

# Unified model of shear modulus degradation curves in sand of Guayuriba river

## Modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba

María del Pilar Ortiz-Pulido <sup>a</sup>, Juan Felipe Gaitán-Serrano <sup>b</sup> & Javier Fernando Camacho-Tauta <sup>c</sup>

<sup>a</sup> Ing. Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, pilar.ortiz08@gmail.com

<sup>b</sup> Ing. Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, jfelipeg@gmail.com

<sup>c</sup> PhD, Profesor Asociado, Universidad Militar Nueva Granada, Colombia, javier.camacho@unimilitar.edu.co

Received: January 14th, 2013. Received in revised form: August 30th, 2013. Accepted: September 11th, 2013

### Abstract

The purpose of this paper is to analyze the applicability of two unified model of shear modulus degradation curves in the sand of Guayuriba River (Department of Meta, Colombia). To achieve the objective, it was performed acyclic triaxial tests with controlled strain, by varying the confining pressure, the particle size and the compaction degree of the material. The outcome were the modulus degradation curves, which were compared against the model proposed by Ishibashi and Zhang, and the model proposed by Santos and Gomes Correia, showing that the behavior of these materials fit better to the second one.

*Keywords:* cyclic triaxial, shear modulus, unified curves.

### Resumen

El propósito de este artículo es analizar la aplicabilidad de dos modelos unificados de curvas de degradación del módulo cortante en la arena del río Guayuriba (Departamento del Meta, Colombia). Para lograr el objetivo, se realizó una serie de ensayos triaxiales cíclicos a deformación controlada, variando la presión de confinamiento, la granulometría del material y el grado de compactación. Como resultado, se obtuvieron curvas de degradación del módulo cortante, que se compararon con el modelo propuesto por Ishibashi y Zhang, y por el modelo propuesto por Santos y Gomes Correia, encontrando que el comportamiento dinámico de estos materiales se ajusta mejor al segundo modelo.

*Palabras Clave:* curvas unificadas, módulo cortante, triaxial cíclico

## 1. Introducción

El comportamiento dinámico de los suelos granulares ha sido objeto de investigación por diferentes autores alrededor del mundo como Kokusho [1], Ishibashi y Zhang [2], Zhou y Chen [3], y Jafarzadeh y Sadeghi [4], por ser determinante en los efectos sísmicos a nivel local que se pueden producir en depósitos de este material. En Colombia se han efectuado investigaciones con materiales locales, por ejemplo Yamin et al. [5], García [6], Rivas [7], Chaves [8], quienes han realizado investigaciones de este tipo en esquistos de Sabaneta (Antioquia) o estudiado el comportamiento ante el fenómeno de licuación de las arenas de Tumaco (Chocó).

El módulo cortante es uno de los parámetros necesarios para estimar la respuesta dinámica del suelo como por ejemplo en la evaluación del comportamiento sísmico de un depósito de arenas para evaluar el riesgo frente a casos como el ocurrido en el Rio Atrato medio, donde se presentó la licuación de un dique conformado por material arenoso producto de un sismo presentado el 17 y 18 de octubre de

1992 [9]. Dentro de este ámbito, surge la necesidad de contar con un modelo que permita generalizar mediante curvas de degradación del módulo cortante la variación de la rigidez del suelo y que tenga en cuenta el efecto de la deformación, la relación de vacíos y el confinamiento.

El presente trabajo tiene como finalidad estudiar el módulo cortante en las arenas colombianas, específicamente en arenas fluviales provenientes del Río Guayuriba (Departamento del Meta), mediante la obtención de las curvas de degradación del módulo cortante. Estas curvas fueron obtenidas mediante ensayos triaxiales cíclicos efectuados con variados confinamientos y relaciones de vacíos. Como resultado se presenta el análisis y la unificación de las curvas de degradación del módulo cortante en las arenas y la comparación con los modelos de Ishibashi y Zhang [2], y Santos y Gomes Correia [10].

## 2. Módulo cortante [G]

La relación de esfuerzo-deformación en un suelo depende principalmente del nivel de deformación [11]. De

esta manera, a pequeñas deformaciones el comportamiento mecánico del suelo se puede representar mediante un modelo lineal elástico, a medianas deformaciones el comportamiento se representa bajo un modelo visco-elástico, y a grandes deformaciones la disipación de energía y la degradación de la rigidez van aumentando a medida que va pasando los ciclos por lo cual se debe representar el comportamiento del suelo mediante un modelo no lineal.

Para caracterizar la rigidez del suelo se utilizan dos conceptos que son la relación de amortiguamiento y el módulo cortante. Este último muestra la relación entre la tensión y la deformación de corte en un punto determinado.

### 3. Módulo cortante máximo $[G_0]$

El módulo cortante máximo o inicial define el comportamiento esfuerzo-deformación del suelo a pequeñas deformaciones; además es el parámetro de normalización de las curvas de degradación del módulo cortante en suelos [12].

