

# GEFDYN: Géomecanique Eléments Finis DYNamique



## Tutorial # 2: Modelación de una fundación rígida sobre un suelo elástico

16 de octubre de 2010

### 1. Introducción

El objetivo de este tutorial es introducir a la generación de mallas con SDT para su empleo con *GEFDyn*.

Para ilustrar el procedimiento, consideraremos el caso de una fundación corrida superficial lisa y rígida, apoyada en un estrato homogéneo elástico de espesor  $H$ . La situación se ilustra en la Figura 1.

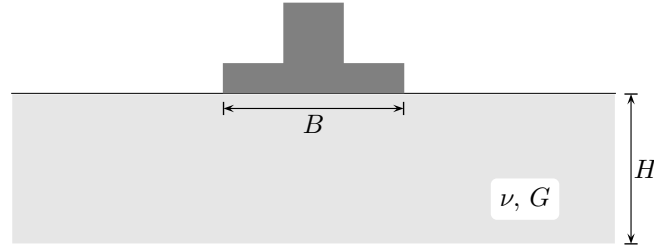


Figura 1: Problema de referencia

Por tratarse de un suelo elástico, el modelo queda completamente definido por el módulo de Poisson  $\nu$  y el módulo de corte  $G$ . Emplearemos:

$$\nu = 0,333 \quad ; \quad G = 500[\text{kN/m}^2]$$

De acuerdo a [1], el asentamiento  $\delta$  puede ser estimado de acuerdo a:

$$\delta = \frac{0,88 F}{2(1 + \nu) G} \quad (1)$$

donde  $F$  es la fuerza sobre la fundación y  $B$  su ancho. La fórmula anterior es válida si

$$\frac{H}{\frac{B}{2}} = 4$$

Para el presente problema consideraremos un ancho de fundación de  $B = 2[\text{m}]$  y una altura de estrato de  $H = 4[\text{m}]$ . Por lo tanto, si el asentamiento  $\delta = 10[\text{mm}]$  se obtiene:

$$\frac{2 \delta (1 + \nu) G}{0,88} = \frac{2 \times 10^{-2} (1 + 0,333) 500}{0,88} = 15,15 [\text{kN/m}]$$

Veremos en lo que sigue la resolución del problema con *GEFDyn*.

## 2. Generación de la malla

Para construir una malla de elementos finitos para el problema emplearemos las herramientas de *SDT*. Por supuesto, esta etapa puede ser efectuada con cualquier programa de generación de mallas, generando el archivo de geometría en el formato de lectura de *GEFDyn*.

Comenzaremos definiendo el tamaño del dominio del problema. En primer lugar, dada la simetría, podemos emplear un mallado correspondiente sólo a la mitad del dominio. En este caso emplearemos la mitad derecha, luego la fundación quedará representada por un ancho de 1.0 [m]. Como primera aproximación fijaremos la extensión del malla como 10 veces en el sentido horizontal. Las condiciones de borde quedarán definidas por un desplazamiento horizontal nulo en los bordes laterales, mientras que el borde inferior queda completamente limitado en el sentido vertical.

Como primera aproximación emplearemos una malla relativamente gruesa y homogénea, constituida por elementos cuadrángulos lineales de  $0,5 \times 0,5$ [m] de costado. La malla empleada se muestra en la Figura 2.

