

GEFDYN: Géomecanique Eléments Finis DYNamique



Tutorial # 3: Modelación de ensayos biaxiales y triaxiales no drenados con un modelo elasto-plástico perfecto no asociado

28 de octubre de 2010

1. Introducción

El objetivo de este tutorial es introducir al empleo de GEFDyn en hidro-mecánica mediante la modelación de dos ensayos no drenados:

- Ensayo biaxial (deformaciones planas)
- Ensayo triaxial (simetría de revolución)

El comportamiento del material será reproducido por un modelo de tipo Mohr-Coulomb:

$$f(\underline{\sigma}') = |\sigma'_I - \sigma'_{III}| + (\sigma'_I + \sigma'_{III}) \sin \phi' - 2c' \cos \phi'$$

donde σ'_I y σ'_{III} son los esfuerzos principales mayor y menor, respectivamente. ϕ' es el ángulo de fricción interna y c' la cohesión efectiva.

La dependencia de los parámetros elásticos con respecto al confinamiento se expresa a través de:

$$E = E_{ref} \left(\frac{p'}{p'_{ref}} \right)^{n_{el}}$$

donde E es el módulo de Young en función del confinamiento p' y E_{ref} es un módulo de referencia para una presión de referencia p_{ref} . n_{el} es un parámetro que caracteriza la dependencia no-lineal.

Los parámetros a emplear se resumen en la Tabla 1

Para este ejemplo consideraremos el caso no asociado ($\phi' \neq \psi$).

El presente tutorial corresponde a una adaptación del test de validación [1].

Parámetro	Variable	Valor
Módulo de Young de referencia	E_{ref}	10 [MPa]
Módulo de Poisson	ν	0.3
Exponente modelo elástico	n_{el}	0.0
Ángulo de fricción	ϕ'	30 [deg]
Ángulo de dilatación	ψ	5 [deg]
Cohesión	c'	10 [Pa]
Presión de referencia	p_{ref}	1 [MPa]
Coefficiente de empuje geoestático	K_0	1.0
Permeabilidad saturada correspondiente a la permeabilidad inicial	k_w	1×10^{-5} [m/s]
Densidad de masa del sólido	ρ_s	2700 [kg/m ³]
Porosidad inicial	n	0.35

Cuadro 1: Parámetros a emplear modelo de Mohr-Coulomb

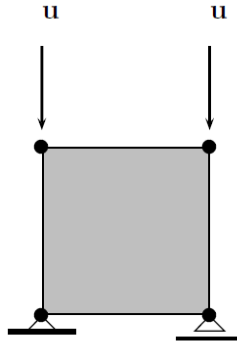


Figura 1: Idealización del ensayo biaxial (de [1])

2. Ensayo biaxial

El ensayo biaxial corresponde a un test en deformaciones planas por lo que puede ser modelado en forma precisa en 2D.

La idealización del ensayo se puede efectuar por medio de un único elemento sólido correspondiente a un cuarto de la probeta. Sobre la cara superior se impone una deformación uniforme u , mientras que el nodo de la izquierda inferior queda fijo (eje de simetría) y el inferior de la derecha se puede desplazar horizontalmente. La idealización del ensayo se ilustra en la Figura 1.

2.1. Preparación del modelo con GEFDyn

La modelación es muy similar a la descrita en el caso drenado, por lo tanto nos limitaremos a describir las diferencias.

