

Funcionamiento del modelo de presión de poros del programa “Cyclic 1D”

Por Heriberto Echezuría

1.- Introducción y planteamiento de la necesidad

En este artículo se evalúa la posibilidad de utilizar ensayos triaxiales monotónicos para evaluar los parámetros del programa Cyclic 1D. Este programa utiliza un modelo constitutivo que acopla el proceso de generación de presión de poros con el concepto de movilidad cíclica (“cyclic mobility”). Es decir, aplica a terrenos nivelados o con pendiente suave y se basa en el concepto de licuación inicial (“initial liquefaction”) que define la licuación cuando se alcanza una presión de poros igual al esfuerzo confinante. Adicionalmente, el modelo considera los procesos de contracción y expansión del suelo durante la carga cortante cíclica.

Justificación

Existe la incertidumbre con relación al uso de ensayos monotónicos para ajustar los parámetros que controlan las variables que permiten el proceso de desarrollo de presión de poros ya que dicho fenómeno se observa tanto en procesos de carga monotónica como cíclica.

Objetivo

Establecer la posibilidad de utilizar ensayos Triaxiales (TxT) monotónicos drenados y no drenados para definir los parámetros empleados en el Programa “Cyclic 1D” para evaluar el desarrollo de presiones de poros durante carga cortante cíclica en condiciones de movilidad cíclica (“cyclic mobility”).

Alcance

En este artículo se incluye solamente un resumen del modelo constitutivo destacando las variables que intervienen en el proceso de desarrollo de la presión de poros y los parámetros que permiten calibrarlas para poder predecir el comportamiento del suelo durante carga cortante cíclica. La demostración detallada de los procesos que describen la generación de presión de poros acoplada con esfuerzos y deformaciones escapa del alcance de este artículo. Los lectores interesados en los detalles y demostraciones sobre esos aspectos pueden consultar a Parra [1] y Yang [2].

2.- Resumen de los estados principales del modelo constitutivo y sus variables

En esta sección se muestra un resumen del modelo constitutivo empleado en el programa Cyclic 1D. La intención es mostrar las variables más resaltantes del mismo en cada etapa o fase del comportamiento del suelo junto con los parámetros que permiten su ajuste y calibración.

El modelo constitutivo se basa en el de plasticidad con múltiples superficies de cedencia (“multi-yield surface plasticity”) aplicado a suelos por Prevost [3] y modificado posteriormente por Parra [1] e incorporado en el Programa “Cyclic 1D” por Yang [2]. Dicho modelo asume que los materiales son lineales e isotrópicos y que la no linealidad se debe a la plasticidad. En este artículo, a menos que se indique lo contrario, los esfuerzos confinantes son efectivos para evitar confusiones en la notación con las componentes desviadoras de los tensores de las deformaciones plásticas.

La ecuación constitutiva básica tiene la expresión siguiente en forma incremental [1, 2]:

$$\boldsymbol{\sigma}_{inc} = \mathbf{E} : (\boldsymbol{\varepsilon}_{inc} - \boldsymbol{\varepsilon}_{inc-p}) \quad (1)$$

donde:

$\boldsymbol{\sigma}_{inc}$ es la tasa incremental del tensor de esfuerzos efectivos de Cauchy

\mathbf{E} es el tensor de coeficientes elásticos isotrópicos

$\boldsymbol{\varepsilon}_{inc}$ es el tensor de la tasa incremental de deformación

$\boldsymbol{\varepsilon}_{inc-p}$ es el tensor de la tasa incremental de deformación plástica

“:” es un operador de producto escalar

El parámetro \mathbf{E} es función de las siguientes variables [1, 2]:

$$\mathbf{E} = \mathbf{f}(\mathbf{B}, \mathbf{G}, \delta) \quad (2)$$

donde:

\mathbf{B} es el módulo isotrópico

\mathbf{G} es el módulo de corte

δ es un operador simétrico denominado delta de Kronecker.

El parámetro $\boldsymbol{\varepsilon}_{inc-p}$ es función de las siguientes variables: $\boldsymbol{\varepsilon}_{inc-p} = \mathbf{f}(\mathbf{P}, \mathbf{L})$

siendo \mathbf{L} a su vez una función de $\mathbf{L} = \mathbf{f}(\mathbf{H}', \mathbf{Q}$ y $\boldsymbol{\sigma}_{inc}$)

donde:

\mathbf{P} es un tensor de segundo orden simétrico que define la dirección de las deformaciones plásticas en el espacio de los esfuerzos. Controla la regla de flujo plástico y depende del confinamiento

\mathbf{H}' es la componente plástica del módulo elastoplástico, \mathbf{H} , en la curva base esfuerzo-deformación cortante (“backbone curve”)

\mathbf{Q} es un tensor de segundo orden simétrico que apunta hacia afuera en la superficie de cedencia.