Diferentes autores han estudiado los factores que influyen sobre este parámetro Kokusho [1], Ishihara [11], y Santos y Gomes Correia [10]. Richart et al. [13] muestra que los factores que más influyen sobre el módulo cortante inicial son el confinamiento efectivo ( $\sigma'_0$ ) y la relación de vacíos ( $e$ ) como se presenta en la ecuación 1.

$$G_0 = A \cdot f(e) \cdot (\sigma'_0)^n \quad (1)$$

Donde  $A$  y  $n$  son constantes determinadas experimentalmente que dependen del tipo de material y  $F(e)$  es una relación funcional que depende de la relación de vacíos. Para tener una referencia de los valores de estas constantes, Camacho-Tauta [12] recopiló información de algunos autores que han trabajado con arenas, como Hardin y Richart (1963), Iwasaki and Tatsuoka (1977), Kokusho(1980) y Gomes Correia et al (1994) y que coinciden en que el valor de  $n$  es aproximadamente 0.5 y  $A$  oscila entre 7000 y 14100, para  $G_0$  y  $\sigma'_0$  en kPa.

### 4. Curvas de degradación del módulo cortante

La curva de degradación del módulo es una representación del módulo secante dividido por el módulo cortante máximo en función de la deformación cortante [14]. Su función es facilitar la representación del comportamiento del suelo ya que solo es necesario conocer el módulo cortante inicial para obtener el módulo cortante a cualquier nivel de deformación. En la Figura 1 se muestra la curva de degradación del módulo a lo largo de la deformación cortante [15].

Kokusho en 1980 presentó un conjunto de resultados experimentales de ensayos efectuados sobre arena de Toyoura [1], donde muestra como el módulo normalizado ( $G/G_0$ ) decrece a medida que la deformación cortante ( $\gamma$ ) se incrementa. Una característica adicional que se puede observar en esa investigación es la influencia del confinamiento, debido a que a mayor confinamiento mayor es la relación  $G/G_0$  para una deformación cortante dada.

Adicionalmente, describe influencia de la relación de vacíos ( $e$ ) sobre  $G/G_0$ ; en donde deduce que elevadas relaciones de vacíos producen una mayor degradación de la curva de degradación del módulo cortante.

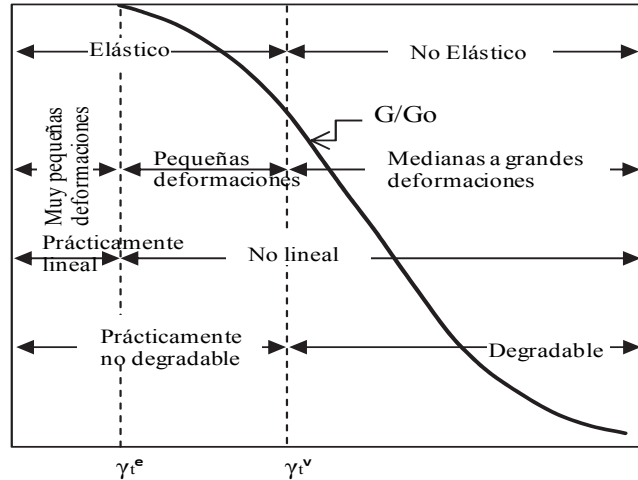


Figura 1. Curvas de degradación del módulo a los largo de las diferentes zonas deformación cortante cíclica. Adaptado de [15].

### 5. Rangos de deformación

La deformación cortante se divide en pequeñas ( $10^{-6}$ - $10^{-5}$ ), medianas ( $10^{-5}$ - $10^{-3}$ ) y grandes ( $10^{-3}$ - $10^{-2}$ ) deformaciones teniendo en cuenta los límites arbitrarios que han sido aceptados para diferenciar el modelo para evaluar el comportamiento dinámico del suelo, teniendo como referencia los rangos de deformación presentados por Ishihara [11].

El límite entre las pequeñas y las medianas deformaciones fue definido por Vucetic [15], como la deformación cortante arriba de la cual la microestructura del suelo es irreversiblemente alterada por corte cíclico. Esto se puede explicar por la aparición de cambios irreversibles en la presión de poros o en el volumen del suelo, y es conocido como el umbral volumétrico de deformación cortante ( $\gamma^v$ ). Vucetic y Dobry [16], presentan una serie de curvas en las que se identifica la localización aproximada donde este umbral tiene lugar en las curvas de degradación del módulo.

Con base en estos estudios la deformación media corresponde a valores entre  $10^{-4}$  y  $10^{-3}$ , dentro de este rango, el suelo tiene un comportamiento elasto-plástico, dando como consecuencia que existan deformaciones no recuperables en el suelo.

### 6. Modelo hiperbólico

Hardin y Drnevich [17] proponen una curva de degradación del módulo, basada en un modelo hiperbólico que expresa  $G/G_0$  por medio de la Ecuación (2).

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2)$$

Donde  $\gamma$  es la deformación cortante y  $\gamma_r$  es la deformación cortante de referencia definida mediante la

Figura 2. La curva hiperbólica es asintótica a la línea horizontal definida por el esfuerzo cortante en la falla. El módulo secante en un punto de la curva es  $G$  y la pendiente en el primer tramo de la curva es  $G_0$ . Si se extiende la línea secante hasta el punto de corte de la línea del esfuerzo cortante en la falla se obtiene la deformación de referencia.

