

## DEGRADACIÓN DE SUELOS ANTE TENSIÓN DE CORTE CÍCLICA

### SOIL DEGRADATION UNDER CICLIC SHEAR STRESS

**Rubén Ángel Galindo-Aires, Ph.D**

*Departamento Ingeniería de caminos, canales y puertos  
Universidad Politécnica de Madrid, España  
ragalindoa@hotmail.com*

(Recibido el 01-05-2013. Aprobado el 30-06-2013)

**Resumen.** En este artículo se estudia el fenómeno de degradación y se proponen dependencias con las variables que intervienen en el problema, planteando la formulación matemática que caracteriza la deformación acumulada y la generación de presión intersticial asociada al fenómeno cíclico. Primeramente se plantea el marco teórico necesario para el adecuado estudio del fenómeno dinámico asociado al proceso de carga tangencial cíclica. A continuación, se introduce un nuevo concepto llamado “ciclo límite” que sirve de referencia para el seguimiento de la degradación del suelo. Por último, se identifican las variables fundamentales que intervienen en el problema de estudio y se plantea, en base a una completa campaña de ensayos disponibles de una investigación anterior, la formulación matemática que permite la caracterización y cuantificación de la deformación acumulada y la generación de presión intersticial generada con el número de ciclos de carga.

**Palabras clave:** Degradación, corte cíclico, generación de presión intersticial, suelos cohesivos, dinámica de suelos.

**Abstract.** The article describes the phenomenon of degradation and dependencies with the variables involved in the dynamic problem are proposed, considering the mathematical formulation that characterizes the cumulative deformation and pore pressure generation associated with cyclical phenomenon. First, the necessary theoretical framework for the proper study of dynamic phenomena associated with the process of cyclic shear load is raised. Then, a new concept called “limit cycle” that serves as a reference for monitoring soil degradation is introduced. Finally, the fundamental variables involved in the study problem are identified and is raised, based on an earlier test campaign of an available research, the mathematical formulation that allows the characterization and quantification of the accumulated deformation and generation of pore pressure with the number of load cycles.

**Keywords:** Degradation, simple shear, pore pressure generation, cohesive soils, soil dynamics.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las características de comportamiento de un suelo sometido a carga cíclica tangencial, crea los siguientes efectos desfavorables:

- Amplificación dinámica en problemas reales, en función de las acciones actuantes, características de los terrenos, contornos y geometría que los definan.
- Fenómenos de fatiga de los materiales resistentes que provocarían la disminución de los parámetros de respuesta.
- Generación de presión intersticial creciente con los ciclos de carga tangencial en los suelos blandos.

Consideramos que el fenómeno fundamental y diferenciador, frente a otros problemas y planteamientos de la mecánica de suelos, es el de generación de presión intersticial que puede ocasionar, en el caso de terrenos granulares poco densos, fenómenos de licuefacción y en el caso de suelos blandos cohesivos, grandes deformaciones en pocos ciclos de carga.

Es objeto del artículo obtener una formulación matemática del fenómeno de degradación y de generación de presión intersticial basada en una completa campaña de experimentación disponible.

En el apartado 2 se realiza, en primer lugar, la descripción del método de análisis teórico de la degradación de los suelos, así como una breve descripción de las muestras y de la etapa experimental. En el apartado 3 se presentan algunas consideraciones de los resultados obtenidos experimentalmente, que permiten la formulación matemática de la generación de presión intersticial producida y de la deformación acumulada con el número de ciclos, debido a la degradación inducida por la carga cíclica. Por su parte, en el apartado 4 se presentan las principales es del trabajo. Al final del documento se añaden las nuevas líneas de investigación y las referencias empleadas.

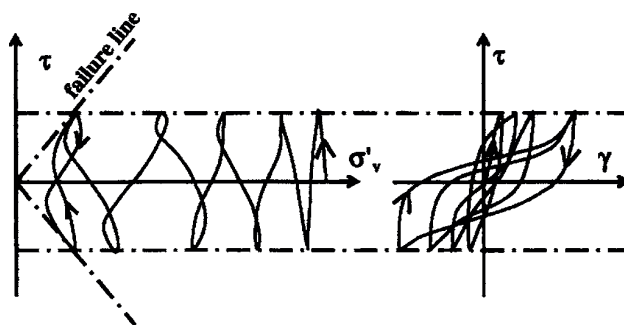


Fig. 1. Resultados experimentales tensión-deformación, obtenidos en muestras sometidas a corte cíclico no drenado (de Groot, Bolton and Foray [1]).