$\boldsymbol{\sigma}_{inc}$ como definido arriba

El apropiado tratamiento matemático del modelo y las variables antes descritas con operadores matemáticos permite la ecuación (1) tal como se indica abajo:

$$\boldsymbol{\sigma}_{inc} = \mathbf{E} : \boldsymbol{\varepsilon}_{inc} - \mathbf{E} : \langle \mathbf{P}, \mathbf{L} \rangle \quad (3)$$

donde:

$\langle \cdot \rangle$ es un operador que hace $\mathbf{L} = \mathbf{L}$ si $\mathbf{L} > 0$; y $\mathbf{L} = 0$ para cualquier otro valor

En otras palabras, la tasa de cambio de esfuerzos en el suelo depende del confinamiento y tiene una componente isotrópica elástica y otra no lineal plástica (considere \mathbf{H}' y \mathbf{Q}) tal como se expresa el modelo básico arriba. Este es uno de los aspectos principales del modelo.

Para completar la descripción del modelo es necesario destacar que cada uno de los parámetros \mathbf{P} y \mathbf{Q} tienen componentes tanto en el campo de los esfuerzos (componente desviadora) como el de los volúmenes/deformaciones tal como se indica a continuación:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}' + \mathbf{P}'' \delta \quad (4)$$

$$\mathbf{Q} = \mathbf{Q}' + \mathbf{Q}'' \delta \quad (5)$$

donde

\mathbf{P}' es la componente desviadora de \mathbf{P} (campo de los esfuerzos)

\mathbf{P}'' es la componente volumétrica de \mathbf{P} (campo de las deformaciones)

δ tal como se definió arriba

\mathbf{Q}' es la componente desviadora de \mathbf{Q} (campo de los esfuerzos)

\mathbf{Q}'' es la componente volumétrica de \mathbf{Q} (campo de las deformaciones)

Como se verá más adelante cuando se describa el funcionamiento del modelo, durante el proceso de corte ocurre cedencia cuando el suelo exhibe comportamiento contractivo y se alcanza el estado de transformación de fase ("phase transformation"), lo cual ocurre antes de alcanzar la línea de falla o ángulo, ϕ . Este es un comportamiento particular de los materiales granulares muy diferente a lo observado en las arcillas y que constituye una de las bases del modelo. Por eso se describe dicho proceso a continuación.

Función de Cedencia

La función de cedencia que representa los estados de esfuerzos a los cuales el flujo plástico ocurre tiene la siguiente forma [1, 2]:

$$f_c = 3/2 (\mathbf{s} - p_a \alpha) : (\mathbf{s} - p_a \alpha) - M^2 p_a^2 = 0 \quad (6)$$

donde

\mathbf{s} $\sigma - p\delta$ tensor de esfuerzos desviadores

σ tensor de estados de esfuerzos efectivos de Cauchy [1, 2]

p_a $p - a$

p esfuerzo octaédrico efectivo promedio

a constante del suelo ($a = c / \tan \phi$, con c = cohesión y ϕ ángulo de fricción)

α tensor desviador cinemático, define las coordenadas del centro de la superficie de cedencia en el sub-espacio de esfuerzos desviadores

M parámetro del suelo que define el tamaño de las superficies de cedencia, de las cuales, la última está relacionada con el ángulo de fricción, ϕ .

La superficie de cedencia (“yielding”) puede combinarse con la curva esfuerzo-deformación al corte (“backbone curve”), la cual tiene expresión hiperbólica, según se indica a continuación y se muestra en la Fig. 1A [1, 2]:

$$\tau = G \gamma / (1 + \gamma / \gamma_r) \quad (7)$$

donde:

- τ esfuerzo cortante
- γ deformación cortante octaédrica
- γ_r deformación cortante a un valor referencial octaédrico
- G tal como se definió arriba

En la Fig. 1B [2] se muestra la correspondencia entre las trayectorias de esfuerzos con las deformaciones, de acuerdo con el modelo de Prevost modificado por Parra [1].