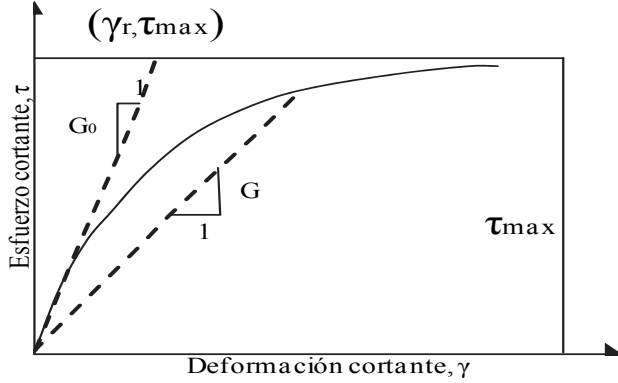


Figura 2. Modelo Hiperbólico y definición de la deformación de referencia. Adaptado de [16]

**7. Curvas unificadas**

Debido a las variaciones que existen entre las curvas de degradación del módulo cortante, Ishibashi y Zhang [2] proponen un modelo unificado, teniendo en cuenta el índice de plasticidad (IP) y el confinamiento ( $\sigma'_0$ ) como se muestra en la Ecuación (3).

$$\frac{G}{G_0} = K(\sigma'_0)^m \tag{3}$$

En donde  $K$  está definido en la Ecuación (4) y  $m$  está dado en la Ecuación (5).

$$K = 0.5 \left\{ 1 + \tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000102 + n}{\gamma} \right)^{0.492} \right] \right\} \tag{4}$$

$$m = 0.272 \{ 1 - \tag{5}$$

$$\tanh \left[ \ln \left( \frac{0.000556}{\gamma} \right)^{0.4} \right] \exp(-0.0145IP^{1.3}) \}$$

En la Ecuación (6) se muestra el valor que corresponde a  $n$  en función de IP:

$$n = \begin{cases} 0.00 & \text{para } IP = 0 \\ 3.37 \times 10^{-6} \times IP^{1.404} & \text{para } 0 < IP \leq 15 \\ 7.00 \times 10^{-7} \times IP^{1.976} & \text{para } 15 < IP \leq 70 \\ 2.70 \times 10^{-5} \times IP^{1.115} & \text{para } IP > 0 \end{cases} \tag{6}$$

Santos y Gomes Correia [10] presentan un modelo para suelos plásticos y no plásticos que está dado en la Ecuación (7),

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + (0.385\gamma^*)} \tag{7}$$

Donde la deformación cortante normalizada ( $\gamma^*$ ). Se define como la deformación cortante dividida por la deformación cortante que corresponde a  $G/G_0 = 0.7$ . Basados en el modelo, Santos y Gomes Correia mediante el análisis de diversos resultados demostraron que éstos se ajustan a un estrecho rango delimitado por las curvas inferior y superior dadas por las ecuaciones (8) y (9) respectivamente [10].

$$\frac{G}{G_0} = 1 \quad \text{para } \gamma^* \leq 10^{-2} \tag{8}$$

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \tanh \left[ 0.48 \ln \left( \frac{\gamma^*}{1.9} \right) \right] \right\} \quad \text{para } \gamma^* > 10^{-2}$$

$$\frac{G}{G_0} = 1 \quad \text{para } \gamma^* \leq 10^{-1} \tag{9}$$

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \tanh \left[ 0.46 \ln \left( \frac{\gamma^* - 0.1}{3.4} \right) \right] \right\} \quad \text{para } \gamma^* > 10^{-1}$$

En la Figura 3 se muestran algunos resultados experimentales obtenidos por Camacho-Tauta [12] y que se comparan con el rango propuesto por Santos y Gomes Correia [10].

**8. Metodología**

**8.1. Equipos y Materiales**

Con el fin de obtener las propiedades dinámicas de la arena se utilizó un equipo triaxial cíclico Dynatriax Tritex 50 kN (WF-Controls) equipado con sensores, unidad de adquisición de datos y software controlador cuya representación esquemática se muestra en la Figura 4. Los sensores utilizados tienen la capacidad y sensibilidad indicada a continuación: presión de cámara y contrapresión (1000kPa, 1kPa), celda de carga sumergible (25kN, 0.01kN), sensor externo de desplazamiento (50mm, 0.002mm) y sensor de cambio volumétrico (100cm<sup>3</sup>, 0.1cm<sup>3</sup>).

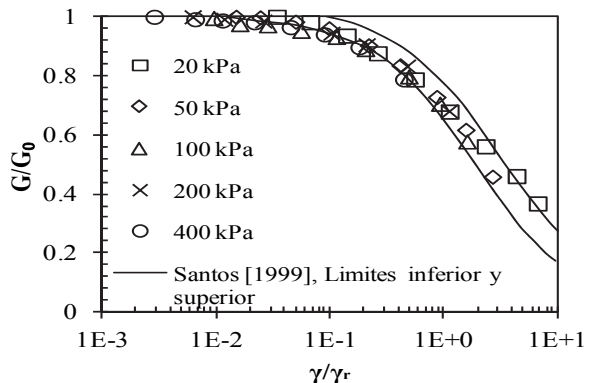


Figura 3. Curvas de degradación del módulo para varios tipos de suelo y comparación contra el modelo propuesto por [10]. Tomado de [12].

El material proveniente del río Guayuriba está conformado en su gran mayoría por cuarcitas pertenecientes al grupo Quetame, según los estudios realizados en la Universidad Nacional de Colombia [18]. Se utilizaron tres granulometrías de la misma arena (Figura 5), para observar la influencia del tamaño del grano en los resultados.