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estudio dinámico del suelo

El comportamiento de los suelos blandos, bajo la actuación de cargas tangenciales cíclicas, se caracteriza por cambios volumétricos importantes y relaciones tensión-deformación que resultan claramente inelásticas. La importancia de estos fenómenos viene dada principalmente por la amplitud de la tensión tangencial que recibe el suelo, su estado de confinamiento y sus características de compresibilidad que lo definen como suelo blando. Al aumentar el nivel de deformación tangencial, producida en el suelo, las curvas tensión-deformación muestran un comportamiento inelástico y no lineal y, en cada rama de respuesta, van adoptando una geometría muy característica en forma de "s". En la Fig. 1 (tomada de [1]) se muestra, en el gráfico de la derecha, las formas de dichas curvas tensión-deformación —según el nivel de deformación alcanzado—, representándose en ordenadas la carga tangencial solicitante  $\tau$  y en abscisas la deformación de corte producida  $\gamma$ ; también se representa en dicha figura, en el gráfico de la izquierda, el fenómeno asociado de generación de presión intersticial del suelo saturado (en abscisas se representa la tensión vertical efectiva entre partículas del suelo  $\sigma'_v$ , que se hace cada vez más pequeña, lo cual es debido a que parte de la tensión vertical actuante es absorbida por el agua intersticial).

El hecho de que los ciclos tensión-deformación sean cada vez más tendidos es la manifestación de la degradación de las propiedades resistentes del suelo que se hace menos rígido, como consecuencia de la pérdida de confinamiento al generarse presión in-

tersticial en exceso y de la fatiga del material sometido a un continuado y repetido nivel tensional que, en general, será de amplitudes y periodos variables.

## 2.2 Caracterización del ciclo límite

En unos determinados modelos matemáticos conocidos como “modelos de la superficie frontera”, se define una superficie límite que sirve de proyección a los estados interiores y que no será superada en ningún momento del proceso de carga; es decir, incorporar las fronteras del dominio para la tensión tangencial supone definir un ciclo límite [2] que, en principio, no puede ser superado. *A priori*, se puede pensar que el ciclo máximo posible vendrá dado por el valor de rotura alcanzable en el ensayo de corte simple estático, de forma que los valores que se alcanzan habitualmente, como tensión tangencial límite o de rotura  $\tau_{lim}$  de un ensayo de corte, se cuantifican con  $\tau_{lim} = c t \sigma'_{v0}$   $\tau_{lim} = c t \sigma'_{v0}$ , siendo  $\sigma'_{v0}$  la tensión vertical efectiva inicial y la constante un valor que, en virtud de las propiedades del suelo ensayado, se suele encontrar entre 0,2 y 0,35.

La definición del ciclo límite que se propone en este artículo permite entender la degradación en relación a la magnitud de las deformaciones que se vayan alcanzando (deformación límite  $\gamma_{lim}$ ) al aplicar la tensión límite, es decir, la máxima tensión del ciclo límite.

En un proceso de degradación del suelo con el número de ciclos, es evidente que la deformación máxima alcanzable va aumentando al evolucionar el número de ciclos para la misma secuencia de carga cíclica; en este caso se definiría un ciclo límite para cada ciclo. Por tanto se trata de definir una deformación máxima que, según el número de ciclos, le corresponda al valor de la máxima tensión actuante.

Sin embargo, según la llamada “teoría del estado crítico”, la rotura como tal, en suelos blandos, supone la evolución de la tensión de corte hasta mantener un nivel prácticamente constante en el que la muestra de suelo sigue deformándose a la misma velocidad. Así, para establecer la rotura en los ensayos de corte simple estáticos, se fija un nivel máximo de deformación donde se detiene el ensayo que corresponde al entorno del 15%. Este hecho no hace apropiado identificar el ciclo límite con el punto de rotura del ensayo estático ya que le correspondería una determinada deformación y, por tanto, perdería sentido el

uso de dicho concepto de ciclo límite para definir la degradación en función de la deformación máxima alcanzable.

