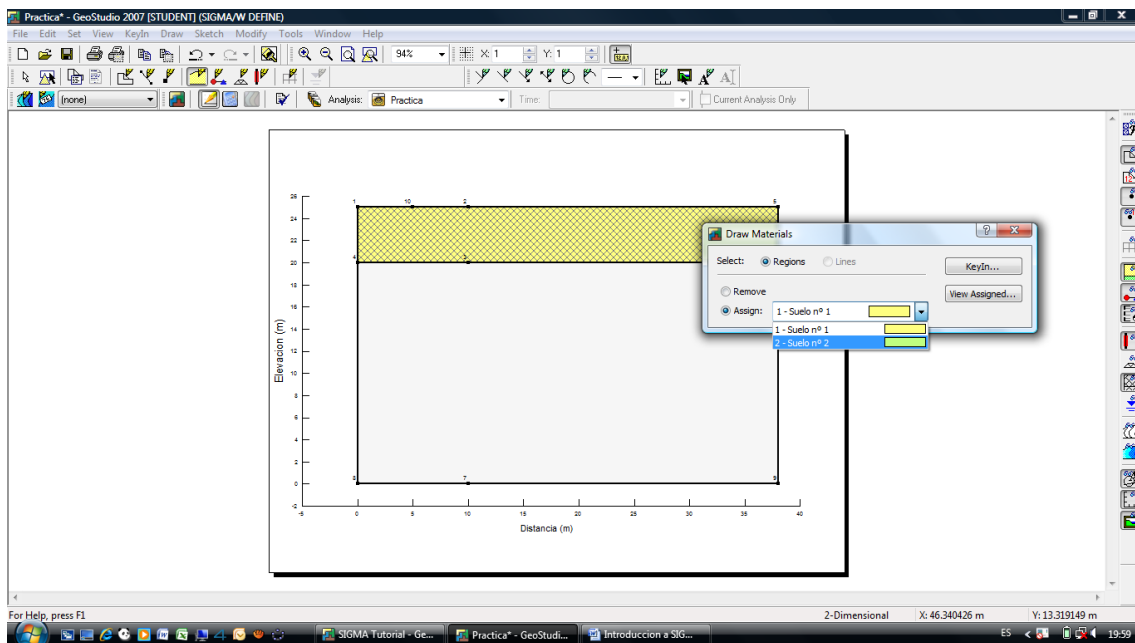
A la izquierda de esta hay dos opciones: Remove y Assign, que se usan para eliminar una asociación entre región y tipo de suelo la primera y para asignar las propiedades de un suelo a una región determinada la otra.

A la vez que se visualiza la ventana aparecerá un cuadrado oscuro en la punta del cursor que nos servirá para indicar a que zonas asignamos una tipo de suelo y a cuales le asignamos otro, siempre dentro de la zona acotada por una región. En nuestro ejemplo sólo hay un tipo de suelo.

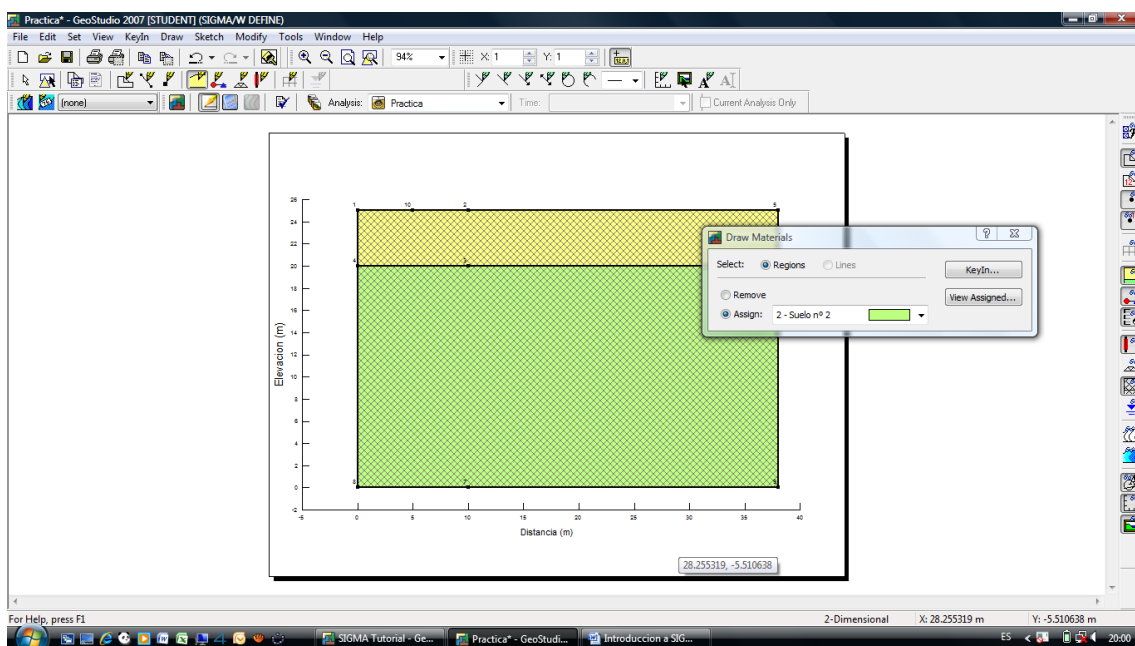
Pinchando sucesivamente en las demás regiones, tal como se ve en la figura adjunta.



Cambiamos el tipo de material al tipo Suelo nº 2, tal como se ve en la siguiente imagen:



Y continuamos el procedimiento

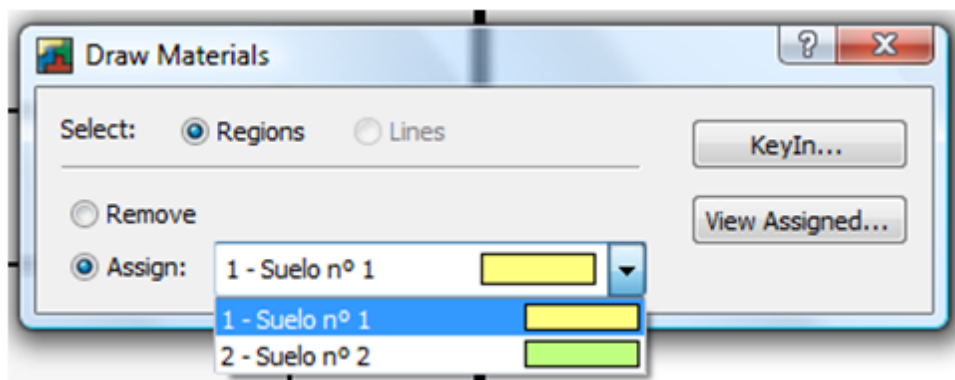


Después de pinchar en todas las regiones en las que queremos asignar el tipo de suelo con sus correspondientes propiedades asociadas.

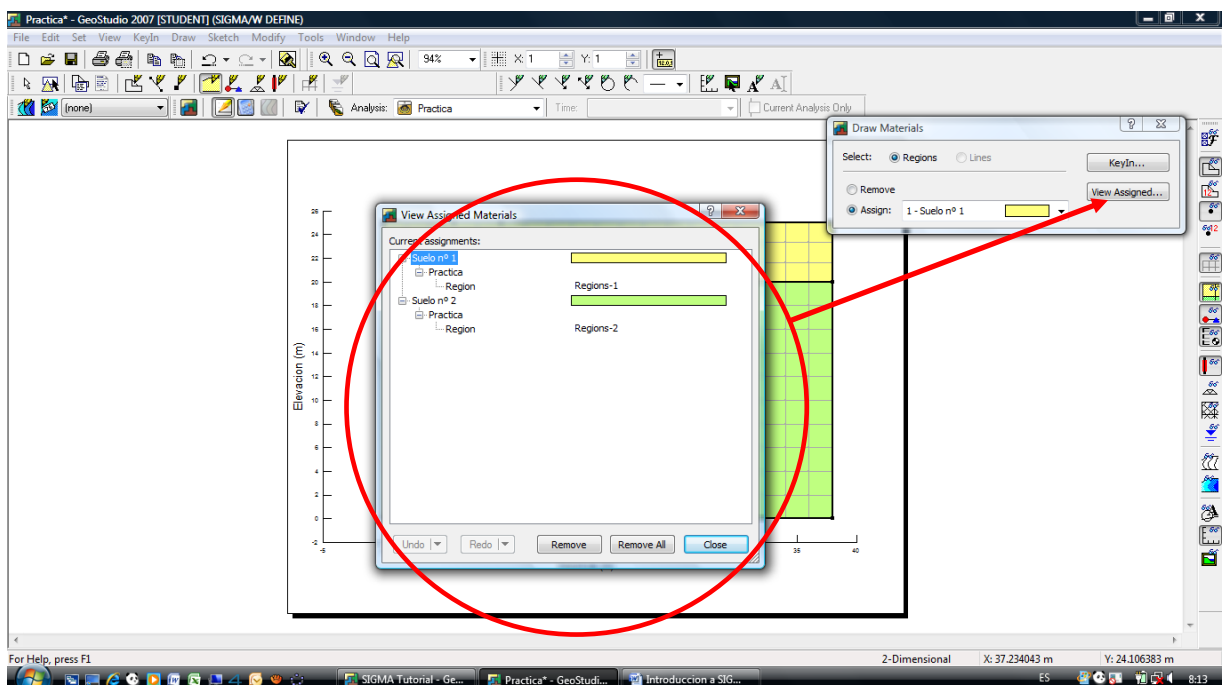
Obtendremos un resultado similar al obtenido en la salida gráfica siguiente:

Por lo que hemos asignado propiedades de suelo a las regiones que habíamos definido anteriormente.

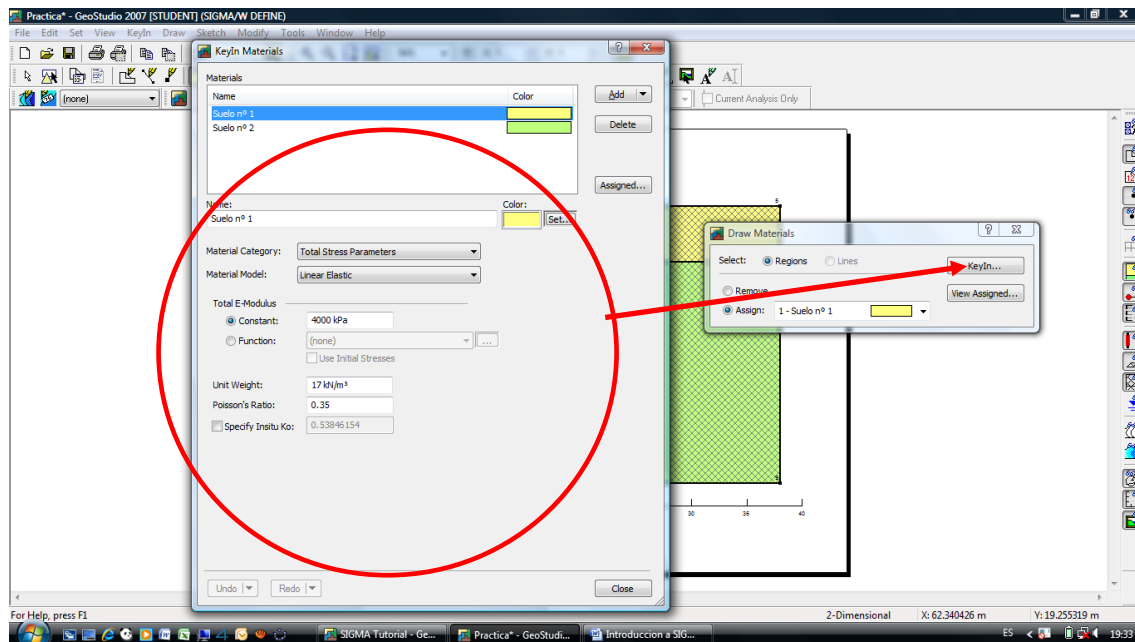
Existen dos opciones interesantes en la ventana de asignación de suelos, estas se indican en la siguiente figura



Estas opciones son, **View Assigned** que si se pulsa aparece una ventana con las regiones que tienen asignado un determinado suelo tal como puede apreciarse en la siguiente figura.