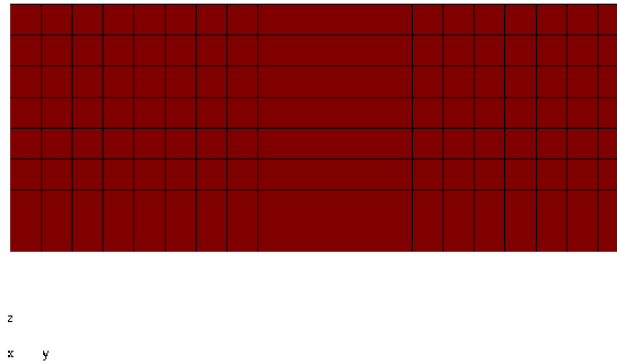


Figura 2: Malla empleada

Para construir la malla con *SDT* se empleó el código siguiente:

```
filename='tut2_footing';%filename
FNode=[]; FEelt=[]; %reseting default variables
%-----Mesh construction
FEel0=[];
FNode=[1 0 0 0 0. 0 .0
        2 0 0 0 0. 10 .0];
NodeID=femesh('findnode z==0.0');
[Y,I]=sort(FNode(NodeID,6),'ascend'); NodeID=NodeID(I);
femesh('ObjectBeamLine',NodeID)
femesh('extrude 1 0 0 -4')
femesh('divide 8 20')
femesh('addsel')
%-----Numeration optimization
[FNode,FEelt]=feutil('optimnodenum',FNode,FEelt);
model.Node = FNode;
model.Elt = FEelt;
model.Elt = feutil('orient',model);
model.DOF = feutil('getdof',model);
model=feutil('renumber',model)
FNode=model.Node;
FEelt=model.Elt;
%-----Writing file .geom
filename2=[filename,'.geom'];
fid_geom=fopen(filename2,'w');
numnp=length(FNode(:,1));% total nodes
%Title writing
fprintf(fid_geom,'***** TUTORIAL 2 - RIGID FOOTING *****\n');
```



En este caso se seleccionaron los nodos que tendrán un desplazamiento vertical impuesto vertical.

A continuación se procede a la escritura de los nodos mediante un loop sobre la definición del mallado. En este archivo de ejemplo, se ha decidido emplear una definición estándar de las condiciones iniciales:

```
% standard node definition
id=[1 0 0 1 1 1 1 0 0];%2D plane-strain mechanic
```

De acuerdo a los tipos de problemas de *GEFDyn*, en un problema mecánico 2D en deformaciones planas sólo se liberan los desplazamientos horizontales  $u_y$  y los verticales  $u_z$  (2da y 3ra posición de *id*). En efecto el vector *id* posee 9 componentes: las primeras 7 definen el código de los grados de libertad, mientras que las dos últimas se emplean para definir condiciones de equivalencia (no empleadas en este ejemplo).

Previamente a la definición de *id*, se calcularon las coordenadas máximas y mínimas segun  $y$  y  $z$ . Estos valores permiten imponer las condiciones de borde. Por ejemplo, se bloquea el borde inferior *id*(3)=1 cuando la coordenada  $z$  del nodo es igual a la mínima *zmin*. La imposición de las otras condiciones de borde se deduce directamente del código *Matlab*.

Finalmente se procede a la escritura de los tipos de elementos. En general se suele emplear loop para grupos elementos topológicamente idénticos. En el caso de grupos de tipo distintos, se pueden ir definiendo uno a continuación del otro.

En este caso existen un sólo tipo de grupo (volumen 2D) compuestos por 160 elementos. El orden de escritura en el archivo *\*.geom* define el número del grupo en *GEFDyn*, pero no tiene porqué ser el mismo definido en la construcción de la malla *SDT*. La variable *Group\_num* permite indicar dicha correspondencia. Se define también los valores correspondientes a una serie de parámetros de este tipo de elementos (volumen 2D) para *GEFDyn*. Luego, los elementos se escriben uno a uno mediante un loop con el formato adecuado.

Finalmente el archivo se cierra y hemos completado la creación de la malla para *GEFDyn*.

Observación: durante la construcción de la malla existen varios comandos que nos permiten controlar/verificar si está consiguiendo el resultado deseado:

- **femesh plotelt** traza la malla actualmente asociada a **FEelt** y **FEnode**.
- **femesh plotel0** traza la malla actualmente asociada a **FEel0** y **FEnode** (selección de trabajo)
- **femesh info** despliega en pantalla el tipo y cantidad de elementos contenidos en el modelo (**FEelt**), en la selección de trabajo (**FEel0**) y el número de nodos definidos en **FEnode**.

El archivo de comandos para resolver el problema es el siguiente:

Se deja la interpretación detallada del archivo de comandos al lector. A continuación se indican sólo algunos aspectos importantes:

- $$E = 2G(1 + \nu)$$

- Como no hay napa: `FACNAP=0.` y `ZNAPPE=0..` Se empleará además la opción de superficie de fluencia tipo Mohr-Coulomb (`IMODEL=2`).
- Ya que no hay gravedad y el comportamiento es lineal elástico, no vale la pena inicializar los esfuerzos efectivos (`NCOUCH=0`).
- Finalmente, los elementos serán leídos en el archivo de geometría `*.geom` (`IPPGEF=1`).