Se realizaron ensayos de gravedad específica de sólidos ( $G_s$ ) [19], granulometría por tamizado, para obtener los tamaños máximo ( $D_{m\acute{a}x}$ ) y mínimo ( $D_{m\acute{i}n}$ ), coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ), coeficiente de curvatura ( $C_c$ ) y ensayos de peso unitario seco máximo ( $\gamma_{d\acute{m}\acute{a}x}$ ) y mínimo ( $\gamma_{d\acute{m}\acute{i}n}$ ) con relaciones de vacíos mínima ( $e_{m\acute{i}n}$ ) y máxima ( $e_{m\acute{a}x}$ ), resultados que se encuentran en la Tabla I.

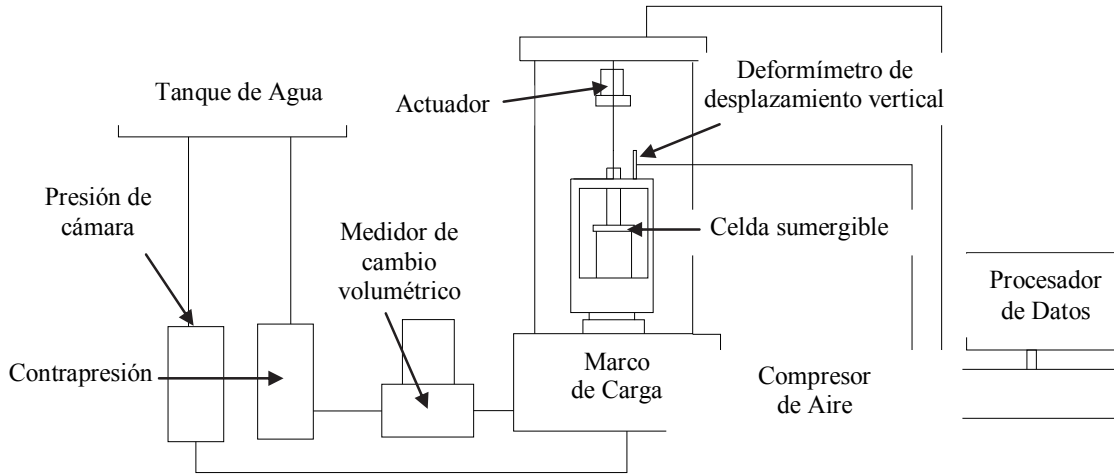


Figura 4. Esquema del equipo triaxial cíclico.

### 8.2. Procedimiento

Se realizaron 24 ensayos triaxiales cíclicos a muestras de 70mm de diámetro y 140mm de altura. Doce de las muestras se compactaron hasta alcanzar la relación de vacíos mínima mostrada en la Tabla I. La otra mitad de las muestras alcanzó el estado más suelto para obtener la relación de vacíos máxima indicada en la Tabla I.

últimas bajo la aplicación de 40 ciclos sinusoidales a 0.5 Hz de frecuencia, en concordancia con lo especificado por la norma ASTM D-3999.

Las deformaciones axiales cíclicas seleccionadas estuvieron en un rango entre 0.028mm y alrededor de 1.4mm. Este rango está limitado en su límite inferior por la precisión del sensor de deformación axial y en su límite superior por la pérdida de resistencia de la arena a causa de la movilidad cíclica.

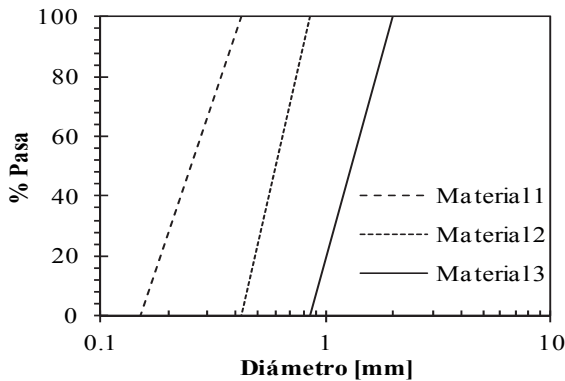


Figura 5. Granulometría de los materiales.

Se utilizaron presiones de confinamiento de 50 kPa, 100 kPa, 200 kPa y 400 kPa por cada material utilizado y por cada grado de compactación. Cada uno de estos ensayos se llevó a cabo bajo los parámetros del Método B (Deformación Controlada) de la norma ASTM D-3999 [20], llevando a cabo las etapas de saturación, en donde el valor del parámetro B alcanzó valores entre 0.97 y 0.98, dando paso a la consolidación y nueve etapas de corte cíclico, éstas

Tabla 1. Propiedades físicas de los materiales estudiados.

Propiedades	Material		
	1	2	3
$D_{m\acute{i}n}$ [mm]	0.150	0.425	0.850
$D_{m\acute{a}x}$ [mm]	0.425	0.850	2.000
$C_u$	1.580	1.420	1.39
$C_c$	0.930	0.940	1.00
$G_s$	2.680	2.650	2.680
$e_{m\acute{a}x}$	1.017	1.100	1.171
$e_{m\acute{i}n}$	0.813	0.904	0.988
$\gamma_{d\acute{m}\acute{i}n}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.330	1.280	1.230
$\gamma_{d\acute{m}\acute{a}x}$ [g/cm <sup>3</sup> ]	1.480	1.410	1.350

## 9. Resultados y Discusión

### 9.1. Ensayos Triaxiales Cíclicos

En la Figura 6 se muestra un ejemplo de tres bucles de histéresis obtenidos mediante el ensayo triaxial cíclico, de donde se obtiene el módulo cortante correspondiente al nivel de deformación cíclica impuesto.