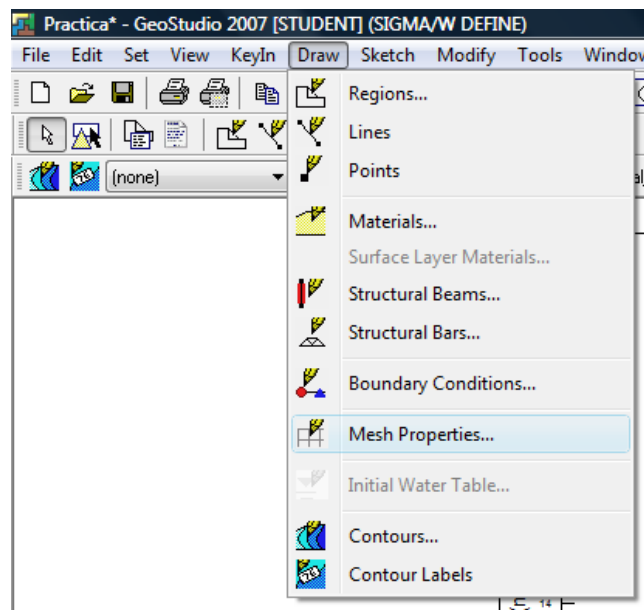
Y si pulsamos la opción **KeyIn** aparecerán las opciones que definen un suelo determinado, por lo que podremos cambiar sus propiedades e incluso generar suelos nuevos sin salir de esta opción, se puede apreciar en la siguiente figura:



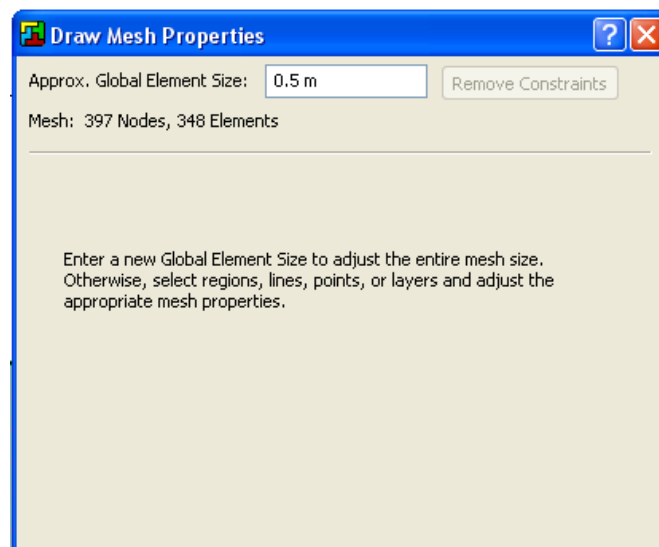
Para salir de esta sub opción pulsamos **Close** y una vez terminada la introducción de suelos pulsamos las aspas de la zona superior derecha de la ventana de opciones de introducción de suelos.

2.12 Generación y modificación de la malla del modelo de elementos finitos.

Para proceder a la modificación o a la creación de la malla del modelo de elementos finitos procedemos a la elección de la opción **Mesh Properties** de la opción **Draw** del menú principal tal como se puede apreciar en la figura siguiente.

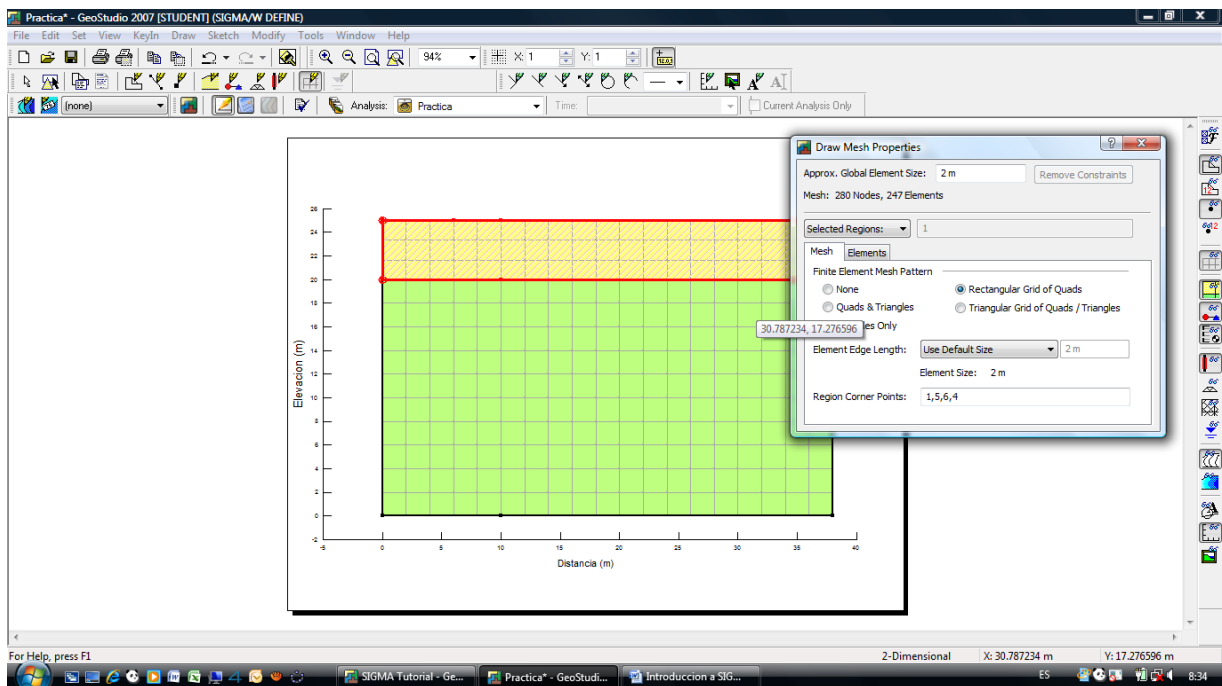


Una vez elegida la opción nos aparecerá la siguiente ventana

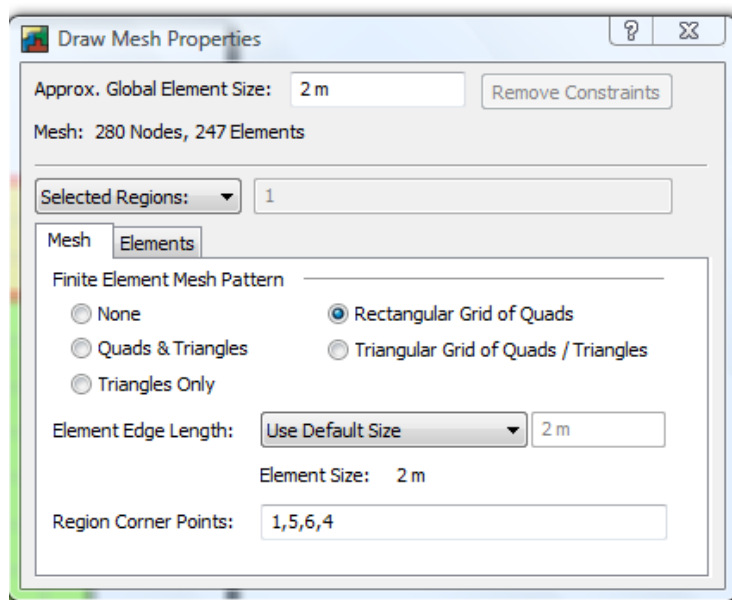


En la parte superior nos aparecerá una casilla con la etiqueta **Global Element Size**, aquí indicamos la separación entre los elementos de la malla de elementos finitos para el sistema de formado por las mallas de todas las regiones en lugar del valor que salga por defecto le introducimos un valor de **2 metros** (por restricciones de la versión Student).

A continuación pulsamos sobre una de las regiones generadas, esta se nos remarcará y aparecerá una nueva ventana con una serie de nuevas opciones para el ajuste de la malla.



Tal como se ha comentado al pinchar con el puntero del ratón una de las regiones, esta se remarca y aparece la siguiente ventana:



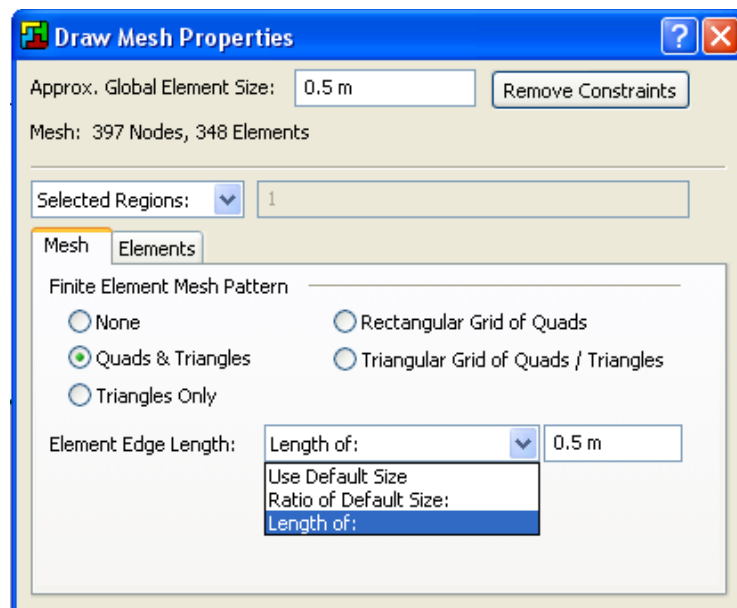
La opción **Global Element Size** es la misma que hemos visto anteriormente

En la pestaña **Mesh** nos encontramos con definiciones geométricas de la malla que vamos a definir o a modificar, para nuestro caso elegimos la opción **Rectangular & Quad** (cuadrados y triángulos), existen otras opciones :

- Triangles Only (malla de triángulos)
- Quad & Triangles
- Rectangular Grid of Quads. (malla rectangular de cuadrados)
- Triangular Grid of Quads/Triangles, (malla triangular de Cuadrados o Triángulos.

Se recomienda al lector experimentar con estos modelos de mallas para elegir la que mejor se adapte al modelo a construir.

Como la versión del programa está limitada por el número de nudos a usar, elegiremos esta por defecto, ya se ajusta a un modelo aceptable.



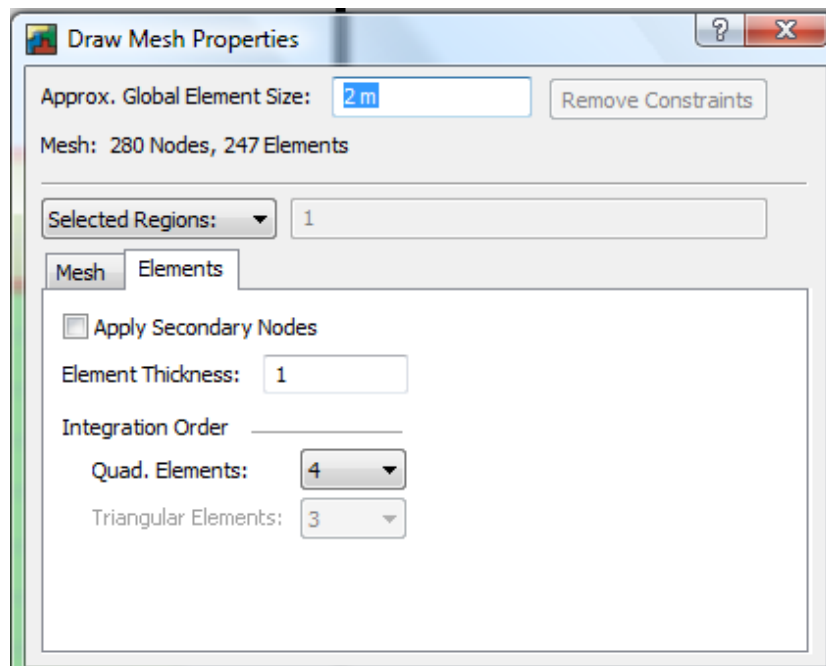
En la lista desplegable **Element Edge Length** podemos cambiar la separación de los elementos de la malla particularizándola para la malla de la región en la que estamos trabajando.

Hay tres opciones:

- **Use Default Size** (opción por defecto de la casilla Global Element Size)
- **Ratio of Default Size** (multiplica por el valor asignado el que tengamos en la casilla de Global Element Size).

- **Length of:** podemos introducir el valor que más nos interesa para el caso particular de la malla en la que estamos trabajando.

En la otra pestaña **Elements** aparecen las siguientes opciones:



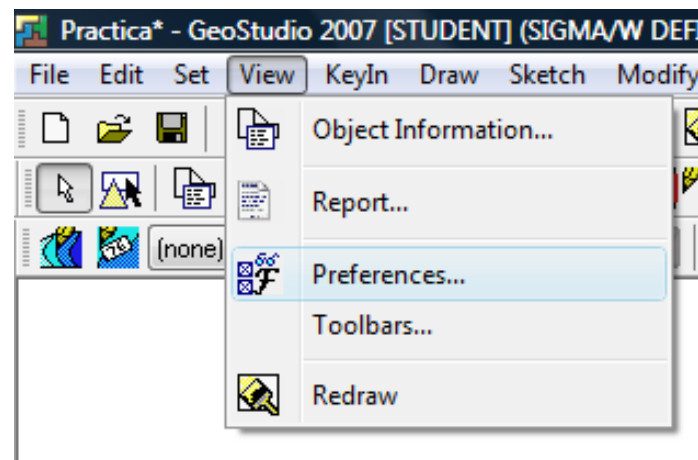
Estas opciones nos sirven para actuar sobre el elemento que define el modelo, dejamos las opciones que aparecen en la figura de arriba.

Una vez que tengamos modificadas las propiedades de la malla pinchamos con el puntero del ratón sobre la región sobre la que estamos trabajando.