En nuestro caso, se dispone de un suelo blando procedente del subsuelo del Puerto de Barcelona sobre el que, fruto de una investigación anterior [3], se realizaron ensayos de corte simple cíclico, combinando diferentes proporciones de carga tangencial inicial y cíclica hasta un total de 142 ensayos, de los cuales 20 corresponden al corte simple estático. El ensayo tangencial estático, para dichas muestras, dio tensiones de rotura con valores aproximados de  $\tau_{lim} = 0,30 \cdot \sigma'_{v0}$   $\tau_{lim} = 0,30 \cdot \sigma'_{v0}$ . Evidentemente, en los ensayos de corte simple cíclicos no se lleva la carga externa a ese máximo obtenido en la prueba estática sino que, como va a haber además degradación, se alcanzó un porcentaje menor que la que produce la rotura estática; por tanto, se disponen ensayos (sin carga de corte inicial) al 15%, 20% y 25% de la tensión vertical efectiva inicial  $\sigma'_{v0}$ . Además, la deformación máxima a la que se llega en cada ensayo varía con cada ciclo, subiendo con el número de ciclos.

Para definir el ciclo límite se toman como valores frontera, para un determinado ciclo de un ensayo, los valores de la deformación máxima (deformación límite) alcanzada en dicho ciclo y como valor de la tensión tangencial frontera, su correspondiente tensión de corte. Esto es así por varios motivos, el primero de ellos es que los valores frontera —deformación y tensión— están referidos y de producirse deben alcanzarse los dos en el mismo momento del proceso de carga. Asociar a la deformación de corte máxima un valor diferente de la tensión de corte, con la que se produjo en un ensayo, supone que la tensión de corte que produce esa deformación de corte máxima, en el modelo que usemos, será diferente a la real. Por otro lado, hay que notar que matemáticamente no hay ninguna incongruencia ni bloqueo de la solución al introducir valores superiores a los valores límite.

La mejor aproximación al comportamiento del suelo se logra utilizando como ciclo límite el que corresponde al de mayor tensión de corte cíclica, previsible en el problema geotécnico que se plantea resolver. Así, por ejemplo, si disponemos de ensayos al 15% y 20% de la tensión vertical efectiva inicial, la mejor elección de parámetros para un problema geotécnico, que no someterá al suelo en ningún momento a tensiones superiores al 15%, se obtendrá utilizando como ciclo límite el que corresponde al 15%.

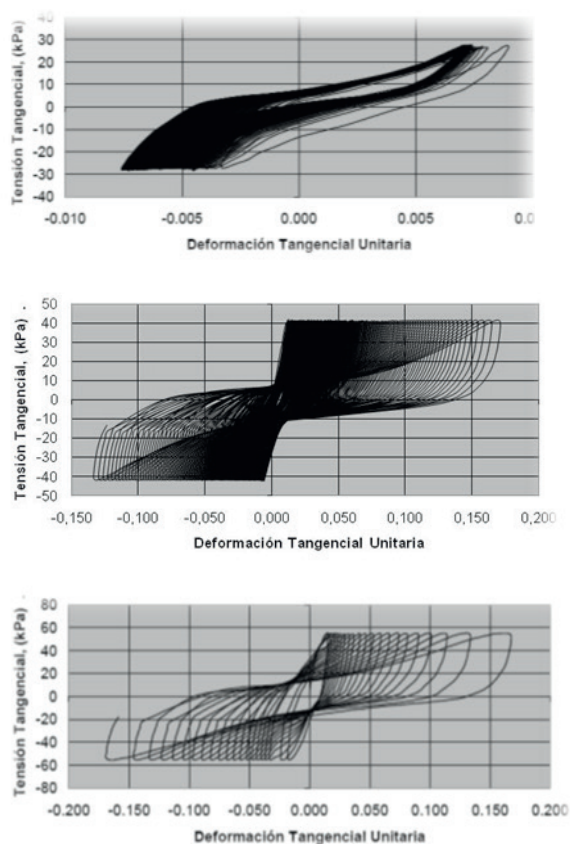


Fig. 2. Representación de los ciclos correspondientes a ensayos reales disponibles, para una tensión efectiva de consolidación de 277 kPa y una tensión de corte cíclica respecto a dicho valor, para los gráficos del superior al inferior, del 10%, 15% y 20% respectivamente.