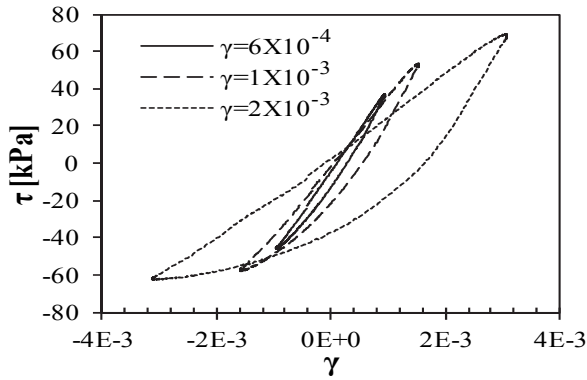


Figura 6. Bucles de histeresis resultado del segundo ciclo del ensayo al Material 3 con  $e=0.988$ ,  $\sigma'_0=100$  kPa y diferentes deformaciones unitarias aplicadas.

Los resultados obtenidos mediante el ensayo triaxial cíclico muestran la influencia de la granulometría del

material, la relación de vacíos, y la presión de confinamiento sobre las curvas de degradación del módulo cortante en las arenas. En la Figura 7 se presentan las curvas de degradación del módulo cortante en arenas del río Guayuriba, con cambio en las presiones de confinamiento, para los de materiales ensayados y las diferentes relaciones de vacío, manteniendo en cada caso la relación de vacíos y el tipo del material constantes.

Se puede observar la influencia de la presión del confinamiento, ya que a medida que aumenta esta variable, el módulo cortante aumenta.

Para observar la influencia del tipo de material en las curvas de degradación del módulo, y debido a que el comportamiento es similar para todas las presiones de confinamiento y grados de compactación, se muestra como ejemplo la Figura 8, en donde al mantener la presión de confinamiento constante en 50 kPa y el material sin compactar, el módulo cortante es mayor para arenas de tamaño más fino.

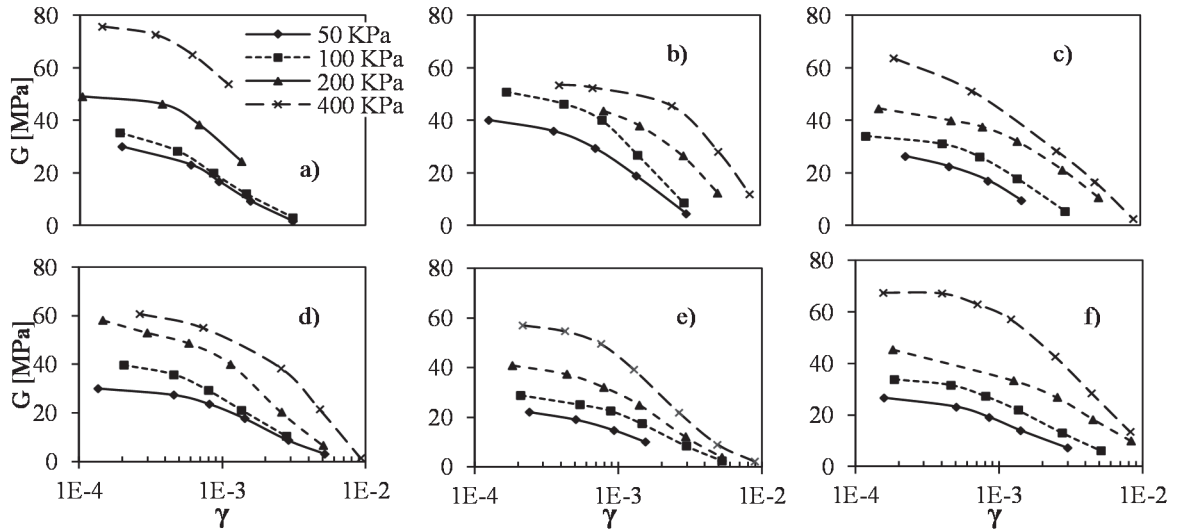


Figura 7. Curvas de degradación del módulo cortante en arena del Río Guayuriba según la variación en la presión de confinamiento. a) Material 1  $e=0.813$  b) Material 1  $e=1.017$  c) Material 2  $e=0.904$  d) Material 2  $e=1.100$  e) Material 3  $e=0.988$  f) Material 3  $e=1.171$ .

Por otro lado en la Figura 9. Se muestra un ejemplo del estado de compactación en las curvas de degradación del módulo cortante, dando como resultado que entre más compactada este la muestra mayor va a ser su módulo cortante.

**9.2. Aplicación del Modelo Hiperbólico**

Dado que se utilizó un equipo triaxial cíclico sin instrumentación interna ni otros dispositivos para medir el módulo cortante inicial (ej.: bender elements); se utilizaron los valores medidos de deformación cortante y módulo cortante para llevar a cabo un proceso de optimización mediante el método de los mínimos cuadrados con el fin de encontrar los parámetros de deformación de referencia  $\gamma_r$  y el módulo cortante inicial  $G_0$ . Estos valores se encontraron mediante la Ecuación (2). Este procedimiento puede ser cuestionable, pero es una alternativa para casos como el del

presente trabajo, en el cual no se contó con instrumentos para medir directamente el módulo cortante inicial.