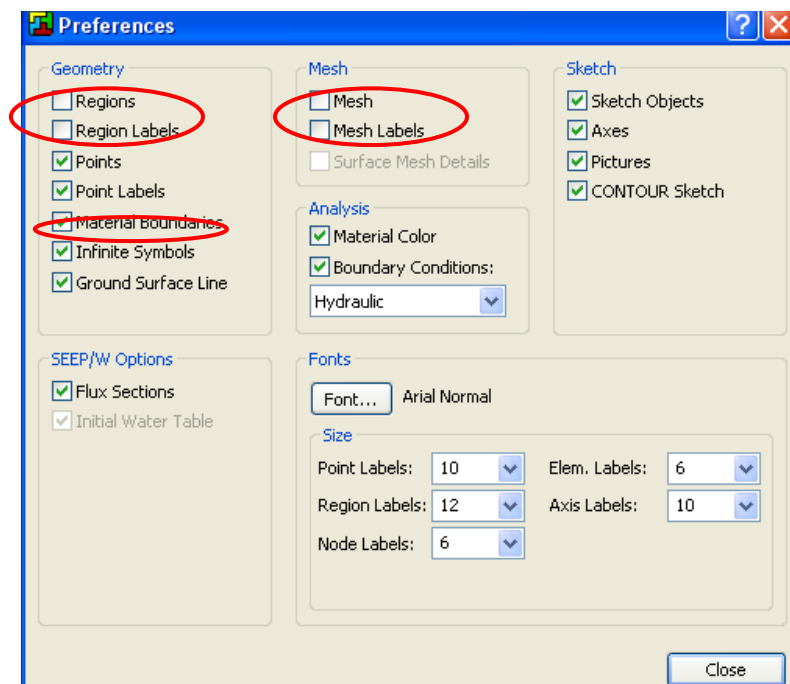
Si después pinchamos sobre otra región nos aparecerán las propiedades de esta nueva región para si es preciso modificarlas.

Para salir de la opción pulsamos el aspa general de cerrar ventanas de Windows.

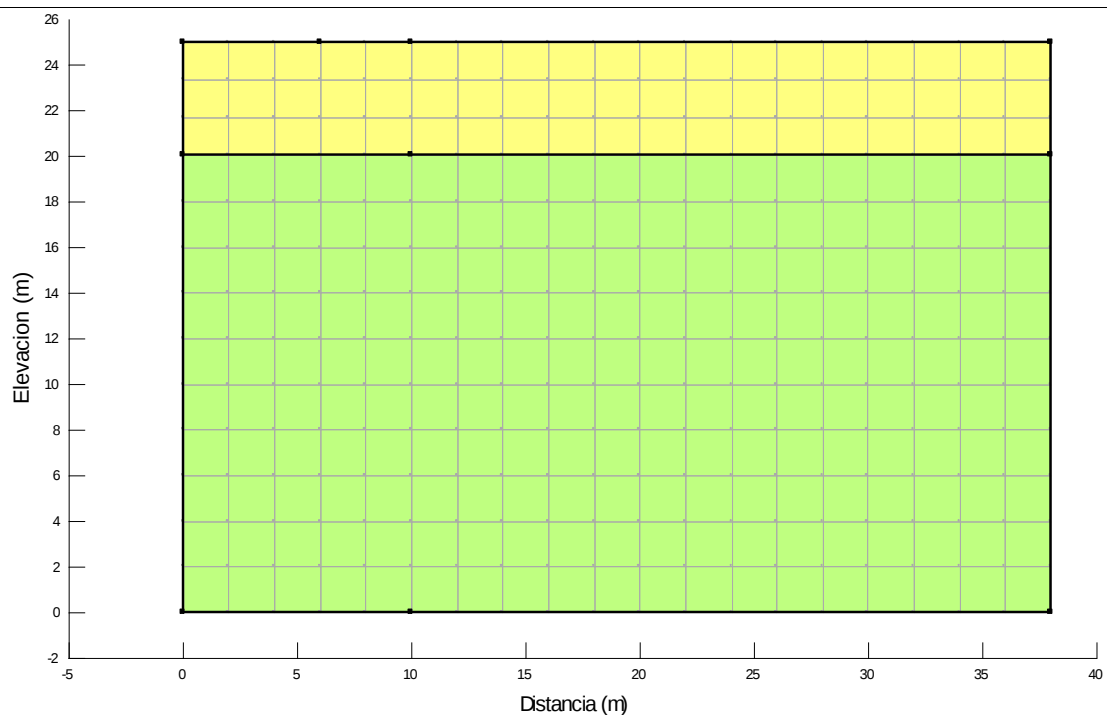
Dentro de las opciones del programa está la de ocultar las divisiones de las regiones mediante el comando **Preferences** de la opción de menú **View**, tal como se ve en la figura adjunta:



Nos aparece el siguiente cuadro de diálogo, desactivamos las opciones **Regions**, **Regions Labels**, **Mesh**, **Mesh Labels** y activamos **Material boundaries**, con lo que el aspecto estético del modelo aparecerá más claro.



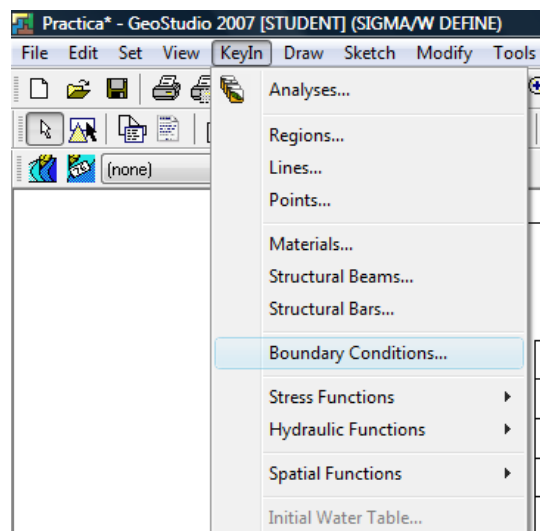
Lo que nos daría un resultado tal como se ve en la siguiente figura:



2.13 Tipificación de la condiciones de contorno.

Para la definición de los tipos de condiciones de contorno una vez la tengamos definidas en nuestro boceto se van a poder implementar de la siguiente forma:

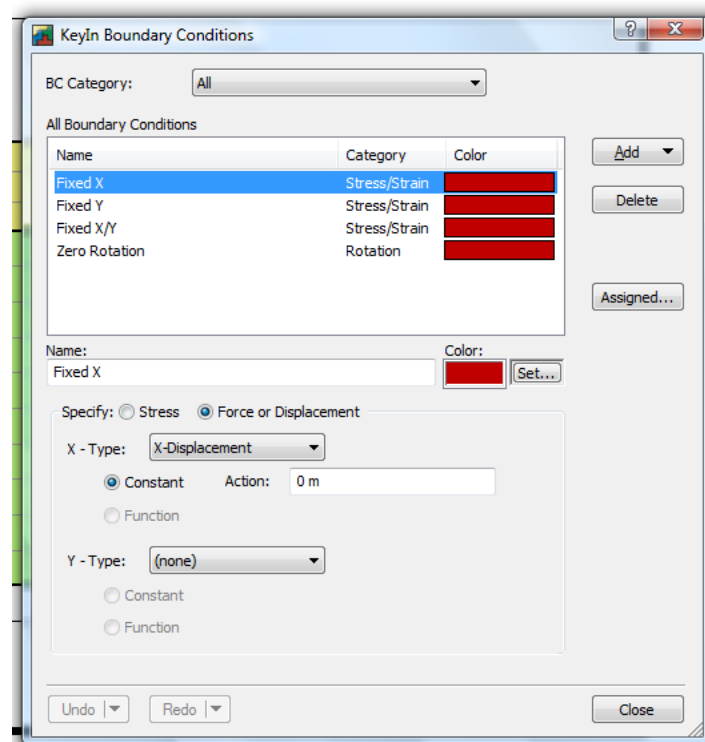
En el menú principal en **KeyIn** en la opción **Boundary Conditions** tal como se ve en la figura adjunta.



Nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo donde definiremos las siguientes condiciones:

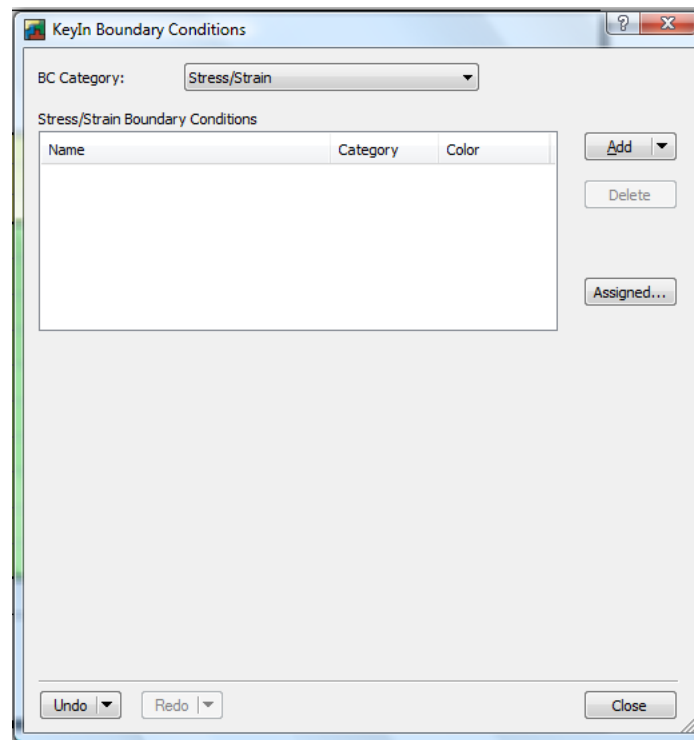
- **Centro de simetría $x=0$** con esta condición impedimos movimientos en la dirección horizontal pero no en la vertical, donde se desarrollarán los asientos.
- **Contornos externos $x=0$ $y=0$** en esta condición de contorno impedimos los movimientos en el borde exterior del nuestro modelo
- **Presión Transmitida** en este caso consiste en definir la zona donde se va a aplicar la carga en nuestro caso 40 kPa.

Las opciones del cuadro de diálogo asociado a esta opción son:



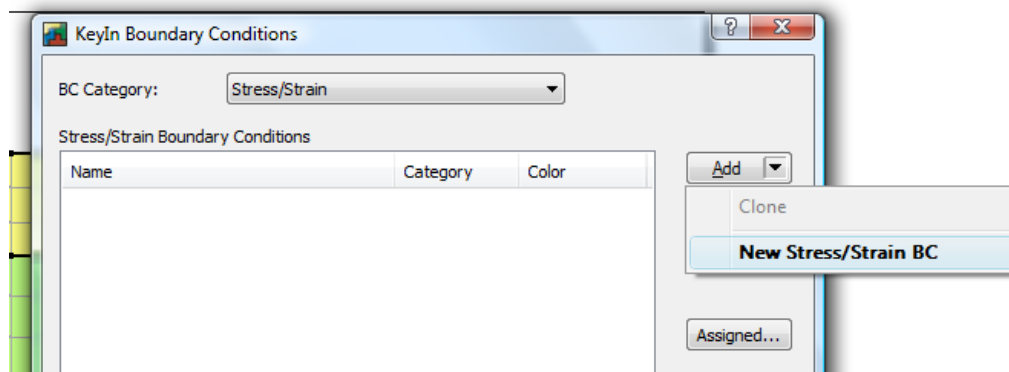
- **BC Category** elegimos All y borramos todas las definiciones por defecto y seleccionamos Stress/Strain
- **Add** y **Delete** tienen las funciones de introducción y eliminación de condiciones de contorno.

El resultado es el que se indica en la siguiente figura:

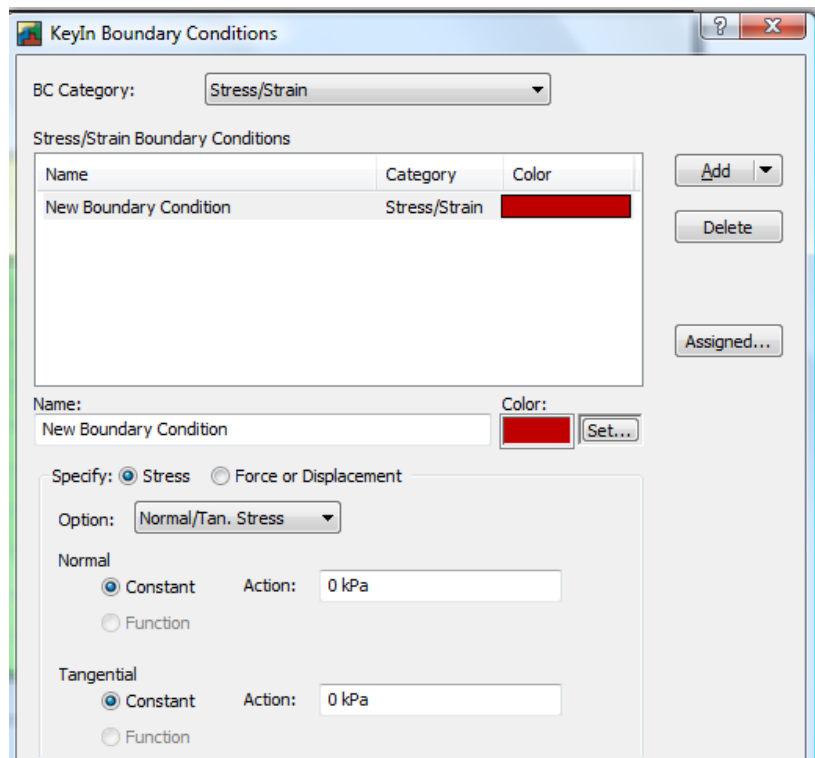


- En la casilla **Name** introducimos la denominación de la condición de contorno que queremos definir y en **Color** indicamos con que color queremos identificar la condición de contorno que estamos implementando.