A la luz de los ensayos experimentales [3] podemos observar un cambio brusco de comportamiento para valores de tensiones cíclicas situadas entre el 10% y el 15% de la tensión efectiva vertical de consolidación. A continuación, en la Fig. 2, se muestra, a modo de ejemplo, los ciclos obtenidos experimentalmente [3] en diferentes condiciones tensionales cíclicas para muestras sometidas a una tensión efectiva vertical de consolidación de 277 kPa.

En la Fig. 2 se observa cómo los ciclos para las muestras sometidas al 10% de la tensión efectiva vertical de consolidación, tienen una forma del ciclo cerrada que supone un amortiguamiento del 13% aproximadamente; sin embargo, para el 15% y el 20% la forma del ciclo es claramente histerética con amortiguamientos superiores al 20% y cercanos al 25% en ambos casos.

A este respecto, Wilson y Greenwood [4] efectuaron ensayos cíclicos sobre muestras de arcilla inalterada, normalmente consolidada y sobre arcilla remoldeada, concluyendo que para relaciones de esfuerzos cíclicos (tensión de corte cíclica entre tensión tangencial de rotura), menores de 0,37, el suelo tenía un comportamiento predominantemente elástico.

La observación experimental de los ensayos disponibles, junto con investigaciones como la citada en el párrafo anterior, hacen pensar en la existencia de un esfuerzo cíclico crítico tal que, para tensiones cíclicas superiores, los ciclos adoptan la característica forma de “s” mostrando un comportamiento claramente histerético; sin embargo, con valores inferiores a dicho valor de tensión cíclica crítica, los ciclos que se forman son mucho más cerrados, exhibiendo un comportamiento claramente elástico.

### 2.3 Caracterización de la degradación

La dependencia del ciclo límite que hemos definido es tal que, si su definición permanece constante en todo el proceso de carga cíclica actuante, implica que bajo solicitaciones periódicas de amplitud constante nos moveremos siempre en el mismo ciclo cerrado. Es decir, no se consideraría la degradación de las propiedades deformacionales de respuesta del suelo, al repetirse con el tiempo la solicitación actuante y por tanto el número de ciclos.

Así pues, resulta necesario ir adaptando la deformación máxima que define el ciclo límite. Partimos de la  $\gamma_{lim}$  correspondiente a la tensión máxima del ciclo límite elegido para representar el problema de estudio y, con el número de ciclos, damos el incremento de deformación respecto al ciclo anterior.

Como la historia de carga pasa por diferentes niveles tensionales en los sucesivos ciclos que van produciéndose, será necesario traducir el daño acumulado en la historia de carga real al número de ciclos que produciría el mismo daño para la amplitud del ciclo en curso. Este paso supone incorporar la dependencia de la historia pasada en la evaluación de la degradación y, por tanto, en la formación de los diferentes ciclos; así mismo, utiliza el concepto de daño acumulado pero de forma diferente al definido convencionalmente en textos clásicos. En nuestro caso, introducimos el concepto de daño acumulado en deformación, que hace referencia al número de ciclos  $N_i$  de amplitud de tensión tangencial constante  $\tau_i$  que

alcanza la misma deformación máxima que toda la historia de carga anterior recibida y notaremos con  $N_{\sigma q}$  al número de ciclos equivalentes así obtenidos.

Bajo la consideración de la teoría de estado crítico —como válida—, según muestran las pruebas de ensayo, se pueden identificar los puntos extremos de los ciclos límite, al evolucionar el número de ciclos, como puntos de igual tensión tangencial a los que se les asocia la deformación límite del ciclo  $\gamma_{lim}$  (según el ajuste degradativo con el número de ciclos para las condiciones de cada ensayo), de forma que el efecto de la degradación, para un cierto nivel tensional, es equivalente al que se produce en la deformación máxima continuamente creciente que se adquiere cuando se alcanza el estado crítico.