## 4. Ejecución y resultados

La ejecución del cálculo se efectúa de acuerdo a las indicaciones de ejecución en Linux:

```
for fichier in PREFIJO
do
echo $fichier > prefix.in
dyn7406c.exe
rm fort.*
rm FT00
rm *.l3d1
rm *.prxl
rm *.tbsv
rm *.resu
done
```

donde PREFIJO es el nombre sin extensión que se le ha dado al cálculo: tut2\_footing en este tutotial.

La ejecución generará en pantalla una salida similar a la siguiente:

```
*****
*
*      Licensed to:
*
*      Departamento de Ingenieria Estructural
*      y Geotecnica, Pontificia Universidad
*      Catolica de Chile
*      Santiago, Chile
*
*      tel: +56(2)354 1273
*      e-mail: esaez@ing.puc.cl
*      GEFDYN      RELEASE : 7.4.6
*                  VERSION : LINUX
*
*
*                  Oct 2009
*
*****
```

Enter the Language you prefer ? F (French) or E (English)  
donner le prefixe du fichier de donnees de Gefdyn (\*.in)

Dans le cas d'une reprise suivi du prefixe du fichier  
de donnees du calcul a partir duquel on veut reprendre

```
ENTRER LE NOM GENERIQUE (PREFIX) :
Ketap =          1 Ite =          2 Cpu time = .40000E-01
Ketap =          2 Ite =          2 Cpu time = .40000E-01
Ketap =          3 Ite =          2 Cpu time = .40000E-01
Ketap =          4 Ite =          2 Cpu time = .50000E-01
.
.
.
Ketap =          98 Ite =          2 Cpu time = .37000E+00
```

```

Ketap =      99 Ite =      2 Cpu time = .38000E+00
Ketap =     100 Ite =      2 Cpu time = .38000E+00

```

Por tratarse de un problema elástico, sólo se efectuarán 2 iteraciones por etapa de cálculo: la primera evalúa la solución (que es exacta dado que el problema es elástico) de acuerdo al incremento de desplazamientos, la segunda chequea que los desequilibrios cumplen los criterios de convergencia.

Para visualizar los resultados, podemos por ejemplo trazar los isovalores proporcionales a los desplazamientos verticales ( $z$ ) (Fig.3).

```

>> gef_video('tut2_footing','z')
$ reading nodes in input file tut2_footing.geom
Reading group number 1 type 2
Colors proportional to z direction
Hint: use dbquit to quit debug
K>> fecom('scalecoef 20')

```

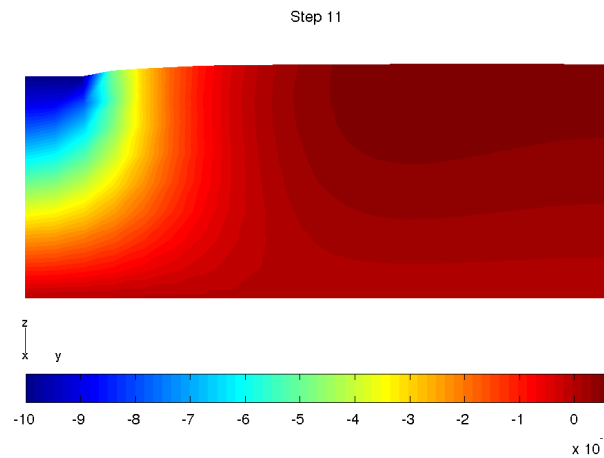


Figura 3: Desplazamientos verticales ( $\times 20$ )

Para observar la cinemática de las deformaciones, podemos también ver los vectores de desplazamiento de los nodos. Para ello, a partir de las opciones de la ventana **feplot** abierta, con el mouse seleccionamos: **Feplot**→**Show**→**Show Def arrow** para obtener la Fig.4 (usar `fecom('scalecoef 70')`).