Para introducir nuevas condiciones de contorno una vez seleccionado en **BC Category Stress/Strain** en **Add** seleccionamos **New Stress/Strain BC**.



Nos encontramos varios tipos de condiciones de contorno con sus especificaciones correspondientes, tal como se describen a continuación, algunas ya se pueden observar en la figura adjunta.

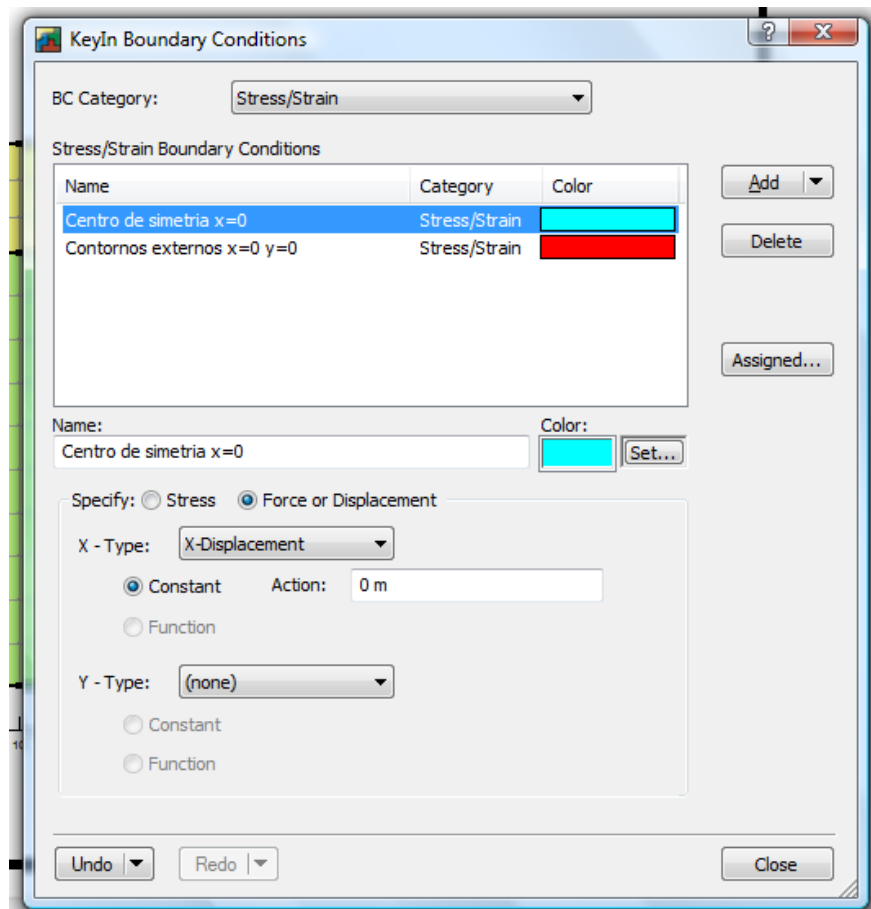


- **Stress** condiciones de contorno asociadas a tensiones transmitidas al terreno.
- **Force or Displacement** condiciones de contorno correspondientes a movimientos de puntos concretos del terreno o bien a cargas de fuerza aplicadas a caras o a puntos concretos.

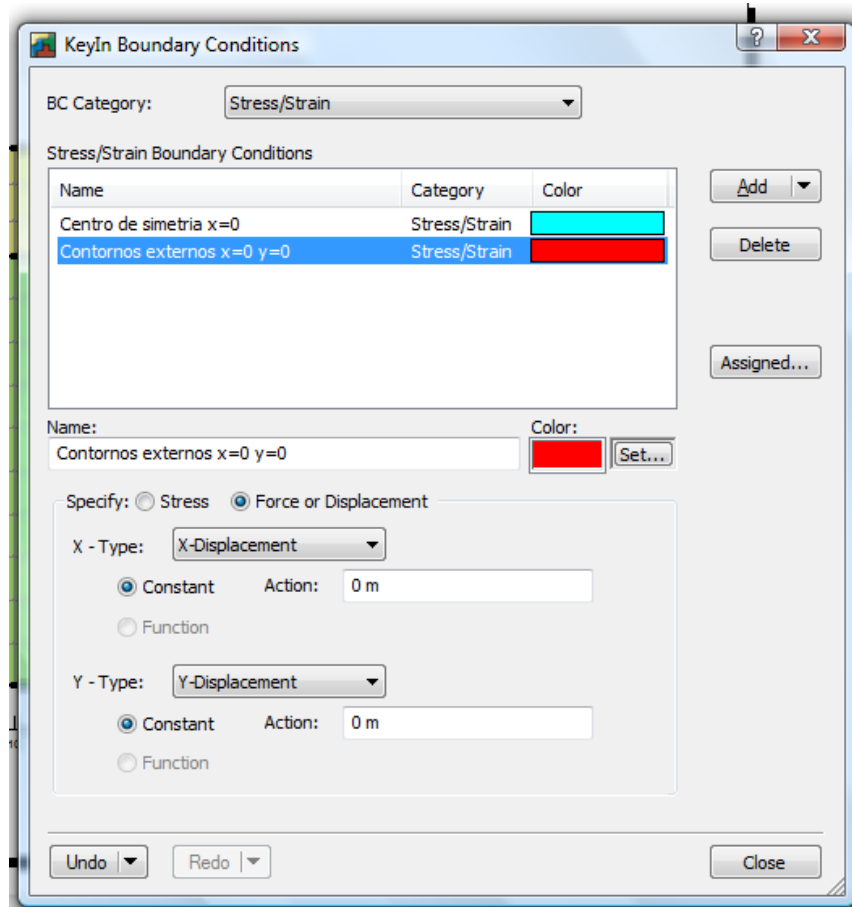
A continuación definimos las condiciones de contorno que vamos a usar para definir el modelo.

2.14 Valoración de las condiciones de contorno.

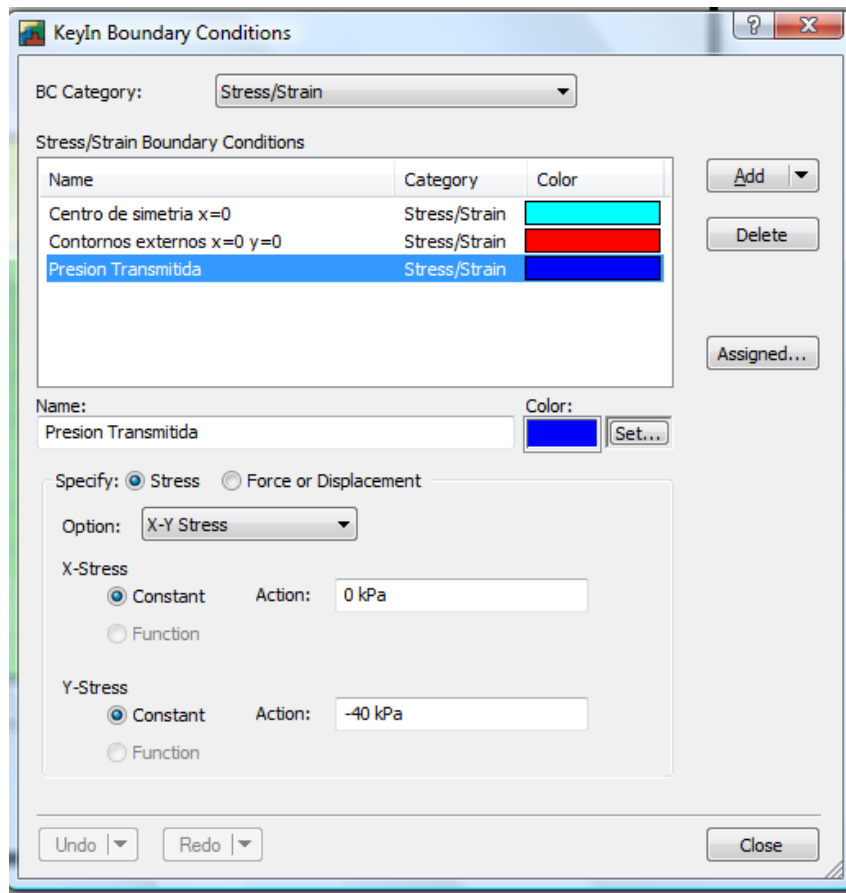
Para el caso de la condición de movimientos en el eje de simetría estarían impedidos en el eje x no en el eje y, que coincide con el de los asientos :



Para el caso del resto de contornos exteriores $x=0$ e $y=0$



Para el caso de la carga:

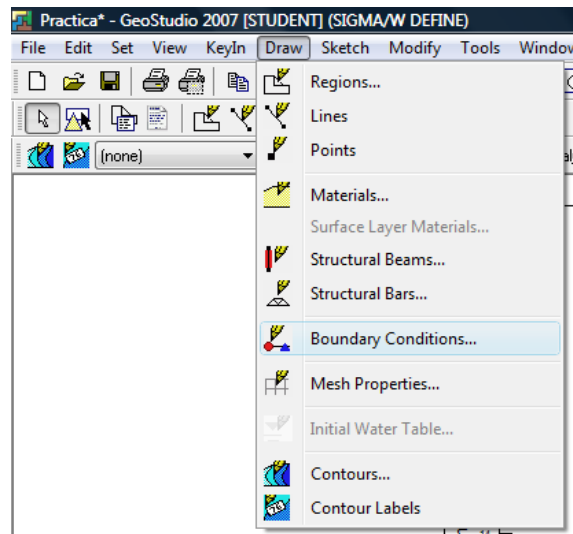


El valor de la carga es -40 kPa, el signo negativo significa que la carga es vertical en el sentido de la gravedad.

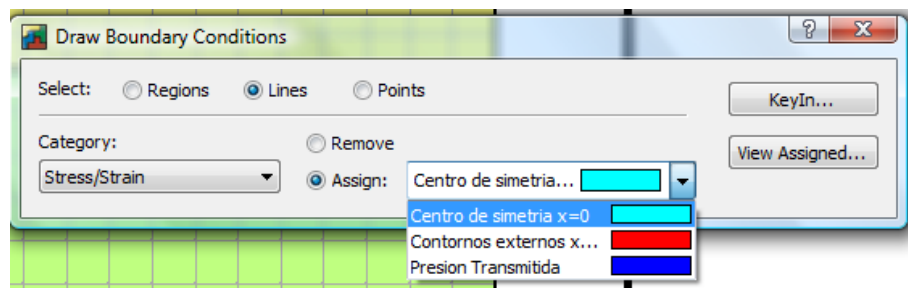
2.15 Aplicación de las condiciones de contorno.

Una vez definidos los tipos de contornos que aparecen en el problema que vamos a estudiar, vamos a proceder a indicar a nuestro modelo en que zonas se dan unas condiciones de contorno determinadas.

En el menú principal en **Draw**, seleccionamos la opción **Boundary Condition**, tal como vemos en la figura de abajo.