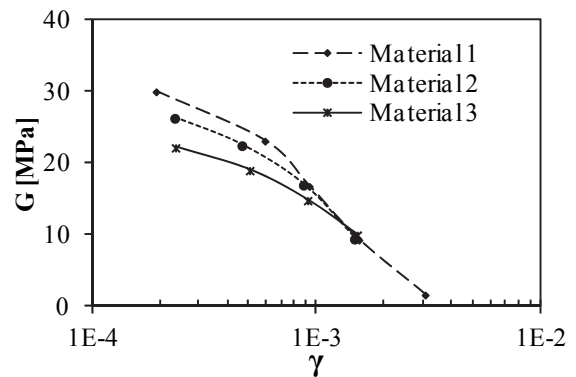


Figura 8. Curvas de degradación del módulo cortante con variación en la granulometría del material, con  $e=0.813$  para el material 1,  $e=0.904$  para el material 2 y  $e=0.988$  para el material 3 y  $\sigma'_0 = 50$  kPa.

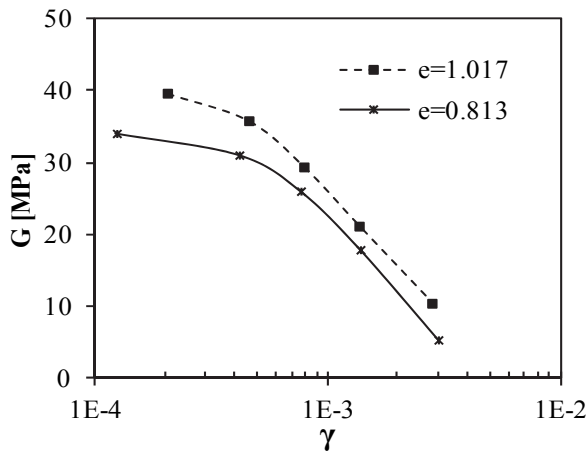


Figura 9. Curvas de degradación del módulo cortante con variación en la relación de vacíos, material 1,  $\sigma'_0 = 100$  kPa.

Al obtener los parámetros básicos de la ecuación se construyeron curvas de degradación del módulo cortante en función de la deformación cortante,  $\gamma$  vs  $G/G_0$ . Para esto se eligió un rango de deformaciones de  $10^{-6}$  hasta  $10^{-1}$ .

El resultado de este proceso se ejemplifica en la Figura 10 teniendo en cuenta que el comportamiento de las curvas de degradación del módulo cortante tienen similar tendencia para todos los casos.

En la Tabla II se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos mediante el modelo hiperbólico para  $G_0$ , en ella se puede verificar en general que a medida que el material es más grueso,  $G_0$  disminuye y que entre mayor es el grado de compactación mayor es el valor de  $G_0$ .

En la Tabla III se muestra un resumen de todos los resultados obtenidos mediante el modelo hiperbólico para  $\gamma_r$ . En ella se muestra que a medida que el material es más grueso la deformación de referencia es menor. Adicionalmente, entre menor es la relación de vacíos mayores las deformaciones de referencia alcanzadas.

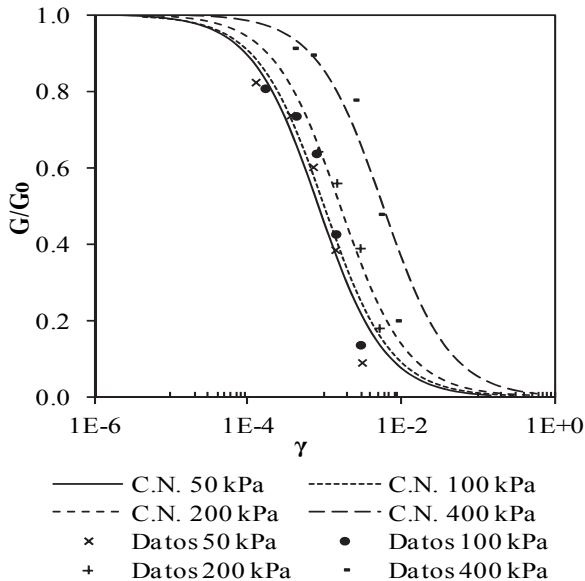


Figura 10. Curvas normalizadas (C.N.) mediante el modelo hiperbólico. Material 1  $e=1.017$ .

Tabla 2.  $G_0$  [MPa] estimado mediante el modelo hiperbólico

$\sigma'_0$ [kPa]	Material 1		Material 2		Material 3	
	$e=0.81$	$e=1.0$	$e=0.90$	$e=1.1$	$e=0.99$	$e=1.17$
50	42.83	48.65	36.47	35.39	28.20	31.36
100	50.33	62.78	40.51	49.61	35.97	40.18
200	55.34	67.67	49.22	66.92	49.88	48.92
400	82.19	58.51	74.02	71.58	70.29	75.80

Tabla 3.  $\gamma_r$  estimado mediante el modelo hiperbólico

$\sigma'_0$ [kPa]	Material 1		Material 2		Material 3	
	$e=0.81$	$e=1.0$	$e=0.90$	$e=1.1$	$e=0.99$	$e=1.17$
50	5.2E-4	8.3E-4	6.7E-4	1.3E-3	9.5E-4	1.2E-3
100	5.0E-4	9.9E-4	1.0E-3	1.0E-3	1.1E-3	1.5E-3
200	1.3E-3	1.6E-3	2.1E-3	1.3E-3	1.2E-3	2.7E-3
400	2.2E-3	5.8E-3	1.4E-3	2.1E-3	1.4E-3	2.9E-3

### 9.3. Unificación de Curvas

En esta sección se utilizan los datos experimentales y el módulo cortante inicial estimado con el modelo hiperbólico para obtener los modelos unificados de Ishibashi y Zhang y de Santos y Gómez Correia. No se comparan con las curvas presentadas por otros autores como Vucetic y Dobry [16] o Darendeli [22], pues el objetivo del presente trabajo es utilizar un modelo que busque unificar en un modelo simple, el comportamiento para diferentes confinamientos y relaciones de vacíos.