Notamos que los ciclos límite se conforman únicamente con los ciclos sin carga estática inicial, de tal forma que dicho efecto no supone ninguna variación de las leyes constitutivas del material. Sin embargo, en lo que sí influyen las tensiones iniciales anteriores a las cíclicas, y además lo hace sustancialmente, es en la degradación; las leyes de evolución de los puntos representativos de la deformación máxima del ciclo límite sí se ven muy influenciadas por este hecho, es decir, por las diferentes condiciones de corte estático inicial.

## 2.4 Generación de presión intersticial

La reacción del suelo frente a los esfuerzos cíclicos se traduce en variaciones de la posición intersticial, debido a la tendencia a las variaciones de volumen. En suelos blandos la tendencia suele ser hacia la contracción y, por consiguiente, las presiones intersticiales aumentan cuando las partículas buscan la posición más estable en menos volumen, presionando el agua, disminuyendo las tensiones efectivas y, por tanto, la resistencia del suelo.

Frente a estados de carga cíclica isotrópica no hay degradación, toda la carga se la llevaría el agua intersticial, de forma que se cargaría y descargaría al ritmo de la sollicitación actuante. Sin embargo, frente a carga tangencial, en condiciones no drenadas, para cada magnitud de la carga de corte se llega a una situación de equilibrio que se alcanza cuando se han reacomodado las partículas y ya no hay más cambios de volumen, absorbiendo el corte el suelo y manteniendo el agua su presión intersticial en exceso, máxima para esa carga.

En particular, es muy notable, para las muestras disponibles, la disminución de la presión intersticial generada, en el primer ciclo, para tensiones tangenciales cíclicas superiores al 10% de la tensión efectiva vertical de consolidación.

## 3. ETAPA EXPERIMENTAL

### 3.1 Identificación de variables

De forma general, Hardin y Black [5] consideraron como variables, que intervienen en la caracterización que tratamos de realizar, las que se comentan a continuación:

$$G = f(\sigma', \tau_D, \tau_C, e, F, s, C, f, T, \theta, \Pi) \quad (1)$$

Donde:

$G$  es el módulo de rigidez transversal

$\sigma'$  es la tensión axial efectiva

$\tau_D$  es la tensión tangencial inicial

$\tau_C$  es la amplitud de la vibración

$e$  es el índice de huecos

$F$  es la historia de vibraciones

$s$  es el grado de saturación

$C$  representa características de las partículas

$f$  es la frecuencia de la vibración

$T$  representa los efectos secundarios con el tiempo

$\theta$  representa la estructura del suelo

$\Pi$  es la temperatura

Los datos disponibles en este trabajo [3] corresponden al ensayo de corte simple. En este equipo se consigue mantener toda la muestra en deformación de corte simple, ya que las tensiones son las mismas sobre cualquier plano horizontal, puesto que las paredes laterales permanecen planas al estar formadas por un conjunto de anillos de pequeño espesor, que

confina la muestra, situados uno sobre otro y en cuyo hueco interior se sitúa la muestra cilíndrica a ensayar.

Teniendo en cuenta que se dispone de ensayos de corte simple cíclico no drenados [3], bajo diferentes condiciones de combinación de cargas estáticas y cíclicas y con un periodo de carga cíclica igual a 10 segundos para todas las muestras y que las muestras utilizadas corresponden a un terreno saturado que se encuentra en condiciones normalmente consolidado o ligeramente sobreconsolidado, resulta justificado la consideración de las siguientes variables:

- Tensión vertical efectiva  $\sigma'_v$  o equivalentemente  $\Delta u \Delta u$  en términos de presión intersticial.
- Tensión de corte inicial  $\tau_D$
- Amplitud de los ciclos de tensión tangencial  $\tau_c$
- El número de ciclos actuantes  $N$
- Módulo de rigidez transversal secante  $G$ , en cada ciclo, que equivalentemente puede ser expresado como la deformación de corte máxima del ciclo  $\gamma_{max}$  de amplitud  $\tau_c$
- Índice de huecos  $e$
- Índice de plasticidad  $IP$