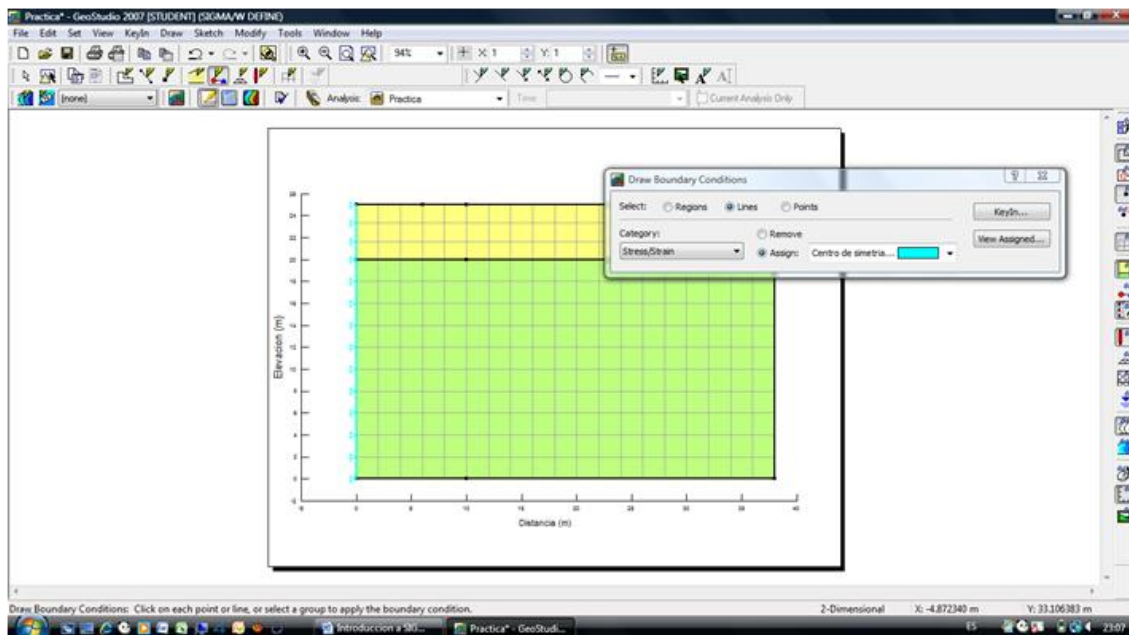
Seleccionada la opción nos aparecerá la siguiente ventana:



En ella vemos varias opciones:

- **Category** seleccionamos la opción Hydraulic.
- A la izquierda tenemos dos opciones, **Remove** que usaremos para borrar condiciones de contorno, la otra opción es **Assign** la activamos para asignar la condición de contorno que tengamos seleccionada en la lista desplegable que hay junto a la opción Assign.

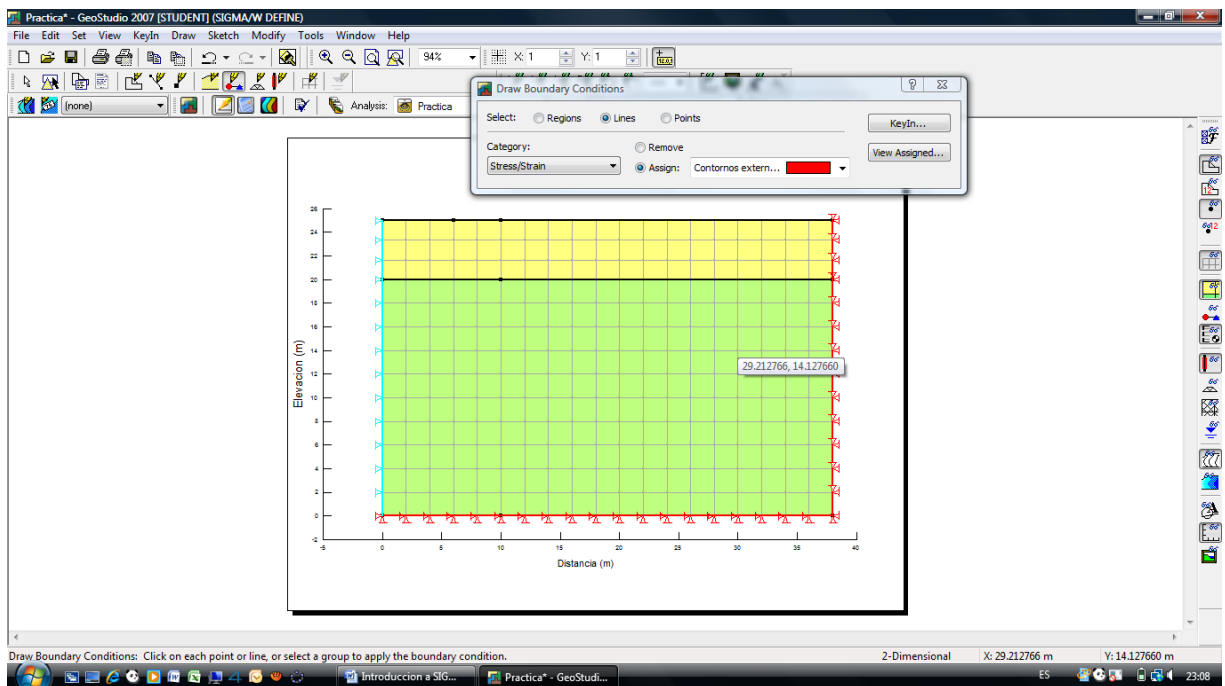
Para asignar la condición de contorno a un dominio en concreto marcamos con el ratón pulsando el botón derecho, sin soltar y envolviendo la zona a la que queremos asignar la condición de contorno desde el primer punto al último dejándolos dentro de la selección tal como se ve en la siguiente figura para la primera condición de contorno correspondiente al eje de simetría.



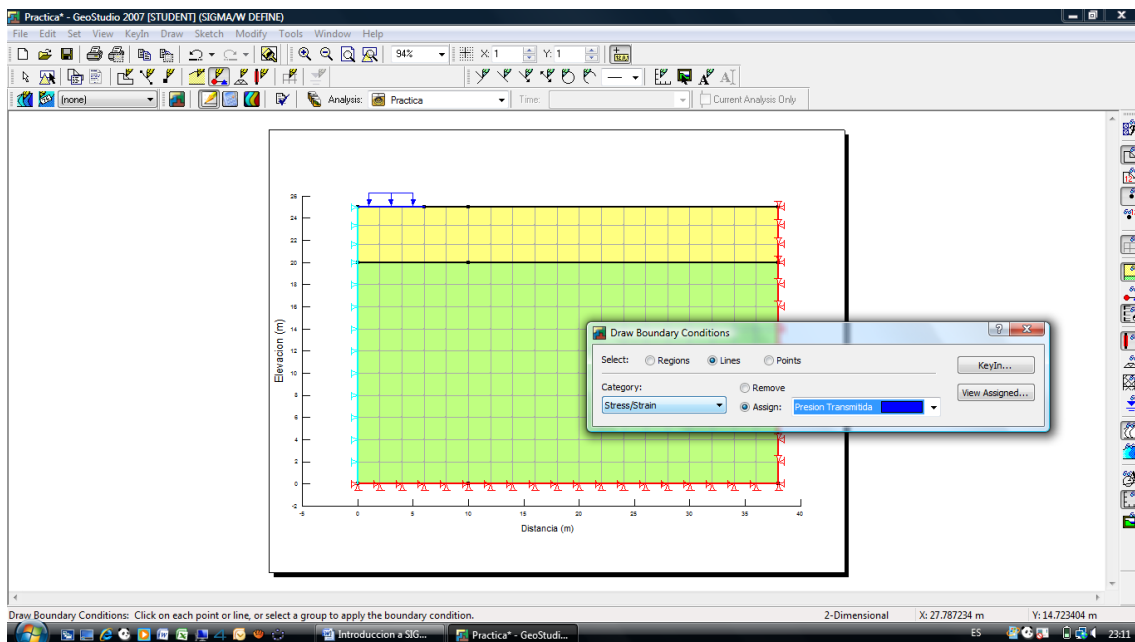
Tal como se ha comentado anteriormente hay que dejar dentro de la selección todos los puntos de la zona a la que se le quiere asignar la condición de contorno.

También se puede hacer click en una zona delimitada por dos puntos del contorno y la asignación se realizará automáticamente, de ahí la sugerencia de delimitar regiones en función de las condiciones de contorno ya que su asignación y manipulación es más sencilla.

Para la zona de contorno exteriores:



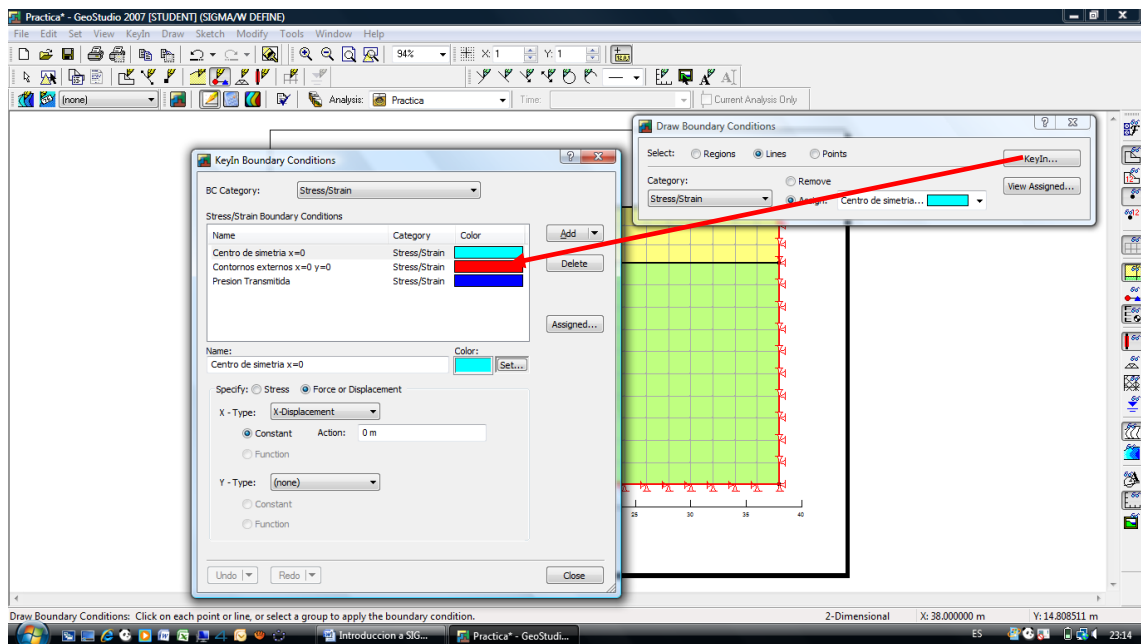
Y para la zona de actuación de la carga quedaría tal como se indica en la siguiente figura:



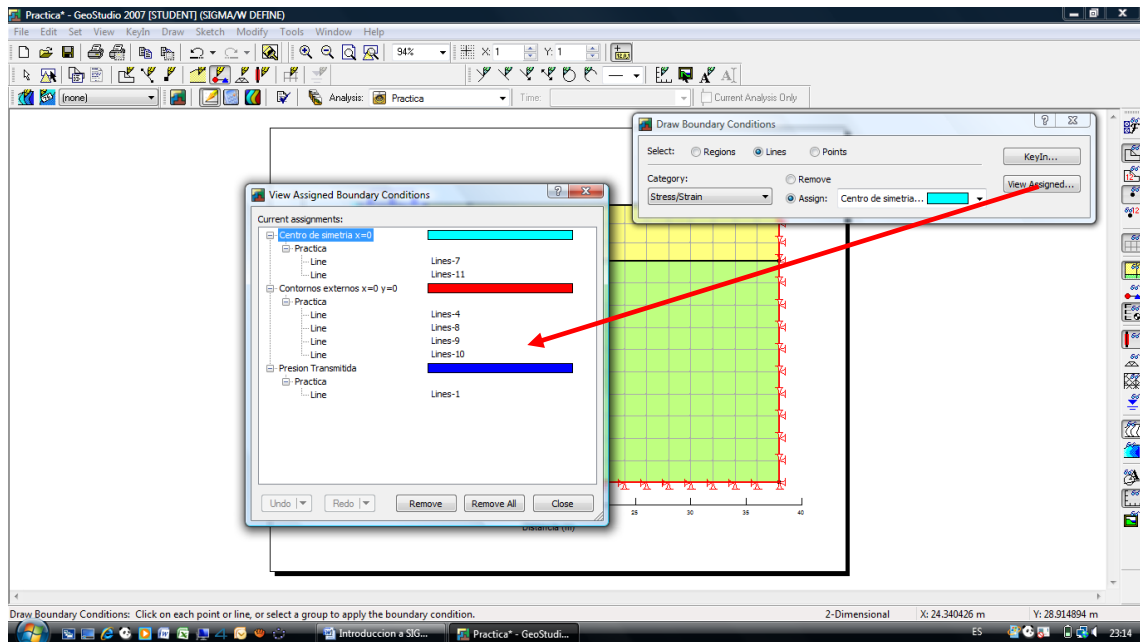
El programa entiende automáticamente que los contornos a los que no se les aplique condiciones de contorno son puntos que se pueden desplazarse en horizontal y vertical.

Existen dos botones con dos opciones interesantes:

- **KeyIn**, con la que podemos cambiar las propiedades de los contornos, tanto en definición como en color etc..