El archivo de comandos para efectuar el cálculo con GEFDyn es el siguiente:

```

ENSAYO BIAxIAL MONOTONO,MOHR COULOMB ASOCIADO NO DRENADO
4 1001110 1 1 2 * NUMNP/IDDL/NEGNL/MODEX/IDGEOM/NODLGN
0 0
240 .005 0.0 1.20
1 1 0
99991 0 1 -150 1 .0001 .0001 * SREF/NUMREF/IEQUIT/ITEMAX/ITETYP/UTOL/RTOL
1 0. 0.
0
0
0 1
1 1 1 1 1 1 0 0. 0. 0. 0 * N/IDT(1:7)/X1/Y1/Z1/KN/IT/NEQUIV/IPL(N)
2 1 0-1 1 1 1 0 0. 0. 1. 0
3 1 0 1 1 1 1 0 0. 1. 0. 0
4 1 0-1 1 1 1 0 0. 1. 1. 0
0. 0. -9.81 1000. 0. 0. * GXO/GYO/GZO/DENW/COMPRW
0 1 20 0 2 0
1 2 00 0
0. 1.2
0.0 -1.0
2 -2 1 10.E-2
4 -2 1 10.E-2
0 1
0
2 1 1 0 1 3 4 0 0 2 0 0 1 0 8 1 0 0 0 0 * NPAR: NPAR(6)=3 (Hidro-Mecanico)
1 2700. 0.35 0. 1. 1.
10.0E6 0.300 0.0 -30. -5. 10.0E6 0.300 1.E01
1.E50 -1.E6 100 1.E-05 1.E-05 1.E-05 1.0 0.
0. 0. 0. 0. 0
2 0
1 4. 0000.
2 12. 1911.
0 0 0
1104 1 0 1 1 2 1 3 4 * M/ITELT/IDMIXT/ /IEL/IPS/BET/EPAI/MTYP/KG/NOD
1234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890

```

La primera diferencia aparece a nivel de la definición del tipo de problema. En este caso el código `IDDL=1001110`, indica que se activan los grados de libertad correspondientes a los desplazamientos u_y y u_z , así como la presión de poros u_w .

Se han modificado también algunos datos algorítmicos. Hay dos parámetros que han cambiado de valor: el número de iteraciones `ITEMAX` máximas ha sido reducido a 150 y el tipo de iteración `ITETYP` ha sido modificado a 1. En relación al número de iteraciones, ha *priori* no hay forma de saber si se requerirán más o menos iteraciones para el caso drenado en relación al no drenado, dependerá del tipo de carga, de los parámetros del material, etc. Lo más importante es la modificación de `ITETYP`, en efecto de acuerdo al manual el valor 1 es el correspondiente a un problema acoplado hidráulico-mecánico resuelto mediante el método de Newton modificado.

La siguiente modificación aparece en la definición de los nodos con 7 g.l.. Ya que el problema es ahora hidro-mecánico, se ha cambiado el código del séptimo grado de libertad `ID(7)=0` para permitir la existencia de una incógnita nodal asociada a la presión de poros.

A continuación se ha modificado las propiedades del fluido. En este caso, se ha optado por definir un fluido completamente incompresible `COMPRW=0`. Si bien en teoría este valor es correcto, a veces por razones numéricas es conveniente asignarle cierta compresibilidad al agua para controlar la reducción inicial de los esfuerzos efectivos ante una carga.

Finalmente se ha modificado un parámetro correspondiente a la descripción del tipo de elemento (volumen 2D). En este caso el valor correcto del parámetro `NPAR(6)` es 3 para indicar que se trata de un problema hidro-mecánico, con formulación de Biot simple ($u - p$).

Vale la pena comentar el parámetro `IDMIXT=0` empleado en la definición de los elementos. El valor 0 indica que se emplearán las mismas funciones de interpolación tanto para desplazamientos como presiones. Por tratarse de un elemento de 4, se trata de funciones lineales en este caso. Sin embargo, si se hubieran empleado elementos de orden mayor (cuadráticos), este parámetro nos habría permitido emplear un orden de distinto para presiones y desplazamientos (elementos mixtos).

2.2. Visualización del modelo desde *Matlab* y ejecución

Se sugiere realizar los mismos pasos de verificación descritos en el caso drenado. El procedimiento de ejecución del cálculo es idéntico al descrito en dicha sección.

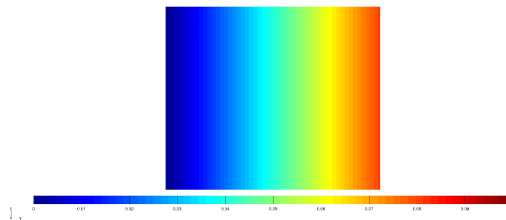
2.3. Post-análisis

2.3.1. Visualización

El procedimiento de visualización es análogo al descrito en los tutoriales anteriores. Por ejemplo para ver una deformada coloreada proporcionalmente a los desplazamientos en y podemos emplear:

```
>> gef_video('BXNMC2','y')
```

El gráfico obtenido será similar al de la figura siguiente:



2.3.2. Valores en los nodos

Como se mencionó en otros tutoriales, los valores nodales de desplazamientos y presiones son almacenados en el archivo binario en una matriz `UNOD`. Esta matriz matrices posee 3 índices:

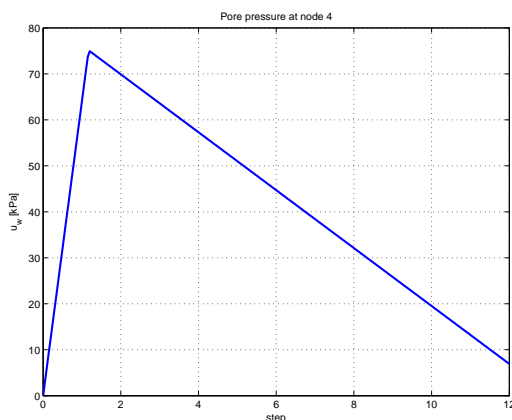
- número de nodo
- número de grado de libertad (7 campos): u_x , u_y , u_z , r_{xy} , r_{xz} , r_{yz} y u_w
- paso de tiempo guardado

En este ejemplo, si se desea trazar la evolución de la presión de poros del nodo número 4 se puede emplear las instrucciones siguientes:

```
>> UNOD=gefread('BXNMC2_SAVE UNOD');
>> Time=gefread('BXNMC2_SAVE TIME');

>> figure
>> plot(10*Time,1e-3*squeeze(UNOD(4,7,:)),'LineWidth',2)
>> xlabel('step')
>> ylabel('u_w [kPa]')
>> title('Pore pressure at node 4')
>> grid on
```

y se obtendrá



Cabe mencionar que se ha seleccionado el nodo número 4 en forma arbitraria, pero los resultados son idénticos para todos los nodos por tratarse de un ensayo homogéneo.

Es interesante notar que esta curva pone de manifiesto la tendencia del comportamiento volumétrico del material: inicialmente contractivo ($u_w > 0$) y luego dilatante ($u_w < 0$). Notar que por tratarse de un ensayo no drenado la variación de volumen es nula.

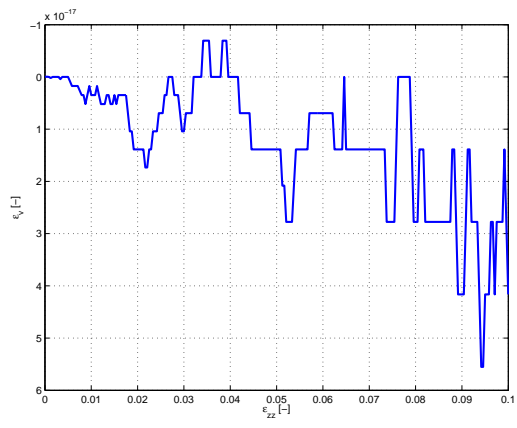
2.3.3. Valores en los puntos de integración

Para analizar los resultados, emplearemos la función `gef_hist_intpoints` descrita en otros tutoriales.

En este caso, conviene por ejemplo chequear la naturaleza no drenada de la respuesta, es decir, verificar que el cambio de volumen $\varepsilon_v = \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ es nulo durante todo el ensayo. Para ello, podemos emplear el código:

```
>> data.filename='BXNMC2';
>> data.win=[.5 1. .5 1.];
>> data.var=1:8;
>> data.pos=0;
>> data.group=1;
>> [POS,HIST]=gef_hist_intpoints(data);
>> Ezz=squeeze(HIST(1,6,:));
>> Eyy=squeeze(HIST(1,5,:));

>> figure
>> plot(-Ezz,-(Ezz+Eyy),'LineWidth',2)
>> xlabel('\epsilon_{zz} [-]')
>> ylabel('\epsilon_v [-]')
>> set(gca,'YDir','Reverse')
>> grid on
```



que corresponde a un valor razonablemente pequeño para verificar que el comportamiento es no drenado.

La lógica del ensayo es la misma a la descrita para el caso drenado, por lo que nos limitaremos a describir las modificaciones necesarias para el caso no drenado.

El archivo de comandos para efectuar el cálculo con GEFDyn es el siguiente:

Similarmente al caso biaxial, se modifica el código del tipo de problema IDDL=1001110, para permitir la variación de la presión de poros.