En las variables elegidas destacamos la adimensionalización respecto a la tensión vertical efectiva de consolidación. Esto es considerado debido a que, por un lado, según las investigaciones de Zergoun y Vaid [6], la respuesta y los valores de los parámetros dinámicos del suelo, en unas determinadas condiciones, serán semejantes a cualquier otra si los valores de la tensión tangencial de corte estática y cíclica están, para dichas situaciones, en la misma relación respecto a la tensión vertical efectiva de campo y, por otro lado, Matsui [7] concluyó que para una misma relación de tensiones cíclicas y un determinado número de ciclos, la presión intersticial generada, normalizada a la tensión vertical efectiva de consolidación, es la misma para diferentes valores de dicha tensión efectiva de confinamiento.

Se utilizarán como variables dependientes:  $\gamma_{lim}$  y  $\Delta u$ . En particular, el empleo de la variable  $\gamma_{lim}$  se centra en las necesidades de predecir, mediante expresiones empíricas, la evolución con el número de ciclos de la deformación máxima alcanzable en cualquier situación de combinación de acciones estáticas y cíclicas.

Se plantea un ajuste que considera como estructuras de fórmulas “generales” ecuaciones que relacionan las variables  $\tau_D/\sigma'_{vD}$ ,  $\tau_c/\sigma'_{vD}$ ,  $N$ ,  $\gamma_{lim}$  y  $\Delta u$  y, sobre éstas, se considerarán  $IP$  y  $e$  como parámetros del modelo a introducir según el tipo de suelo.

En este artículo se obtienen dos expresiones que ajustan los valores de la deformación máxima y del incremento de la generación de presión intersticial, en función de las mismas variables. Este hecho justifica, en gran parte, la afirmación de que la degradación es producida fundamentalmente por la generación de presión intersticial; es decir:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{lim} &= f\left(\frac{\tau_D}{\sigma'_{vD}}, \frac{\tau_c}{\sigma'_{vD}}, N, e\right) \\ \Delta u &= g\left(\frac{\tau_D}{\sigma'_{vD}}, \frac{\tau_c}{\sigma'_{vD}}, N, e\right) \end{aligned} \right\} \rightarrow \Delta u = h\left(\gamma_{lim}, \frac{\tau_D}{\sigma'_{vD}}, \frac{\tau_c}{\sigma'_{vD}}, e\right) \quad (2)$$

### 3.2 Metodología de ajuste

Debido al número de variables necesarias a manejar en las ecuaciones de regresión, se utilizarán los métodos de regresión múltiple, llamando regresoras o predictoras a las variables independientes.

La estimación del vector de parámetros de ajuste se realiza por el método de mínimos cuadrados, utilizando un procedimiento iterativo que, partiendo de los valores iniciales, permite iniciar el algoritmo iterativo alcanzando, en cada etapa, un nuevo estimador hasta obtener la convergencia según un criterio predefinido.

Es importante observar que la estructura de las fórmulas debe ser introducida por el investigador, de tal forma que el ajuste estadístico nos dé los parámetros de dicha relación propuesta. En consecuencia, se han probado multitud de funciones de ajuste y de estructuras de expresiones para las diferentes relaciones entre variables. En el caso de la generación de presión intersticial, las gráficas de ensayos simples mostraban claramente la tendencia logarítmica al aumentar el número de ciclos, siendo buscada con muchas funciones de prueba la forma de integrar, en una única expresión, sus diferentes comportamientos. En el caso de la deformación máxima alcanzada en cada ciclo, se observa una tendencia de crecimiento potencial con el aumento del número de ciclos; así mismo, se ha realizado el esfuerzo de

experimentación numérica con una extensa lista de funciones de ajuste.

En particular se disponen de ensayos realizados para tensiones verticales efectivas de confinamiento, expresadas en kPa, de 277, 283, 294, 311, 315, 328, 343, 347, 349, 364, 366, 373, 384, 389, 401 y 413 bajo combinaciones de tensiones tangenciales iniciales y cíclicas que se indican a continuación:  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.15$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.20$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.25$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.05$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.20$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.05$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.25$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.1$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.15$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.1$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.20$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.15$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.10$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.15$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.15$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.20$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.05$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.20$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.10$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.25$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.05$ .