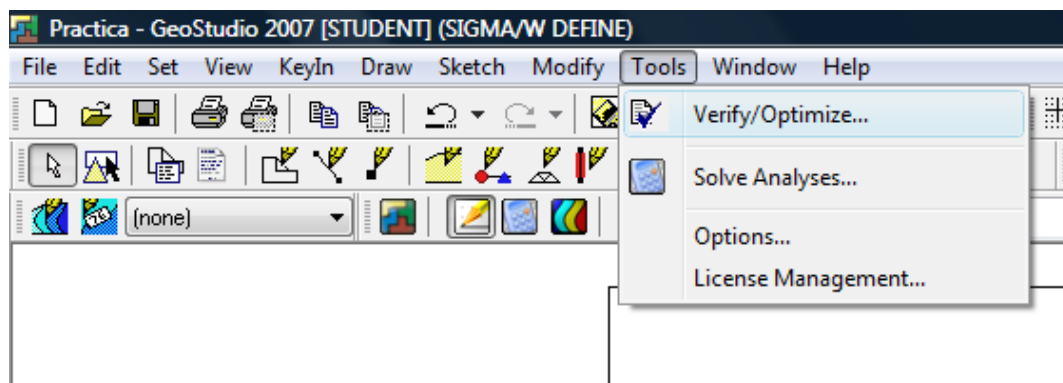


- El otro botón es **View Assigned**..en esta opción podemos visualizar en que dominios de han aplicado las condiciones de contorno, nos permite borrar una en concreto o todas a la vez.

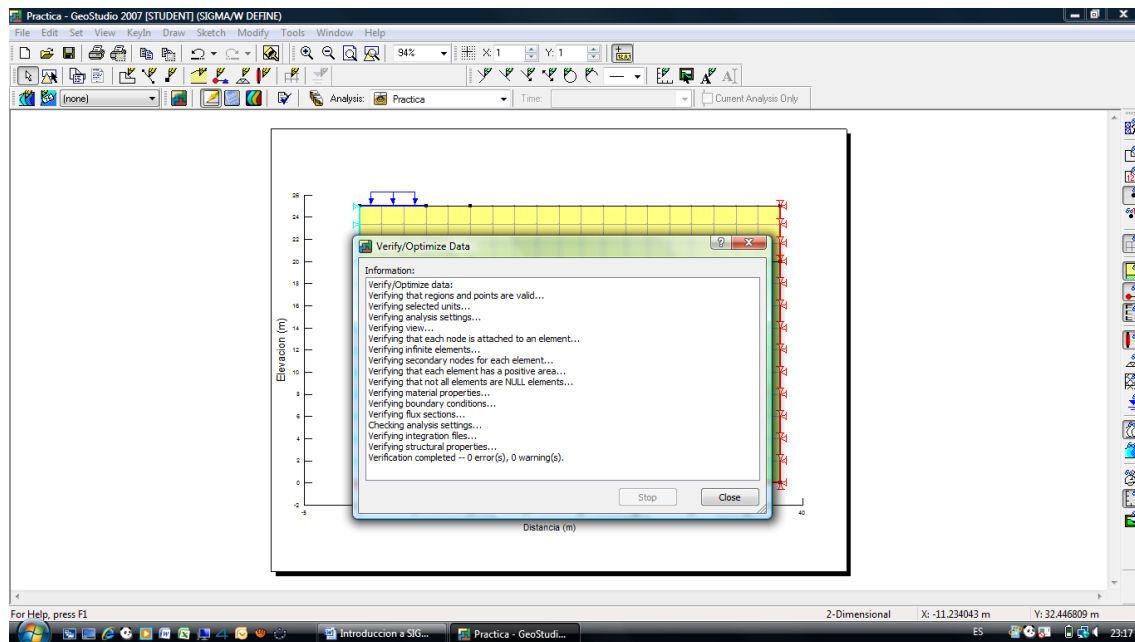


2.16 Verificar la existencia de errores

Una herramienta de la que dispone el programa que nos va a evitar la generación de errores, si introducimos mal la geometría, condiciones de contorno mal definidas, etc es la localizada en la opción de menú **Tools** pulsando en la opción **Verify/Optimize**.



Pulsando esta opción obtenemos la siguiente ventana, al activarse la ventana se pone en funcionamiento el rastreo de errores, indicando en el caso de producirse los errores correspondientes.



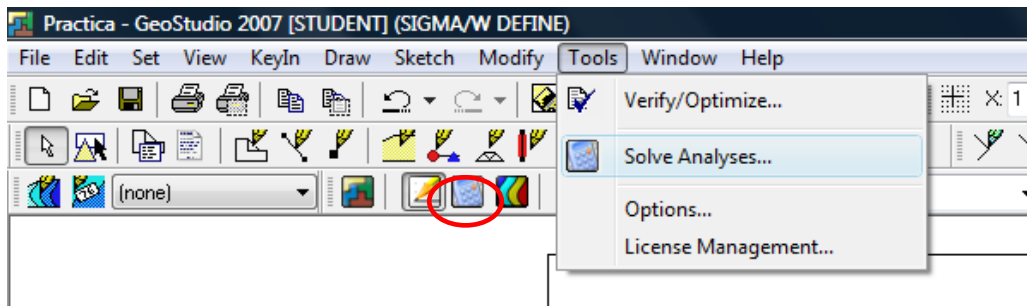
Si no hay errores, como en nuestro caso pulsamos **Close**, en caso contrario se nos avisará que elemento hay que corregir, realizaremos las acciones oportunas para corregir dichos errores y volveremos a rastrear de nuevo al geometría.

Ya estamos en condiciones de proceder al cálculo de la red de flujo del modelo que hemos generado, para ello seguimos los pasos que se indican a continuación.

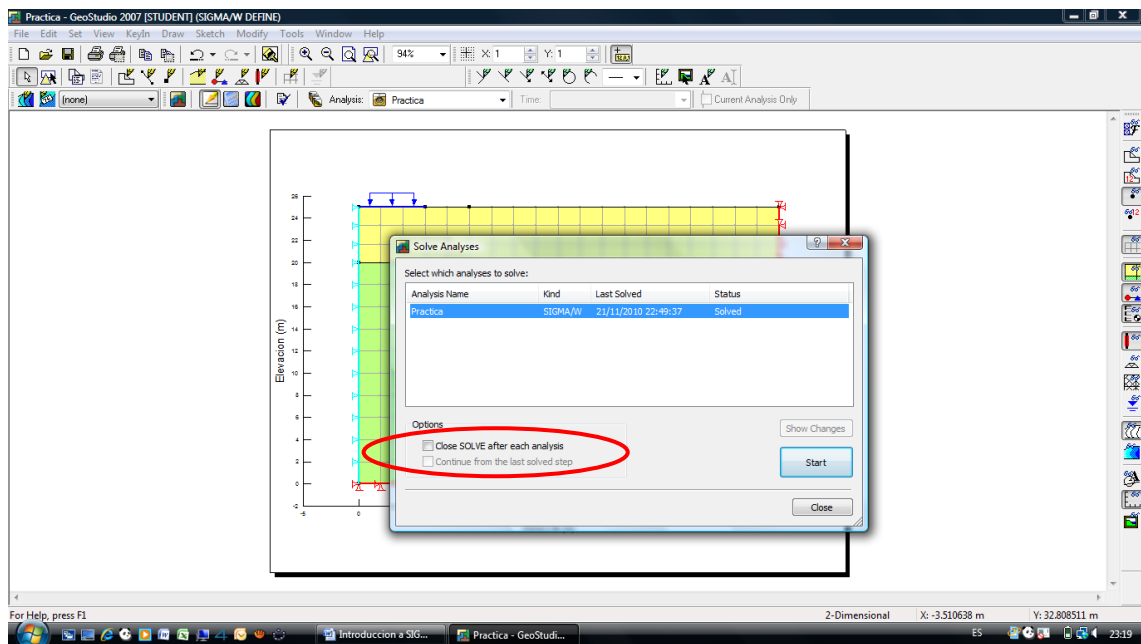
2.17 Resolver el problema

Para iniciar los cálculos que nos permitan visualizar los resultados asociados al modelo que hemos contruido procederemos de la siguiente forma:

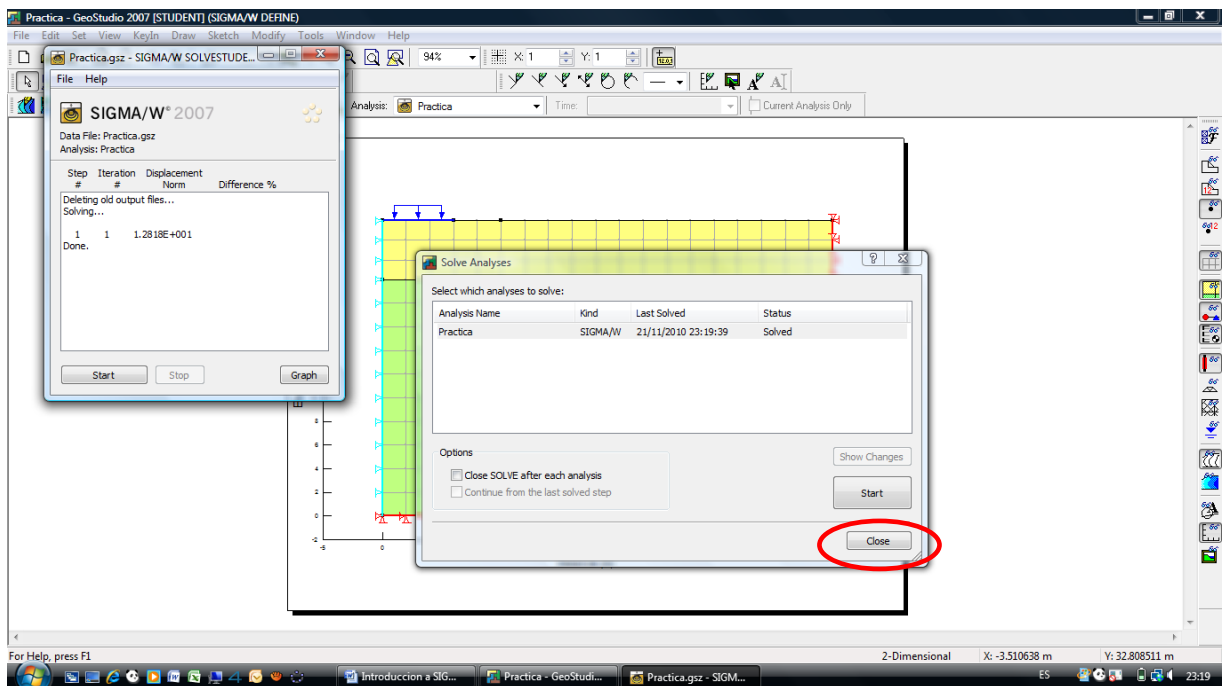
- Seleccionar del menú desplegable **Tools** elegimos la opción **Solve analyses...** o hacemos clic sobre la figura marcada en rojo, tal como se puede observa en la figura siguiente



Nos aparece el siguiente cuadro de diálogo sobre el que pulsamos el botón Start, no sin antes desactivar la opción **Close SOLVE alter each análisis** que cerraría las ventanas de cálculo una vez realizado este.



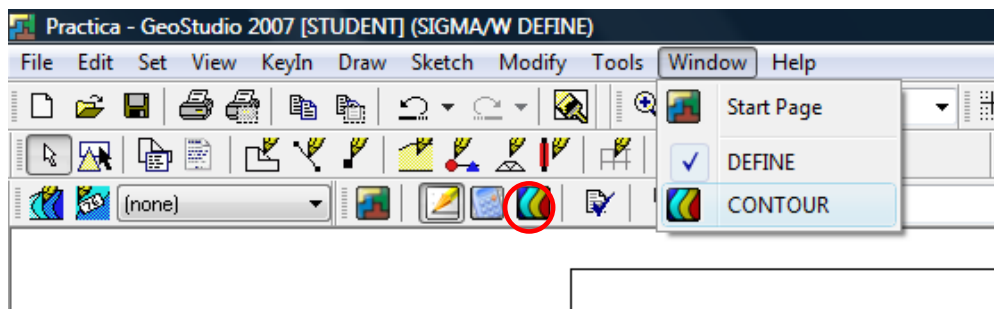
iniciándose en cálculo dando los siguientes resultados:



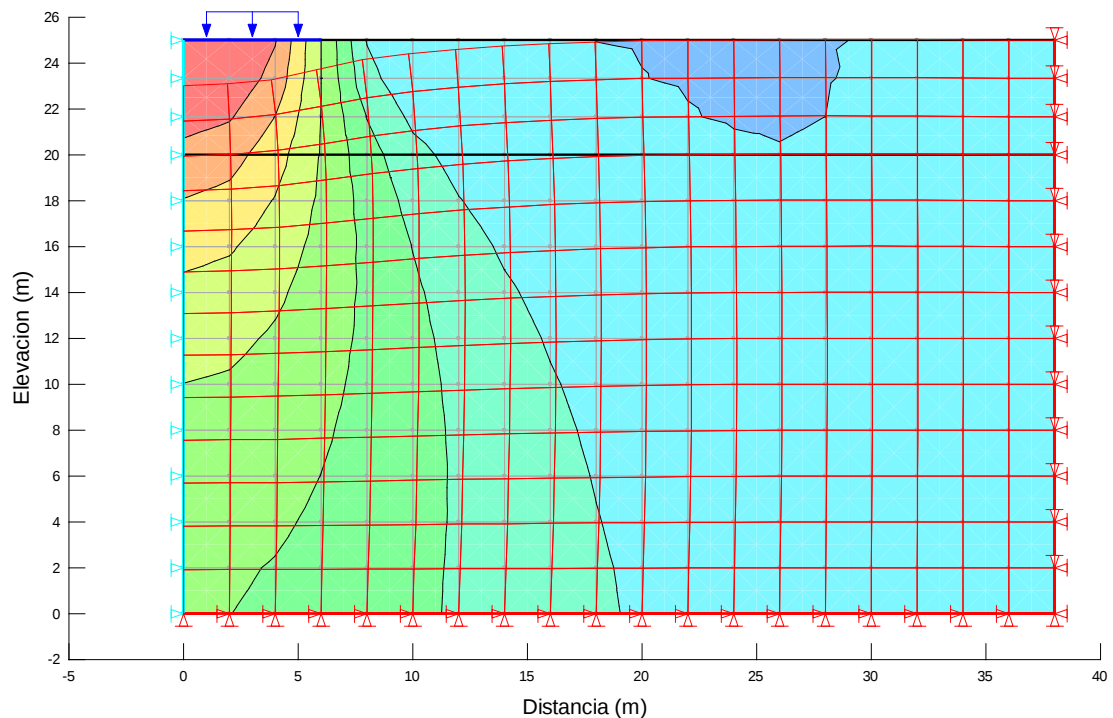
Una vez comprobamos los resultados pulsamos **Close**.