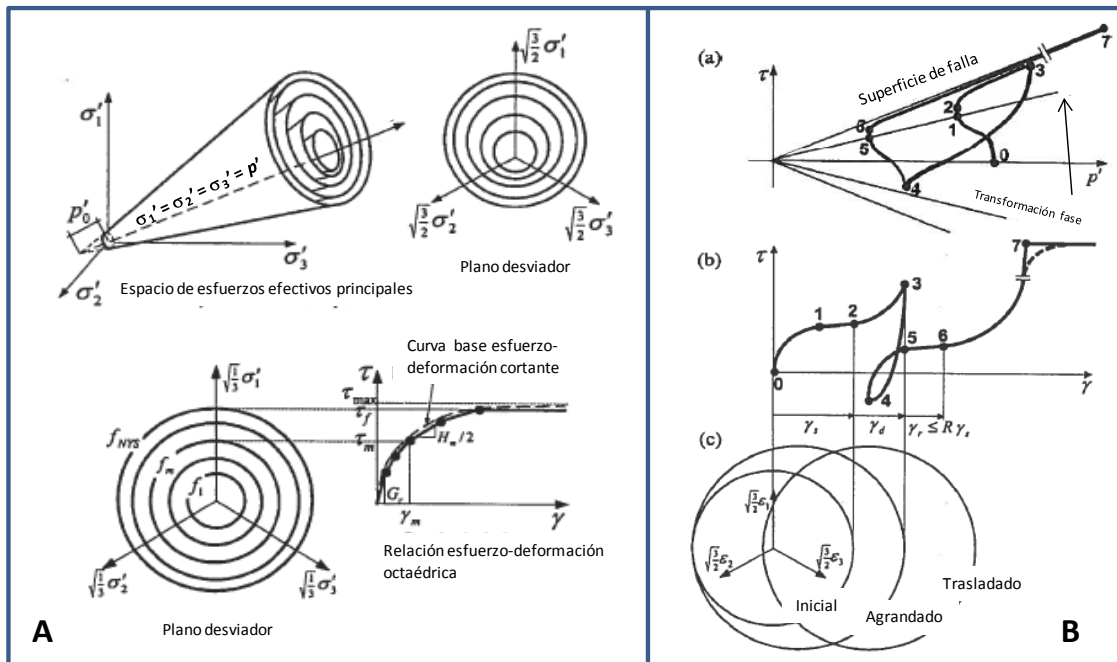


Fig. 1. 1A) Representación de la función de cedencia en el espacio isotrópico y su conexión con la relación esfuerzo-deformación cortante, y 1B) Correspondencia entre trayectorias de esfuerzos con deformaciones de acuerdo con el modelo de Prevost modificado por Parra y las curvas de cedencia. Modificada de Yang [2]

Contracción y Expansión

El modelo se asume también como no asociativo, lo cual implica que la componente expansiva (“dilatational”) de las deformaciones no es normal a la superficie de cedencia en el modelo de plasticidad. Por ende, sólo la componente contractiva de las deformaciones cumple con esa regla, y fue la modificación fundamental que incorporó

Parra [1] al modelo de plasticidad. Considerando lo explicado entonces con relación a las componentes de los tensores \mathbf{P} y \mathbf{Q} , entonces, para que la componente expansiva de las deformaciones no sea normal a la superficie de cedencia implica las siguientes expresiones:

$$\mathbf{P}' = \mathbf{Q}' \quad \text{y} \quad \mathbf{P}'' \neq \mathbf{Q}'' \quad (8)$$

Con base en lo anterior, se puede demostrar que la capacidad de contracción del suelo de acuerdo con el nivel de confinamiento viene dada por [1]:

$$\psi_c = c_1 \exp(c_2 p / P_a) \quad (9)$$

donde c_1 y c_2 son dos constantes para calibrar la tendencia a la contracción del suelo y P_a es la presión atmosférica.

Para la fase expansiva la expresión es [2]:

$$\psi_d = d_1 \exp(d_2 \boldsymbol{\varepsilon}_D) \quad (10)$$

donde d_1 y d_2 son dos constantes para calibrar la tendencia a la expansión del suelo y $\boldsymbol{\varepsilon}_D$ es la deformación octaédrica al corte acumulada durante la fase de expansión ("dilation") de la trayectoria de esfuerzos. El parámetro ψ_d define cuán rápido el material dilata con la deformación por corte después de la línea de transformación de fase

Regla de deformación por deslizamiento y regla de endurecimiento

Hay otros dos efectos importantes que el modelo toma en consideración, el primero se refiere a la fase de deformación por deslizamiento (slip-strain phase), la cual incluye otro parámetro de control para calibración. Este efecto permite predecir la cantidad de deformación durante la etapa de confinamiento isotrópico del suelo.

$$\gamma_{smx} = y_2 \cos^{y_3} (\pi p / 2 y_1) \quad (11)$$

donde y_1 es un esfuerzo confinante umbral, y_2 es la deformación por deslizamiento máxima para la condición de cero confinamiento y y_3 es un parámetro de ajuste. Note que es un exponente del coseno en la expresión de la ec(11). Este parámetro también sirve para controlar el daño acumulado durante la etapa de expansión luego de alcanzar y superar la línea de transformación de fase.