Para cada conjunto de muestras realizadas, a una cierta tensión vertical efectiva de consolidación, se dispone de una medida del índice de plasticidad y el peso específico. Como se dispone también de la humedad natural de todas las muestras, se puede estimar el índice de huecos correspondiente.

De cada ensayo se tienen registrados los valores de la generación de presión intersticial y la deformación máxima producida en cada ciclo de carga cíclica.

### 3.3 Expresión de ajuste de la degradación

Con los criterios comentados en el apartado anterior, se ajustan los datos disponibles con el programa estadístico SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) obteniéndose la siguiente expresión matemática que indica la dependencia de la deformación máxima de cada ciclo:

$$\gamma_{lim} = c_1 \left( \frac{|\tau_D| + |\tau_c|}{|\sigma'_{vD}|} \right)^{c_2} N^{c_3} \left| \frac{\tau_c}{\sigma'_{vD}} \right| \quad (3)$$

Donde se tiene que  $c_1 = 2\sigma^{1.5}$ ,  $c_2 = 2.8$  y  $c_3 = 1 + \sigma$ .

Además, es necesario añadir la deformación máxima en caso de no haber degradación; es decir, la deformación máxima de corte alcanzaría en el primer ciclo,  $\gamma_{lim,D}$ . Así:

$$\gamma_{lim,D} = \frac{\tau_D}{\sigma_D} + \frac{\tau_{lim} - \tau_D}{\sigma_{lim}} \quad (4)$$

Donde  $G_D, G_D$  es el módulo de rigidez transversal secante del suelo, frente a la actuación de una carga tangencial estática  $\tau_D$ ; por su parte,  $G_{lim}$  es el módulo secante de rigidez transversal dinámico, frente a la actuación de la carga cíclica  $\tau_{lim}$  de corte correspondiente al ciclo límite.

La formulación de la degradación se reduce al hecho de añadir incrementos de deformación de corte, según la ecuación, a la deformación de corte inicial estimada  $\gamma_{lim,D}$ .

El ajuste se ha realizado estratificadamente, dando el mismo peso a todos los casos de combinación. Se ha obtenido un coeficiente de correlación múltiple, en términos globales, de 0.81, dando valores parecidos en todos los casos de combinación de carga analizados por separado.

Como se puede observar, en la fórmula presentada no aparece el índice de plasticidad, esto es debido a que no se encontró dependencia alguna con él. La introducción de dicha variable no suponía el aumento de la correlación obtenida. Por el contrario, los valores de los parámetros de ajuste  $c_1$  y  $c_3$  se han hecho dependientes del índice de huecos. La introducción de dicha variable en la estructura de la relación de ajuste, sube significativamente dicha correlación.

El correcto ajuste realizado tiene como consecuencia directa la predicción de la deformación permanente, sin necesidad de utilizar fórmulas de ajuste independientes, como se propone en otros trabajos.

Las fórmulas de este apartado están deducidas para cargas cíclicas de amplitud constante, como corresponde a los ensayos disponibles; sin embargo, sabemos que esa situación es ideal y es necesario emplear el concepto de daño acumulado que se introdujo anteriormente, entrando en las fórmulas ajustadas con el número de ciclos equivalentes  $N_{eq}$ . Como el número de ciclos equivalentes es una medida del daño acumulado, no limitamos su campo de validez a números enteros.

### 3.4 Expresión de ajuste de la generación de presión intersticial

Al igual que en el apartado anterior, pero para obtener una expresión de la generación de presión intersticial en exceso  $u$ , se ha realizado el ajuste a los

datos disponibles con el programa estadístico utilizado, obteniéndose la siguiente expresión matemática:

$$\frac{u}{\sigma'_{vb}} = \alpha_1 \left| \frac{\tau_c}{\sigma'_{vb}} \right| \ln N + \alpha_2 \left| \frac{\tau_0}{\sigma'_{vb}} \right| + \alpha_3 \left| \frac{\tau_c}{\sigma'_{vb}} \right| \quad (5)$$

Donde  $\alpha_1 = 0,35(1 + \vartheta)$ ,  $\alpha_2 = 1,2\vartheta^{1,5}$  y  $\alpha_3 = 1$ .