2.18 Ver resultados del cálculo

Una vez terminado el cálculo, con objeto de visualizar los resultados pulsamos sobre la opción **Window/CONTOUR** o sobre el icono marcado en rojo que se indica a continuación:



Una vez pulsada la opción se carga el programa **Contour** con el siguiente resultado:



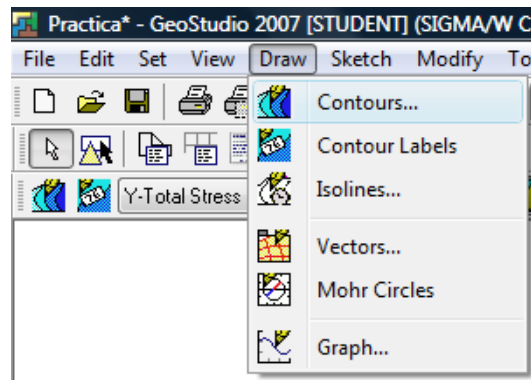
En la imagen anterior aparece la malla de puntos deformada, indicando la entidad de los asientos en cada uno de los puntos de modelo y además superpuesta los lugares geométricos de puntos con igual sobrecarga sobre el terreno

A partir de ahora vamos a trabajar con el programa **Contour**, la introducción de los datos previos y los cálculos que hemos realizado han sido llevados a cabo mediante el programa **Define**, al que volveremos posteriormente para realizar cambios o ajustes en los datos iniciales.

2.19 Dibujo de contornos

En este apartado vamos a sacar provecho de una de las opciones más útiles del programa **Contour** y es a través del uso de la opción de menú **Draw**

Al hacer clic sobre esta opción de menú nos aparece el siguiente despliegue de opciones.



Observamos las siguientes opciones:

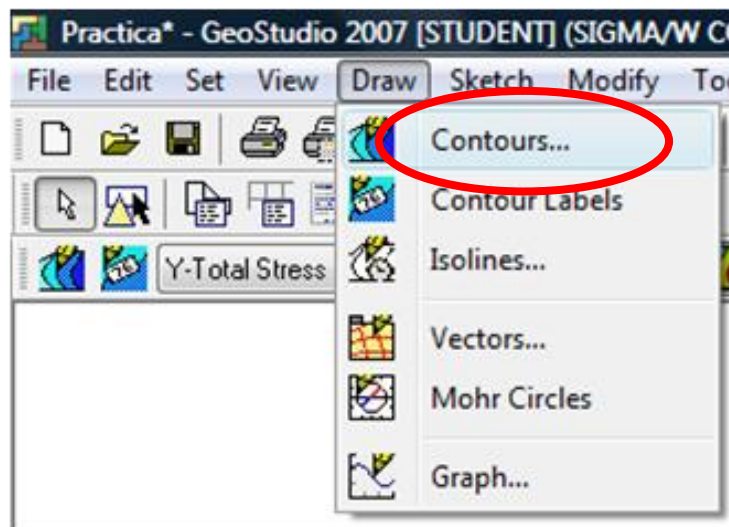
- Contours
- Contour Labels
- Isolines
- Vectors
- Mohr Circles
- Graph.

Con estas opciones podremos visualizar asientos, presiones etc.

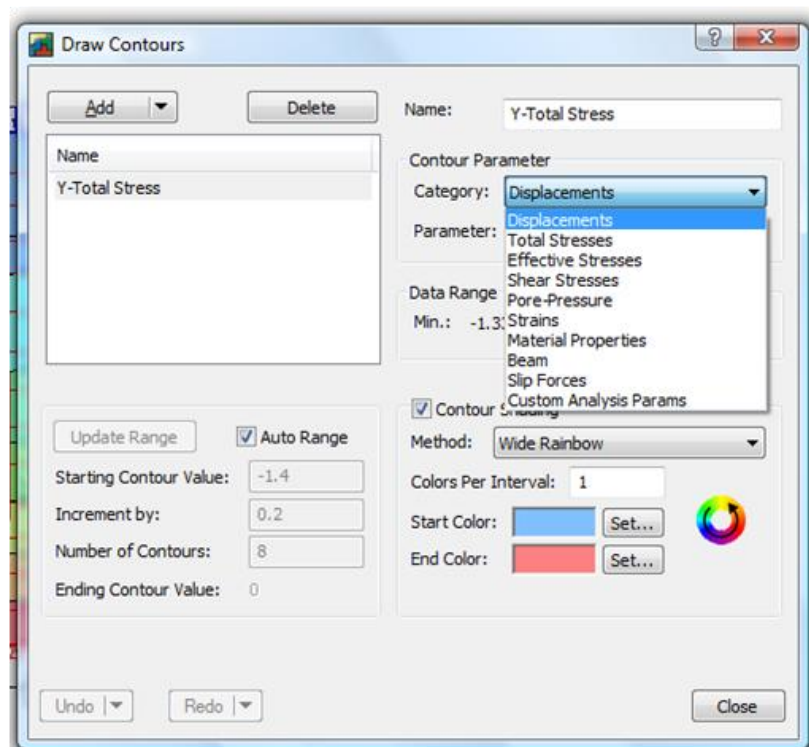
2.20 Modificación de los contornos

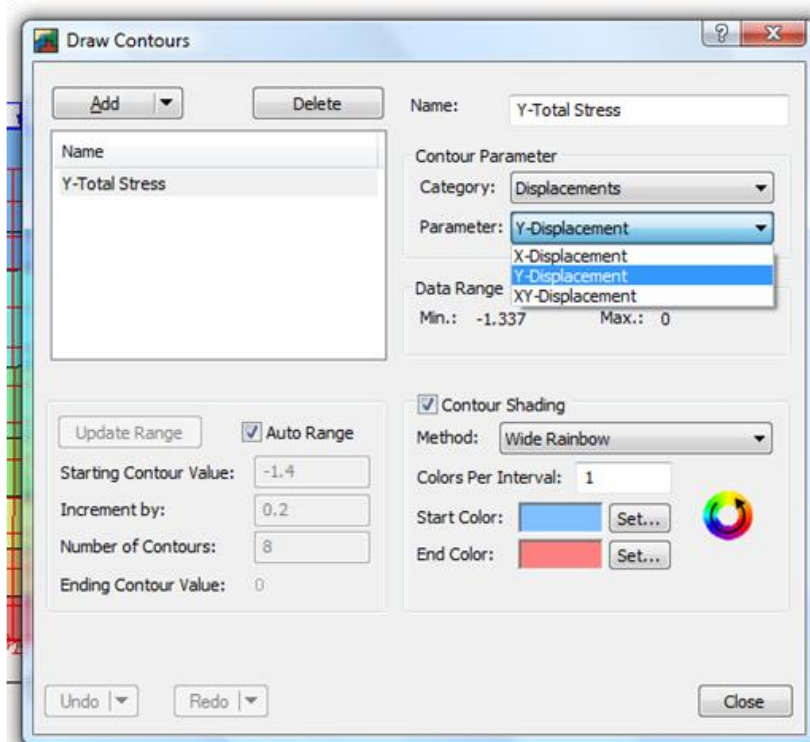
Una vez realizados los cálculos es posible modificar y obtener la visualización de los datos que queramos obtener.

Para ello en el menú **Draw** seleccionamos **Contours** tal como se ve en la siguiente figura:



Nos aparecerá el siguiente cuadro de diálogo:

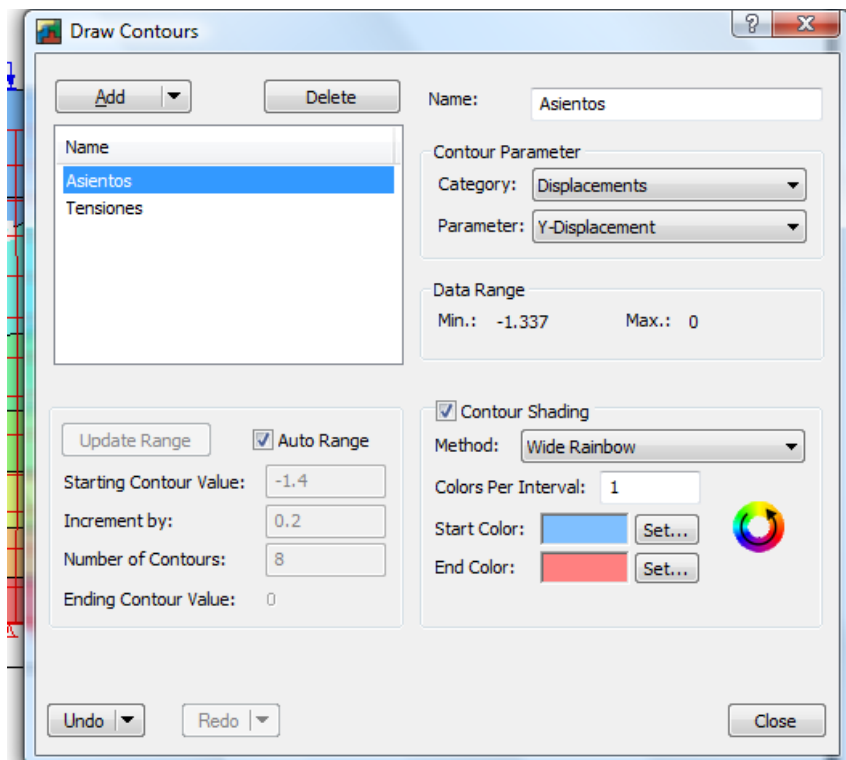




Hay varias opciones:

- **Add** nos permite introducir denominaciones de gráficos en nuestro caso **Asientos y Tensiones**
- **Name** introducimos la denominación de los gráficos a obtener

En las siguientes imágenes se indican los procedimientos a realizar.



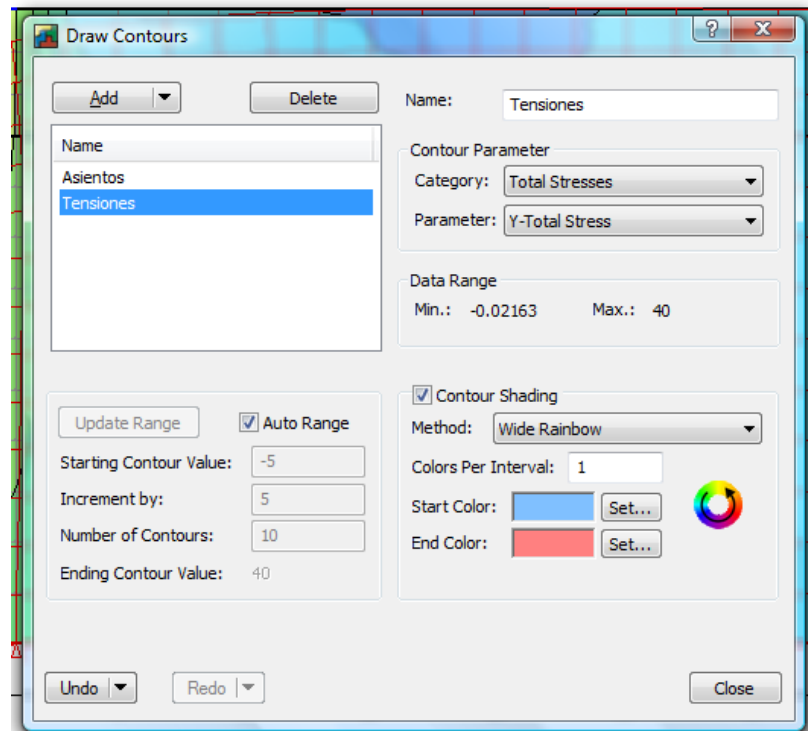
Existen varias opciones con las que podemos manipular la presentación de los contornos, número de caídas, etc, para simplificar activamos la opción **Auto Range**, después pulsamos **Close**.