El segundo efecto es una regla para el endurecimiento no asociativo que está relacionado con las fases de expansión del suelo. La regla de endurecimiento especifica la modificación de la condición de fluencia durante el flujo plástico. El efecto de esta regla es que las superficies de cedencia, excepto la más externa, pueden trasladarse en el espacio de esfuerzos.

Eso es para cumplir con la condición de consistencia de la plasticidad antes mencionada, que dice que durante la ocurrencia de deformación plástica los estados de esfuerzos deben permanecer en el límite de la región elástica. Esto genera otra condición que debe ser chequeada, cuyo efecto es ajustar las curvas de cedencia mientras el material se expande y endurece, tal como se muestra en la Fig. 1B. La expresión matemática de esta última regla se indica a continuación:

$$\boldsymbol{\mu} = (\mathbf{S}_T - p_a \boldsymbol{\alpha}_m) - \frac{M_m}{M_{m+1}} (\mathbf{S}_T - p_a \boldsymbol{\alpha}_{m+1}) \quad (12)$$

donde: donde: μ , es la dirección de la traslación superficial y α_m la cantidad de traslación de cada superficie. Para asegurar que no haya intersección entre dichas superficies y sean tangentes en el punto de referencia f_m , debe cumplirse lo indicado abajo para todas dichas superficies, véase la Fig. 1B:

$$\frac{S - p_a \alpha_m}{M_m} = \frac{S - p_a \alpha_{m-1}}{M_{m-1}} = \frac{S - p_a \alpha_{m-2}}{M_{m-2}} = \dots = \frac{S - p_a \alpha_0}{M_0} \quad (13)$$

De esta manera quedan definidas todas las variables del modelo con sus constantes para calibración. En la sección siguiente se describen dichas variables en detalle para mejorar el entendimiento del funcionamiento del modelo.

Resumen de las variables y parámetros más importantes en las fases del modelo

De acuerdo con lo expresado en la sección anterior, los parámetros más importantes del modelo corresponden a dos grupos bien diferenciados, a saber [1, 2]:

- i) de resistencia
- ii) de cambio de volumen.

Los parámetros de cambio de volumen incluyen las etapas de contracción del volumen y la expansión o aumento del volumen (dilation). Se definen así el estado contractivo y el expansivo, a los cuales se hará referencia en lo sucesivo. También incluyen una etapa de movilidad cíclica cuando los esfuerzos oscilan alrededor de cero y el esfuerzo de confinamiento.

A continuación se indican los parámetros asociados tanto con la resistencia como con el cambio de volumen durante el corte. En la sección siguiente se describe el rol de cada uno de ellos incluyendo la contracción y la expansión en detalle.

Resistencia, incluye los siguientes parámetros:

- a) ángulo de fricción,
- b) ángulo de cambio o transformación de fase, "PT"
- c) módulo de corte,
- d) relación de Poisson;

Contracción, incluye:

Los parámetros c_1 y c_2 que indican cuán rápido el suelo genera presión de poros. Son equivalentes a los parámetros A y B en las arcillas.

El parámetro γ_s que sirve para controlar la deformación cedente que ocurre al alcanzar la línea de Transformación de Fase.

El confinamiento (P') que ayuda a establecer los cambios en la reducción del volumen del suelo a medida que avanza el proceso de corte, de acuerdo con la trayectoria de

esfuerzos. Este parámetro es muy útil para controlar la trayectoria de esfuerzos en muestras contractivas por encima de la línea de transformación de fase.

Expansión:

El parámetro, ψ_d , controla el comportamiento de los granos durante la dilatación. Este parámetro es exponencial con la deformación acumulada, ϵ_D . El mismo depende de otros dos parámetros d_1 y d_2 para ajustar la trayectoria de esfuerzos durante la dilatación entre la línea de transformación de fase y la de falla.

3.- Descripción detallada de las fases del corte no drenado

El modelo asume que entre las curvas de transformación de fase el comportamiento es contractivo y entre las curvas de transformación de fase y las de falla, ocurre la expansión. Véase la Fig. 2. Hay un caso especial de contracción por encima de la línea de transformación de fase cuando el suelo ha cambiado de estado aumentando de volumen y al invertir los esfuerzos trata de volver al confinamiento inicial, pero para ese momento ya hay daño acumulado y la estructura inicial ha cambiado.