#### 9.3.1. Modelo Ishibashi y Zhang

En la Figura 11 se observan las curvas unificadas mediante el modelo de Ishibashi y Zhang, obtenidas al aplicar la Ecuación (3) y la relación  $G/G_0$  de los datos experimentales, tomando  $G_0$  como el valor calculado por el modelo hiperbólico.

#### 9.3.2. Modelo Santos y Gomes Correia

Los límites del módulo cortante se calcularon aplicando las ecuaciones (9) y (10). En la Figura 12 se muestra que los datos experimentales están dentro del rango propuesto por el modelo, a excepción de algunos puntos a deformaciones normalizadas cercanas a 10.



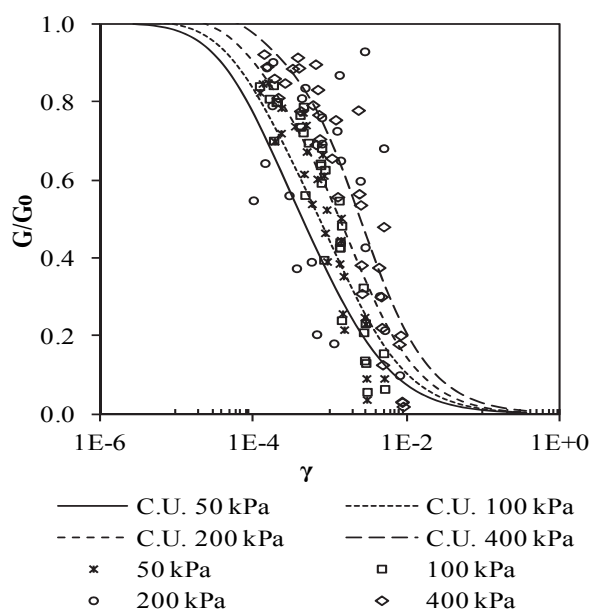


Figura 11. Datos experimentales comparados con las curvas unificadas (C.U.) de Ishibashi y Zhang.

#### 9.4. Discusión de Resultados

Se pudo observar que el valor del módulo máximo  $G_0$ , es mayor cuando la relación de vacíos es menor, ya que al compactarse la muestra las partículas se acomodan mejor entre sí, aportando mayor resistencia. De la misma manera el módulo aumenta en relación con la presión de confinamiento, debido al aumento del número de contactos inter-granulares en el suelo, resultado que muestra Camacho-Tauta et al. [21].

Al realizar la construcción de las curvas de degradación del módulo por medio del modelo hiperbólico se pudo observar que la desviación estándar hallada para las deformaciones de referencia ( $\gamma_r$ ) fue de  $1.67 \times 10^{-4}$  para el caso del material 3 con  $e=0.988$ , presentando en este caso unas curvas que tienden a la unificación. De esta manera lo que define la ubicación de las curvas es  $\gamma_r$ , siendo así que al presentarse valores similares se superponen las curvas y se ubican de derecha a izquierda en función de la deformación de referencia.

En la Figura 11 se muestra la unificación realizada según el modelo de Ishibashi y Zhang, se observa que los datos experimentales que mejor se ajustan son los correspondientes a un confinamiento efectivo de 100 kPa. En general los valores de  $G/G_0$  dados en un rango de deformación de  $10^{-3}$  a  $10^{-2}$  se encuentran por fuera de las curvas unificadas, esto se presenta debido a que en este rango de deformación es donde se presenta la mayor degradación del módulo.

La Figura 12. Presenta los límites del modelo propuesto por Santos y Gomes Correia y los datos obtenidos mediante los ensayos triaxiales, donde se puede apreciar el ajuste de la gran mayoría de los datos, en especial los correspondientes a una presión de confinamiento de 200 kPa. Los datos que se salen del rango son aquellos que están cercanos a una deformación normalizada cercana a  $10^1$

debido a que para este nivel de deformación se presenta licuación de la arena.

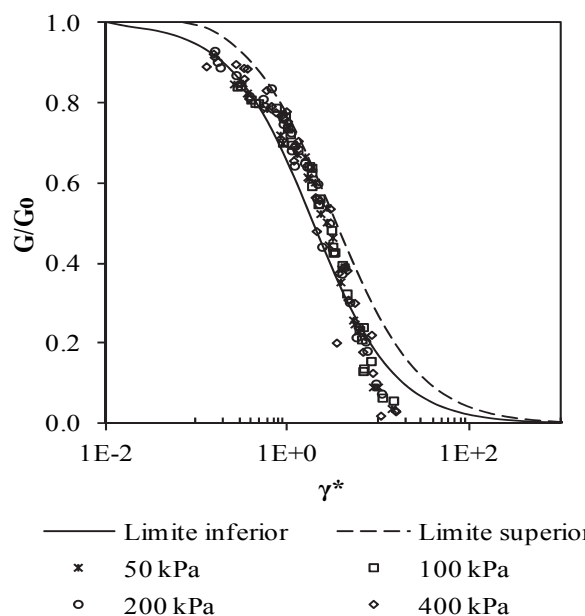


Figura 12. Datos experimentales comparados con los límites propuestos por Santos y Gomes Correia.