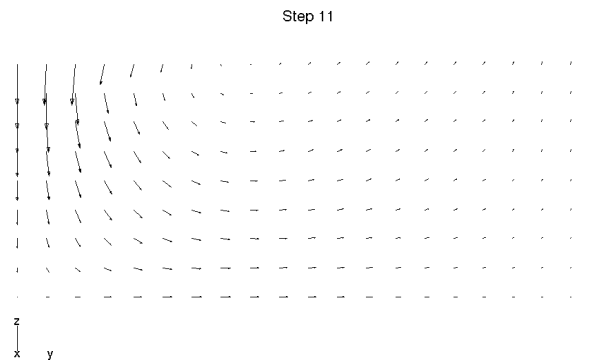


Figura 4: Vectores de desplazamientos nodales ( $\times 70$ )



Para obtener en forma explícita la distribución de esfuerzos bajo la fundación podemos emplear la función `gef_hist_int_points` definiendo una ventana por debajo de donde los desplazamientos verticales han sido impuestos:

```
data.filename='tut2_footing';
data.win=[-1 1 -.125 0.];
data.var=1:4;
data.pos=0;
data.group=1;
[POS,HIST]=gef_hist_intpoints(data);

figure
plot(POS(:,1),-1e-3*squeeze(HIST(:,2,end)),'-','LineWidth',2)
grid on
xlabel('y [m]','fontsize',15)
ylabel('\sigma_{zz} [kPa]','fontsize',15)
```

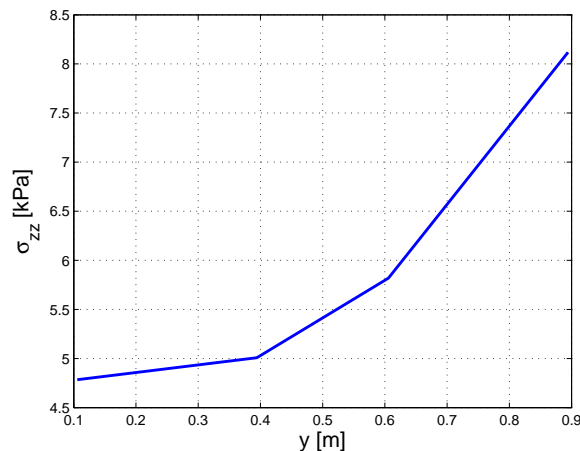


Figura 5: Esfuerzos verticales bajo la fundación

La Fig.5 ilustra claramente la concentración de esfuerzos que ocurre hacia la esquina de la fundación.

Finalmente, para validar nuestro cálculo podemos calcular la fuerza vertical necesaria para imponer el asentamiento de 10[mm] deseado. Para ello basta con calcular la sumatoria de las reacciones verticales sobre el mallado. Como los bordes verticales tienen la posibilidad de deslizar verticalmente, basta con considerar la sumatoria de las reacciones verticales en el borde inferior. Para extraer las fuerzas nodales, emplearemos la función `gef_force`. Los únicos argumentos de esta función son el nombre del archivo y la lista de nodos.

Para definir la lista de nodos emplearemos las herramientas de *SDT*:

```
>> MODEL=gefread('tut2_footing.in');
Nodes=feutil('findnode z==-4.',MODEL)
$ reading nodes in input file tut2_footing.geom
Reading group number 1 type 2

Nodes =
```

```
9    18    27    36    45    54    63    72    81    90    99   108   125   140   153   164   173   180   185   188   189
```

Luego, pasamos a `gef_force` la lista de nodos, sumamos las componentes verticales y multiplicamos por 2 (por simetría) para obtener:

```
>> [FNOD,TENOD]=gef_force('tut2_footing',Nodes);
Fz=2*sum(squeeze(FNOD(Nodes,3,end)))
$ reading nodes in input file tut2_footing.geom
Reading group number 1 type 2
```

Fz =

1.4974e+04

El valor obtenido (14,97[kN]) difiere en alrededor del 1 % con respecto al valor teórico calculado en §1, lo que valida nuestro modelo. Por tratarse de una aproximación por elementos finitos, el cálculo puede ser aún refinado para acercarse más al valor teórico.

Observación: en el cálculo anterior se emplearon los inferiores para calcular la resultante, sin embargo, como el sistema está en equilibrio (y no hay gravedad), cualquier corte del mallado nos permitirá recuperar el resultado deseado. Si hubiera gravedad, el cálculo de las resultantes incluirá el peso de los elementos del mallado, por lo que su valor dependerá del corte realizado al mallado. Para recuperar el valor de la fuerza impuesta en dicho caso se deberá remover la contribución del peso de los elementos.

## Referencias

- [1] Giroud, J.P., 1972, "Tables pour le calcul des fondations", Vol. 1: Tassements, Dunod, Paris, France, 1972, 383 p. (in French)