A continuación se describen las distintas fases que pueden ocurrir durante el corte no drenado utilizando el gráfico de la Fig. 2, el cual contiene una trayectoria de esfuerzos que cambia de contractiva a expansiva y viceversa en varias ocasiones. En esa trayectoria de esfuerzos se indican varios puntos que la acoplan con la curva esfuerzo deformación, lo cual permite realizar un seguimiento estrecho entre las condiciones de deformación del suelo con los cambios en la trayectoria de esfuerzos.

Contracción entre las líneas de transformación de fase

El proceso de inicia en el punto "0" que describe el confinamiento inicial, el cual es isotrópico en este caso. Al mover la trayectoria de esfuerzos de "0" a "1" en la Fig. 2, se alcanza el ángulo o línea de transformación de fase "PT". Al estar en la línea de transformación de fase, es decir en el punto "1", el comportamiento depende de cuán dilatante es la muestra. Las opciones dependen de la densidad del material y el arreglo de granos.

Si el trabamiento ("interlocking") de los granos es muy débil y, por ende, la tendencia de la muestra es a la contracción, entonces se debe registrar un flujo plástico en cedencia ("yielding with plastic flow") con aumento de la deformación pero no de la resistencia. En este estado, la muestra se deforma sin cambiar de volumen. Por eso, se muestra en la curva esfuerzo deformación de la Fig. 2 que al pasar de "1" a "2" aumenta la deformación aunque no se aplique carga.

Seguidamente, una vez alcanzado el punto "2" y ocurrido la deformación, γ_v , los granos comienzan a trabarse ("interlocking") y empieza el aumento de volumen que genera la expansión del suelo por estar moviéndose por encima de la línea de transformación de fase hacia la línea de falla. Esta tendencia a la expansión produce presiones negativas que endurecen el material al aumentar los esfuerzos en los contactos entre los granos ("hardening"). A medida que aumenta la carga y el comportamiento expansivo del suelo, eventualmente se alcanza el punto "3", para un nivel dado de carga.

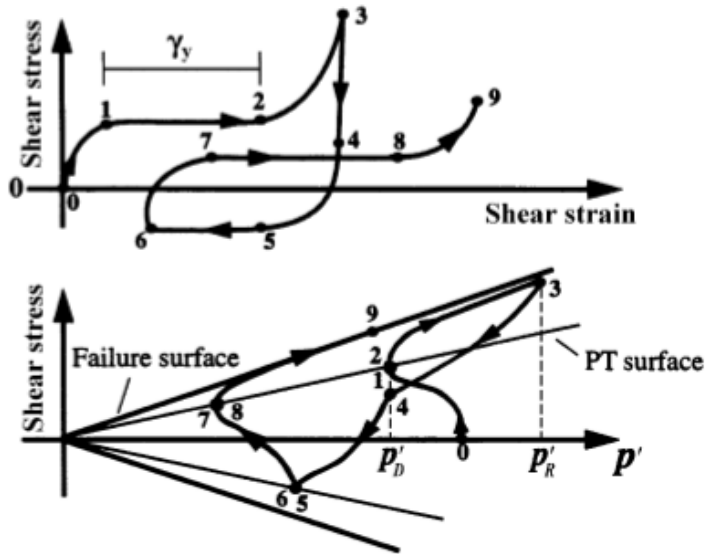


Fig. 2. Schematic of constitutive model response showing shear stress, effective confinement, and shear strain relationship.

Fig. 2. Diagrama esquemático de la respuesta con el modelo constitutivo mostrando esfuerzos cortantes, confinamiento efectivo y la relación esfuerzo-deformación

Contracción encima de la línea de transformación de fase:

Luego de alcanzar el punto “3” y al ser descargado el suelo, cambia la generación de presión de poros de negativa a positiva, es decir, aparece de nuevo la tendencia a la contracción, con lo cual las presiones de poros bajan igual que los esfuerzos entre los granos, es decir, ahora hay ablandamiento del material (softening). Entonces, el material trata de conseguir de nuevo el punto “1” pero debido a que hay “daño” acumulado, en realidad el material regresa al punto “4” para la misma condición de confinamiento inicial P' en “1”. En consecuencia, el comportamiento de “3” a “4” es realmente un colapso de la estructura, la cual depende del cambio en confinamiento (P') al pasar de “2” a “3”. Eso supone cambiar la contracción P'_D del punto “1” al P'_R del punto “3”. Mientras continúa la descarga eventualmente se alcanza la PT inferior en el punto “5”. En esa condición la muestra nuevamente experimentará deformación sin que ocurra cambio de la carga hasta alcanzar el punto “6”. Recuérdese que el modelo considera que el comportamiento entre las PT es contractivo.