#### 10. Conclusiones

El procedimiento para la ejecución del ensayo triaxial cíclico fue implementado y probado en arenas colombianas obteniendo resultados favorables si se comparan con la literatura y los modelos propuestos por otros autores.

Los datos se ajustaron mejor al modelo presentado por Santos y Gomes Correia, mostrando la aplicabilidad a las arenas del río Guayuriba, en Colombia. Este modelo en particular tiene la ventaja de que es relativamente simple pues solamente se requiere el valor del módulo máximo y el módulo secante degradado al 70% con su correspondiente deformación.

Tal y como indica la literatura los valores de  $G_0$  aumentan en función de la presión de confinamiento, y son mayores cuando la relación de vacíos disminuye, esto tanto en función de la compactación como del tamaño de las partículas del material.

#### Agradecimientos

Este trabajo hace parte del proyecto de investigación ING-953 “Hacia la obtención de un modelo unificado de curvas de degradación del módulo cortante” financiado por la Universidad Militar Nueva Granada. Fausto Andrés Molina, apoyó y colaboró en la ejecución de los ensayos triaxiales de este proyecto.

#### Referencias

[1] kokusho, T., Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range, Soils and Foundations, vol. 20(2), pp. 45-60, 1980.

- [2] Ishibashi, I. y Zhang, X., Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay, *Soils and Foundations*, vol. 33(1), pp. 182-191, 1993.
- [3] Zhou, Y. y Chen, Y., Influence of seismic cyclic loading history on small strain shear modulus of saturated sands, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 20, pp. 341-353, 2005.
- [4] Jafarzadeh, F. y Sadeghi, H., Experimental study on dynamic properties of sand with emphasis on the degree of saturation, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 32, pp. 26-41, 2012.
- [5] Yamin, L., Caicedo, B. y Solano, E., Evaluación de la respuesta dinámica del subsuelo en depósitos volcánicos y sus implicaciones para el diseño sísmico, *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, vol. 10, pp. 79-84, 1999.
- [6] García, J. R., Análisis comparativo del fenómeno de licuación en arenas. aplicación a Tumaco (Colombia), Tesis de Doctorado, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, Universidad Politecnica de Cataluña, 2007.
- [7] Rivas, D., Influencia de la micro-estructura en el comportamiento dinámico de los suelos residuales de esquistos en Sabaneta, tesis de maestría, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Feb. 2010.
- [8] Chaves, J. F., Generación de presión de poros en procesos cíclicos no drenado, tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Civil y Agrícola, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- [9] Velásquez, A., Los terremotos del Atrato Medio-Murindó en Octubre de 1992, *Desastres de origen natural en Colombia 1979 - 2004*, Medellín, pp. 91-108, 2005.
- [10] Dos Santos J. A. y Gomes-Correia, A., Reference threshold shear strain of soil. Its application to obtain an unique strain-dependent shear modulus curve for soil, 15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul, 2001.
- [11] Ishihara, I., *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*, Oxford University, Oxford, 1996.
- [12] Camacho-Tauta, J. F., Evaluation of the small-strain stiffness of soil by non-conventional dynamic testing methods, Ph.D. Thesis, Universidade Técnica de Lisboa, 2011.
- [13] Richart, F. E., Hall, J. R. and Woods, R. D., *Vibrations of Soils and Foundations*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 1970.
- [14] Camacho-Tauta, J. F., Hacia la obtención de un modelo unificado de curvas de reducción del módulo cortante. Propuesta proyecto de investigación, Ingeniería Civil, Universidad Militar Nueva Granada, Grupo de Geotecnia, Bogotá. 2012.
- [15] Vucetic, M., Cyclic threshold shear strain in soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 120(12), pp. 89-107, 1994.
- [16] Vucetic, M. and Dobry, R., Effect of soil plasticity on cyclic response, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, vol. 117(1), 89-107. 1991.
- [17] Hardin, B. O. and Drnevich, V. P., Shear modulus and damping ratio in soils: Design equations and curves, *Journal of Soils Mechanics and Foundations Division*, ASCE, vol. 98, no.SM7, pp. 667-692. Jul, 1972.
- [18] Amorocho, R., Bayona, G. y Reyes-Harker, A., Controles en la composición de arenas fluviales en la zona proximal de una cuenca de antepais tropical (Colombia), *Revista Geología Colombiana*, vol 36 (1), pp. 163-178. Ago, 2011.
- [19] INVIAS, Determinación de la gravedad específica de los suelos y del llenante mineral. Norma I.N.V.E-128-07, Colombia. 2007.
- [20] ASTM. Standard test methods for the determination of the modulus and damping properties of soils using the cyclic triaxial apparatus, D3999-91, Reapproved 1996.
- [21] Camacho-Tauta, J. F., Jiménez, J. D. and Reyes-Ortiz, O. J., A procedure to calibrate and perform the bender element test, *DYNA*. Vol. 79(175), pp. 10-18, 2012.
- [22] Darendeli, M.B., Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. PhD Thesis, The Univ. of Texas, Austin, TX, 2001.