Luego, se modifica el campo ITETYP a 1 de forma de emplear el esquema de integración adecuado para un problema hidro-mecánico.

En la definición de los nodos, se modifica el campo `IDT(7)=0` para que los grados de libertad locales sean compatibles con el tipo de problema.

En la definición de las propiedades del fluido, se ha optado por emplear una compresibilidad **COMPRW** nula.

Finalmente, en la descripción general del grupo de elementos, se ha asignado al parámetro $\text{NPAR}(6)=3$, de forma de indicar a *GEFDyn* que existen 2 grados de libertad mecánicos (u_y y u_z) y uno hidráulico (u_w) por nodo. Más abajo, se ha modificado el ángulo de dilatación a $\psi = 5^\circ$ de acuerdo a los parámetros materiales definidos previamente.

No se requieren modificaciones adicionales para el caso no drenado.

Se sugiere realizar los mismos pasos de verificación descritos en el caso drenado. El procedimiento de ejecución del cálculo es idéntico al descrito en dicha sección.

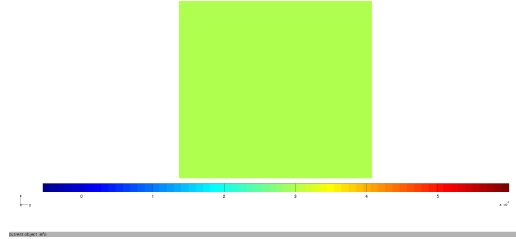
3.3. Post-análisis

3.3.1. Visualización

El procedimiento de visualización es análogo al descrito en los tutoriales anteriores. Por ejemplo para ver una deformada coloreada proporcionalmente a las presiones de poros u_w podemos emplear:

```
>> gef_video('TRXNMC2',1,'pint')
```

El gráfico obtenido será similar al de la figura siguiente:



Como se trata de un ensayo homogéneo, el color es uniforme en todo el elemento pues los valores en los puntos de integración son idénticos.

3.3.2. Valores en los nodos

Para extraer valores nodales se sigue exactamente el mismo procedimiento descrito en §2.3.2.

3.3.3. Valores en los puntos de integración

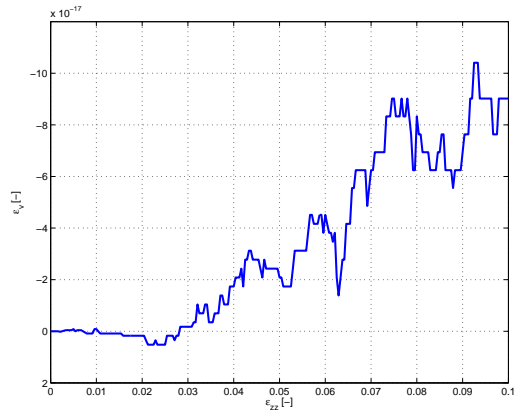
Para analizar los resultados, emplearemos la función `gef_hist_intpoints` descrita en otros tutoriales.

En este caso, conviene por ejemplo chequear la naturaleza no drenada de la respuesta, es decir, verificar que el cambio de volumen $\varepsilon_v = \varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}$ es nulo durante todo el ensayo¹. Para ello, podemos emplear el código:

```
>> data.filename='TRXNMC2';
>> data.win=[.5 1. .5 1.];
>> data.var=1:9;
>> data.pos=0;
>> data.group=1;
>> [POS,HIST]=gef_hist_intpoints(data);
>> Ezz=squeeze(HIST(1,6,:));
>> Eyy=squeeze(HIST(1,5,:));
>> Exx=squeeze(HIST(1,8,:));

>> figure
>> plot(-Ezz,-(Ezz+Eyy+Exx),'LineWidth',2)
>> xlabel('\epsilon_{zz} [-]')
>> ylabel('\epsilon_v [-]')
>> set(gca,'YDir','Reverse')
>> grid on
```

¹en este caso se debe considerar la deformación en la dirección x ya que se trata de un problema de simetría de revolución y no en deformaciones planas



que corresponde a un valor razonablemente pequeño para verificar que el comportamiento es no drenado.

Referencias

- [1] F. Lopez-Caballero & A. Modaressi. *Test élémentaires de comportement - Biaxial and Triaxial Tests*. MSS-MAT, Ecole Centrale Paris, 2006.