Expansión

Si al alcanzar el punto “6” se invierte la carga, el comportamiento continúa siendo contractivo hasta alcanzar el punto “7” en la PT superior y se repite la aparición de deformación sin aplicación de carga hasta el punto “8”. Véase la Fig. 2. En esa condición, los granos logran de nuevo trabamiento (interlocking) al estar por encima de la línea de transformación de fase y buscando la línea de falla, por lo que se generan presiones negativas al buscar expandir el volumen hasta alcanzar el punto “9” de la trayectoria de esfuerzos. Para esa condición la curva esfuerzo-deformación crece exponencialmente tal como ocurrió en el paso de “2” a “3”. Nótese que mientras más cercano esté el punto “7”

del origen, se está más cerca de la movilidad cíclica pues se pueden alcanzar condiciones de cero, o muy cercanos a cero, esfuerzos efectivos.

A continuación se describen los procesos asociados con cada estado del suelo durante el corte, para describir en detalle los parámetros que participan en dichos procesos, haciendo de nuevo referencia a la Fig.2.

4.- Discusión sobre la calibración y verificación del modelo

El proceso de calibración es muy detallado y riguroso, tal como se indicó en los párrafos anteriores y se ilustra en la Fig. 3 para algunos puntos específicos. Es decir, en cada condición (puntos) del suelo de la Fig. 2 donde se modifique el comportamiento del suelo, todos los parámetros de las variables deben ajustados para calibrarlas correctamente.

Adicionalmente Yang [2] señala que hay que realizar análisis rigurosos para detectar los valores óptimos de cada parámetro durante dicha calibración. Considerando este aspecto, el programa trae incluidos valores típicos calibrados que son representativos de un rango amplio de densidades de arenas y condiciones de otros suelos.

Esos parámetros sólo deberían ser modificados si existe una fuerte evidencia de cambio debido a la naturaleza del suelo a estudiar. En caso de requerir calibraciones para condiciones o materiales muy diferentes a los que trae el programa, es conveniente contar con una versión del programa que permita hacer esas modificaciones a los valores incluidos para ajustar los parámetros de las distintas variables y ser lo más riguroso posible en el proceso.

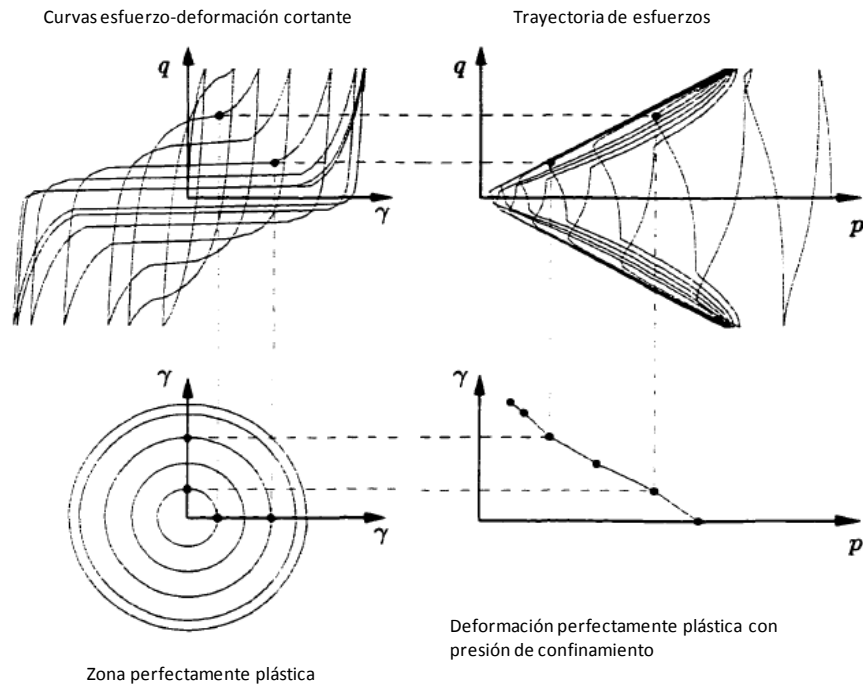


Fig. 3 Proceso de calibración del programa utilizando resultados de un ensayo CycDSS