Las opciones disponibles son:

Seleccionamos **Displacements** (Desplazamientos)

Seleccionamos **Y-Displacement**

Similar procedimiento se puede realizar con la opción Tensiones.



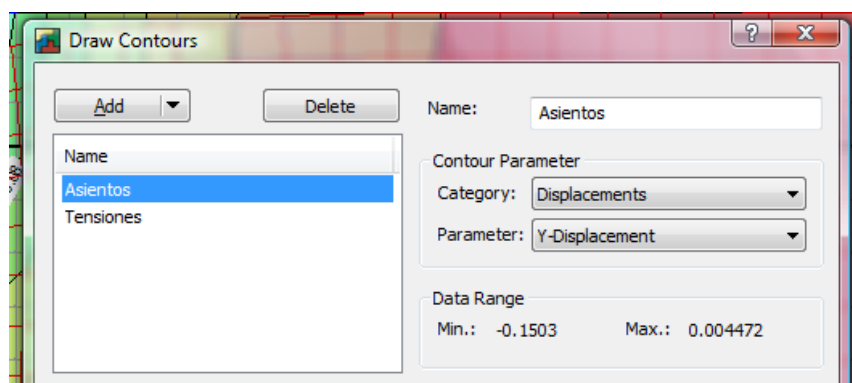
Las opciones a usar son disponibles son:

Seleccionamos **Total Stresses** (Tensiones Totales)

Seleccionamos **Y-Total Stress** (En la dirección Y)

2.21 Cálculo del asientos

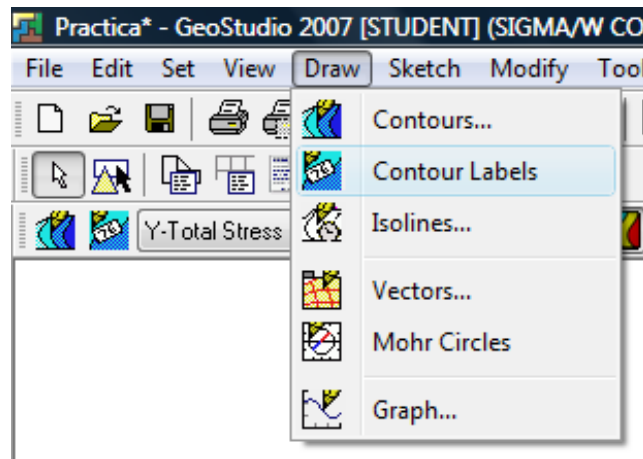
En la imagen anterior entre otros datos aparece en el apartado **Data Range** un valor de -0,15 m valor de asientos , además aparece un valor positivo de 0,004472 que nos indica que en algunos puntos del terreno se produce un levantamiento del terreno



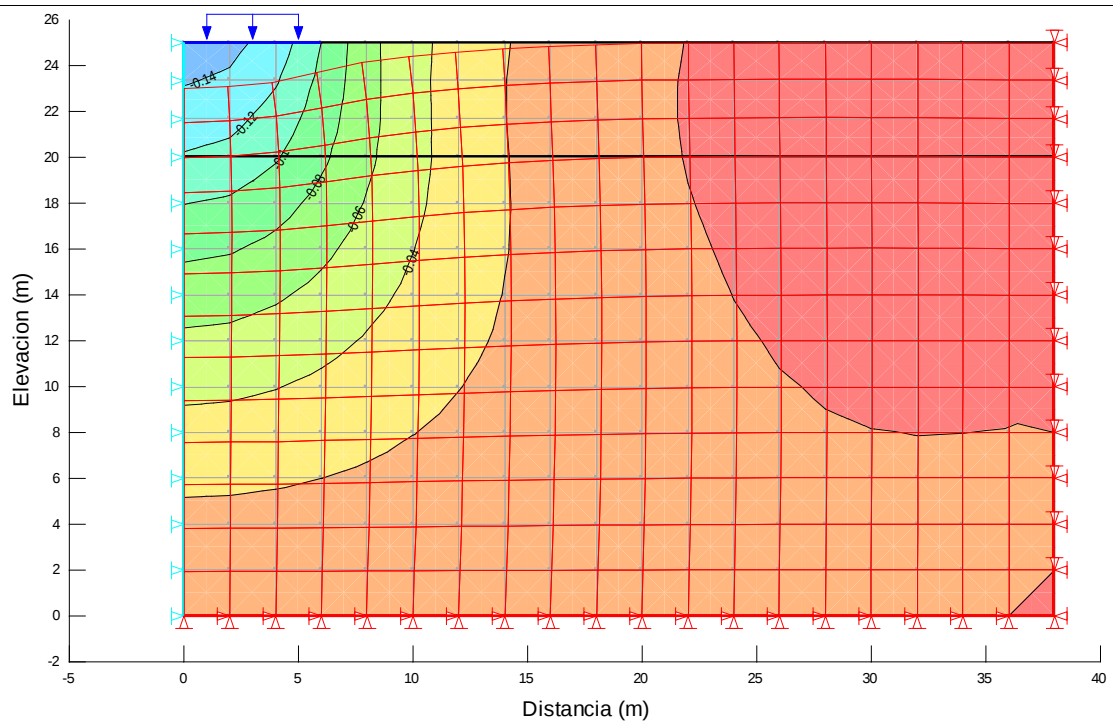
2.22 Etiquetas en los contornos

Una vez obtenidas los campos de valores, podemos colocar etiquetas que nos indique sus valores asociados, el procedimiento es el siguiente:

En el menú **Draw**, seleccionamos la opción **Contours Labels**, como se puede apreciar en la siguiente figura:

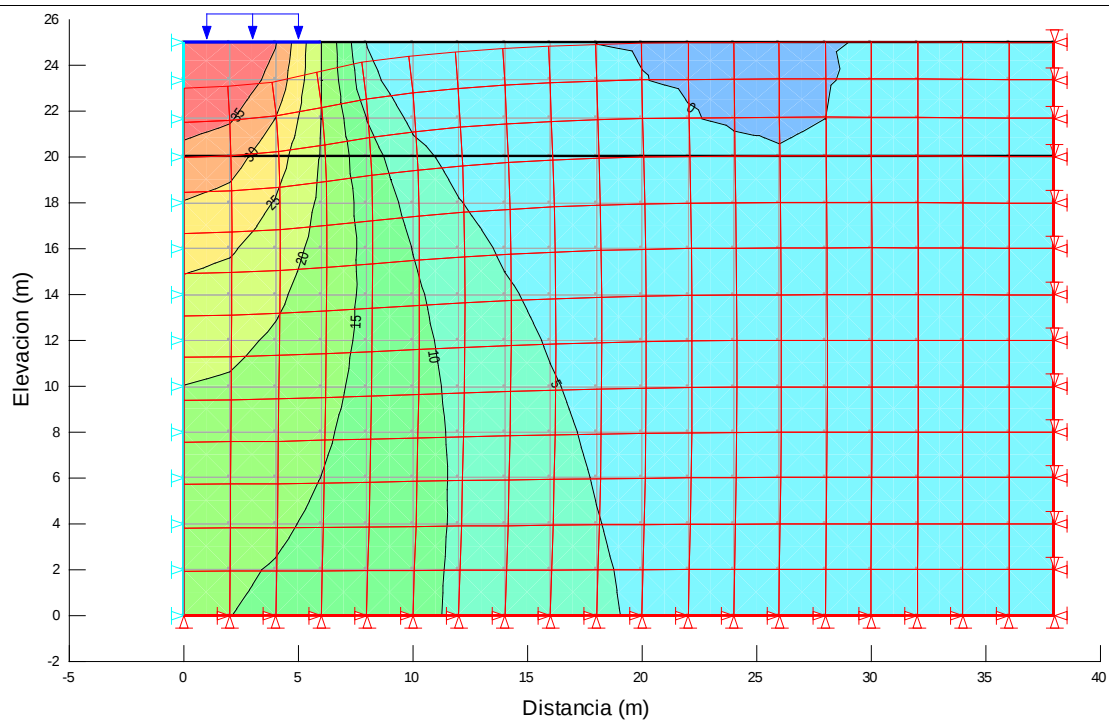


El cursor se transformará en una cruz y con el pinchamos en cada uno de los contornos. Quedando la figura tal como se puede apreciar en la siguiente figura para el caso de los asientos:



Cada línea (en este caso de asientos) ha quedado etiquetada, esta opción sirva tanto para colocar etiquetas como para eliminarlas.

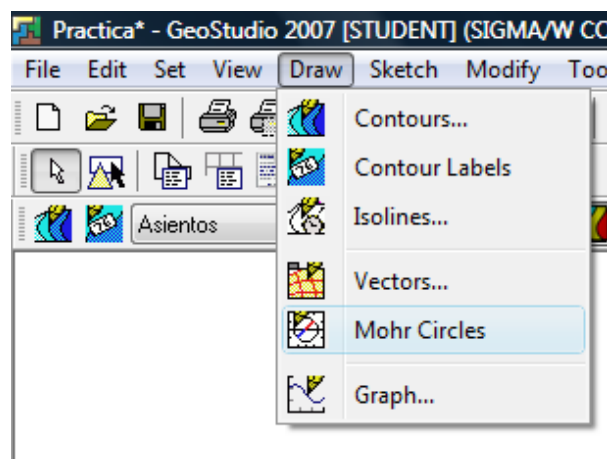
Para el caso de las tensiones:



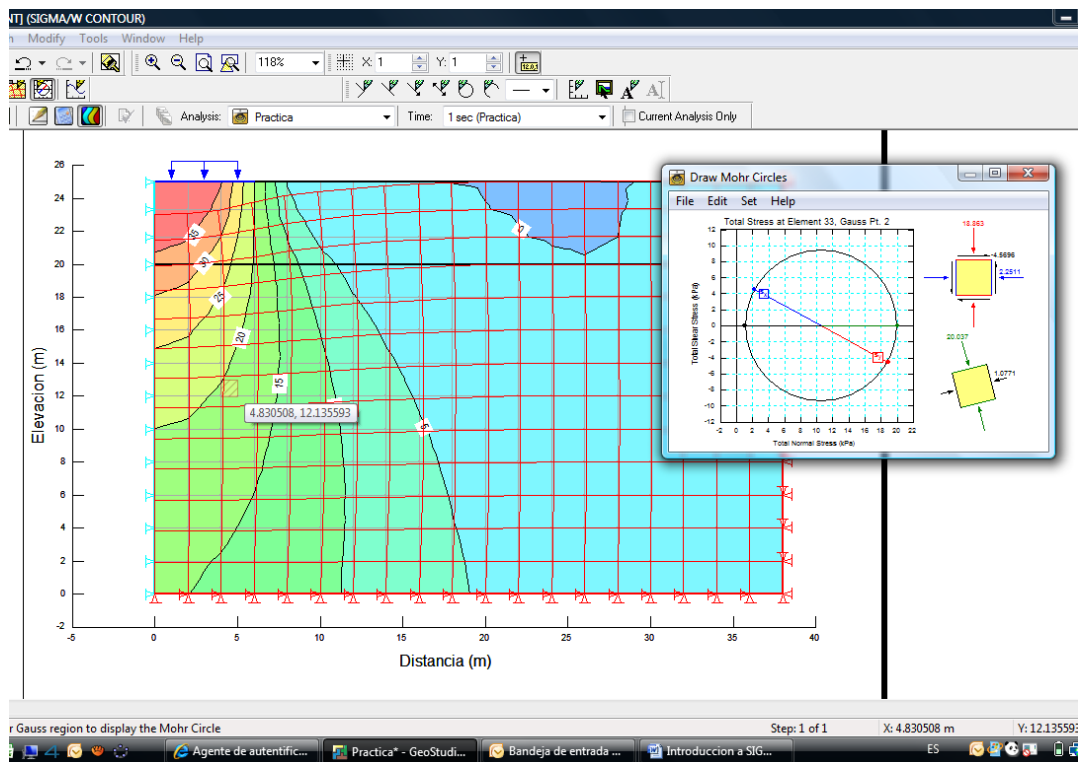
2.23 Obtención de los círculos de Mohr de modelo

Para la obtención de los círculos de Mohr, indicando los estado tensiones bidimensionales de cualquier punto del terreno, procedemos de la siguiente manera:

En el menú principal se pulsan las opciones **Draw/Mohr Circles** tal como se ve el la siguiente imagen:



El puntero del ratón se transforma en una cruz y se puede pulsar en el punto del terreno que queremos investigar,



La primera edición de este manual se terminó en Córdoba el día 22 de Noviembre de 2010 a las 00:00.

Las próximas ediciones espero estén más depuradas y contengan indicaciones de los lectores y alumnos/as de la asignatura.

Para indicaciones al respecto, se pueden dirigir a me1lopig@uco.es

Geoslope, SIGMA/W, SEEP/W, Windows, son marcas registradas por sus respectivos propietarios