Expresando (5) incrementalmente en un dominio discreto para el número de ciclos:

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{vb}} = \alpha_1 \left| \frac{\tau_c}{\sigma'_{vb}} \right| \ln \left( 1 + \frac{1}{N} \right) \quad (6)$$

Al igual que para el caso de la deformación límite, el ajuste realizado ha sido estratificado, dando el mismo peso a todos los casos de combinación. El coeficiente de correlación múltiple obtenido es, en términos globales, del 0.87 con valores de poca dispersión, respecto a dicho valor, en todos los casos de combinación de carga analizados por separado.

Como era de esperar, por analogía, con el ajuste de la degradación no se encontró dependencia alguna con el índice de plasticidad. Por su parte, los valores de los parámetros de ajuste  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  se han hecho dependientes del índice de huecos. La introducción de dicha variable, en la estructura de la relación de ajuste, sube significativamente dicha correlación.

Las fórmulas de este apartado están deducidas para cargas cíclicas de amplitud constante, como corresponde a los ensayos disponibles. La realidad supone sollicitaciones de amplitud variable para cualquier punto de suelo. Así, es válido aquí también el concepto de daño acumulado ya comentado; esto supone, simplemente, usar las fórmulas ajustadas con el número de ciclos equivalentes de presión intersticial  $N_{e,q,u}$ . Como el número de ciclos equivalentes es una medida del daño acumulado, no limitamos su campo de validez a números enteros.

#### 4. CONCLUSIONES

Del artículo presentado se pueden extraer las siguientes es respecto al comportamiento dinámico de los suelos:

Se demuestra que la degradación producida en los suelos blandos, al ser sometidos a carga de corte cíclica, es el fenómeno clave para la predicción e interpretación de la generación de presión intersticial en los suelos blandos saturados.

Se presentan las variables y aspectos que afectan significativamente al proceso dinámico de estudio.

Se establece una metodología para el análisis del comportamiento dinámico referido a la degradación y generación de presión intersticial ante carga tangencial cíclica.

Se introduce para el conocimiento de suelo el concepto de ciclo límite y se da criterio para su elección a partir de los debidos ensayos experimentales de los que se dispone.

Se obtienen las estructuras de las fórmulas matemáticas de predicción para caracterizar el fenómeno evolutivo de la degradación y de la generación de presión intersticial.

#### 5. TRABAJOS FUTUROS

La evolución científica de este trabajo debe guiarse hacia las aplicaciones de casos reales de obras de ingeniería sometidas a fenómenos de cargas cíclicas en suelos. En particular, al estudio de diques rompeolas sometidos al efecto dinámico del oleaje.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. B. De Groot, M. D. Bolton & P. Foray. "Physics of liquefaction phenomena around marine structures". ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. vol. 132, no. 4, pp. 227-243, 2006.
- [2] R. A. Galindo, "Análisis, modelización e implementación numérica del comportamiento de suelos blandos ante la combinación de tensiones tangenciales estáticas y cíclicas". Ph.D. Dirigida por A. Soriano. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
- [3] C. H. Patiño, "Influencia de la combinación de tensiones tangenciales estáticas y cíclicas en la evaluación de parámetros estáticos y cíclicos de un suelo cohesivo". Ph.D. Dirigida por A. Soriano. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [4] N. E. Wilson & J. R. Greenwood. "Pore Pressures and Strains After Repeated Loading of Saturated Clay". Canadian Geotechnical Journal, National Research Council of Canada, vol. 11, pp. 269-277, 1974.
- [5] B. O. Hardin. & A. M. Black, "Vibration modulus of normally consolidated clay". ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 94, pp. 353-369, 1968.
- [6] T. Matsui. H. Ohara & T. Ito, "Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 106, no. GT10, pp. 1101-1120, 1980.
- [7] M. Zergoun, & Y. P. Vaid, "Effective stress response of clay to undrained cyclic loading," Canadian Geotechnique, vol. 31, pp. 714-727, 1994.