Los parámetros básicos del modelo se pueden inferir de ensayos monotónicos drenados, de hecho Parra [1] y Yang [2] así lo indican. Estos parámetros son:

- i) la curva base esfuerzo deformación (“backbone curve, or stress-strain curve”),
- ii) los módulos de corte, G , e isotrópico, B .
- iii) coeficiente de Poisson

Por otra parte, los parámetros de contracción y expansión también se pueden obtener de ensayos monotónicos no drenados que incluyan ambas fases alternadamente en su trayectoria de esfuerzos, es decir, pasen de contractivos a expansivos y de allí a contractivos nuevamente, moviéndose entre las curvas de transformación de fase y las de falla, tal como se ilustra en la Fig. 2. De hecho, Parra [1] también ha utilizado ese tipo de ensayos para la calibración de su modelo. Estos parámetros son:

- a) la línea de falla
- b) la línea de transformación de fase
- c) los parámetros c_1 y c_2
- d) los parámetros, ψ_d , d_1 y d_2

Por otra parte, también existen otros elementos de control para representar el comportamiento cíclico que dependen de las siguientes funciones incluidas en el modelo:

1. la regla de flujo plástico (“flow rule”)
2. la función de endurecimiento (“hardening rule”) comportamiento expansivo
3. la función de cedencia (“yield function”) durante comportamiento contractivo, incluyendo el número de superficies que se deseen (“nested surfaces”). Valores típicos para las mismas oscila entre 10 y 15. Recuérdese que esto también requiere ajustes de las cantidades de segmentos en la curva base de esfuerzos deformación cortante (“backbone curve”)

Calibración entre las líneas de transformación de fase o por fuera de ellas

Para calibrar el proceso de contracción entre las líneas de transformación de fase, es decir la curva del punto “0” al “1” (o del “3” al “5” o del “6” al “7” en la Fig. 2) se utilizan los parámetros c_1 y c_2 que indican cuán rápido el suelo genera presión de poros. Estos parámetros son equivalentes a los parámetros A y B en las arcillas. Los mismos pueden calibrarse con base en el comportamiento de ensayos monotónicos o cíclicos con la trayectoria de esfuerzos partiendo del confinamiento inicial hasta alcanzar el ángulo o línea de transformación de fase “PT”. Véase la Fig. 2.

Cuando se utilizan ensayos Triaxiales (TxT) monotónicos para el tramo “0” a “1” se hace $c_2=1.0$ (al final de la consolidación) y se ajusta c_1 con los resultados del incremento de presión de poros durante el ensayo. Para los otros casos de carga entre “3” y “5” y entre “6” y “7” se deben ajustar los valores de los parámetros a las condiciones al final de la expansión o contracción, respectivamente y volver a calibrar. Es oportuno recordar que el comportamiento de la presión de poros entre las líneas de transformación de fase (“PT”) siempre lo controla el confinamiento, P' , entonces el punto donde hay el cambio de fase, P'_D , resulta muy importante. Véase la Fig. 2.

Recuérdese que el paso de “1” a “2” (o de “5” a “6” o de “7” a “8”) depende de la tendencia a la contracción del suelo al alcanzar la PT. En ese punto ocurrirá deformación a volumen constante sin aplicación de carga. Por eso, se muestra en la Fig. 2 que al alcanzar las

trayectorias de esfuerzos las líneas PT se experimentan deformaciones aunque no se aplique carga. El comportamiento con flujo plástico en cedencia utiliza el parámetro γ_v para controlar la deformación que ocurre de “1” a “2” (o de “5” a “6” o de “7” a “8”) con comportamiento contractivo. Para los ensayos monotónicos este parámetro es constante, pero en los ensayos dinámicos existe una variación que depende de la deformación total acumulada cercano a la licuación o condición de cero esfuerzo efectivo, que es similar a los parámetros de daños en los materiales. En este último caso se consideran dos parámetros adicionales y_1 y y_2 para variar γ_v con la deformación plástica acumulada en ensayos dinámicos ya que la misma puede ser diferente a la acumulada en ensayos monotónicos.

Expansión:

Para calibrar el paso del punto “2” al punto “3” (o de “7” a “9”) en la Fig. 2, se debe tener en cuenta la densidad relativa del material y el arreglo de los granos. En este caso se utiliza el parámetro, ψ_d , el cual es exponencial con la deformación acumulada hasta el punto “2” (o hasta el “7”) junto con los dos parámetros d_1 y d_2 . Estos dos últimos parámetros también pueden ser calibrados con ensayos monotónicos.

Aspectos adicionales sobre la calibración del modelo

Si se decide realizar la calibración de los parámetros del modelo utilizando ensayos TxT monotónicos se recomienda ejecutarlos con procesos de carga-descarga-recarga repetidos varias veces para garantizar que la trayectoria de “6” a “7” se cumple. Véase la Fig. 2. Esto daría más seguridad al utilizar los datos de los ensayos monotónicos. No obstante, el proceso de laboratorio sería mucho más largo ya que habría que hacer los ciclos de carga y descarga a la velocidad de dichos ensayos, la cual es bastante baja, y, además, parar el ensayo al final de cada ciclo para permitir que las presiones de poros se homogenicen y estabilicen dentro de la muestra antes de invertir las cargas. Aquí queda pendiente la deformación acumulada en procesos cíclicos que no es necesariamente igual durante procesos monotónicos.

Por otra parte, si para la calibración del modelo se utilizan datos de ensayos TxT monotónicos que cubran solamente las trayectorias de “1” a “4” en la Fig. 2, se debe verificar que el modelo sea capaz de predecir el comportamiento de ensayos cíclicos TxT-Cy. De esta manera se cubre adecuadamente el proceso de generación de presión de poros de “6” a “7”.

Una vez calibrados los parámetros con los resultados monotónicos, entonces se deben hacer algunas corridas con ensayos cíclicos para ajustar más los parámetros cerca de la licuación o movilidad cíclica, es decir cercanos a la condición de esfuerzos de confinamiento nulos. Con relación a ese punto, Parra [1] sugiere que si no se cuenta con ensayos cíclicos se podría asumir el esfuerzo confinante mínimo para movilidad cíclica entre 5 y 10 kPa, o se podrían utilizar los valores recomendados por Yang [2] con la densidad relativa tanto para la contracción y expansión como para los parámetros de acumulación de deformación plástica.

Recuérdese que es necesario verificar de alguna manera el efecto de la acumulación plástica utilizando ensayos CycDSS. Sin embargo, es posible que el impacto en esos resultados pudiera ser poco significativo, para efectos de predicción de las presiones de poros durante movilidad cíclica, si se determinan adecuadamente y en la forma descrita, en los párrafos anteriores, los parámetros principales del modelo utilizando ensayos TxT monotónicos. No obstante, esto debe ser verificado experimentalmente.

5.- Conclusiones

Es posible utilizar ensayos TxT monotónicos para determinar los parámetros empleados por el programa "Cyclic 1D" para predecir el desarrollo de presiones de poros durante procesos de carga cortante cíclica. Hay que tener mucho cuidado en verificar adecuadamente si hay influencia significativa de las deformaciones acumuladas durante los procesos cíclicos en comparación con los procesos monotónicos. Sin embargo, esto podría no ser muy importante desde el punto de vista ingenieril para estimar las presiones de poros para condiciones de movilidad cíclica.

Es necesario destacar sin embargo, que el proceso de calibración es riguroso e involucra todos los posibles cambios de comportamiento del suelo iniciando con el contractivo pasando a expansivo y viceversa en varios ciclos. En dichos ciclos se debe alcanzar las líneas de transformación de fase y extender los procesos de carga hasta las líneas de falla. Adicionalmente, se debe tener mucho cuidado de seleccionar los valores de los parámetros que constituyen los óptimos considerando el método empleado para selección y ajuste de los mismos.

Por otra parte, también se deben chequear otros aspectos del modelo constitutivo que garanticen que no se dejan de cumplir los axiomas importantes del modelo básico de plasticidad. Estos se refieren a la función de cedencia incluyendo el número de superficies empleadas, la regla de flujo plástico la regla de endurecimiento.

Finalmente, hay que destacar que los ensayos TxT monotónicos no drenados se realizan a velocidades relativamente bajas en comparación con los cíclicos. Adicionalmente, para realizar los cambios de carga y descarga se debe parar los ensayos antes de ejecutar dichos cambios, para permitir la homogenización y ajuste de las presiones de poros dentro de las muestras. Todos esos aspectos conducen a anticipar que dichos ensayos tomarán tiempos bastante largos.

6.- Referencias

- 1 Parra, E., *Numerical modeling of liquefaction and lateral ground deformation including cyclic mobility and dilation response in soil systems*, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, March, 1996
- 2 Yang, Z., *Numerical modeling of earthquake site response including dilation and liquefaction*, PhD Thesis, Columbia University, 2000.
- 3 Prevost, J. H., "A Simple Plasticity Theory for Frictional Cohesionless Soils", *Soil Dyn. And Earthquake Engineering*, 4, 1, 9-17, 1985.