

AJUSTE DE CURVAS DE DEGRADACIÓN DE MÓDULO DE CORTANTE Y RELACIÓN DE AMORTIGUAMIENTO PARA LOS SUELOS DE CENIZAS: CASO ARMENIA (COLOMBIA)

SETTING DEGRADATION CURVES SHEAR MODULUS AND DAMPING RATIO FOR SOIL ASH IN ARMENIA (COLOMBIA)

Carlos Arturo García¹ Ocampo, Hugo Monsalve Jaramillo¹, Diego Andrés Peña Ceballos¹, Mario Andrés Pareja Soto¹

¹ Centro de Estudios e Investigaciones de la Facultad de Ingeniería, Grupo Quimbaya, Universidad del Quindío

Recibido: 2 Diciembre de 2015

Aceptado: 22 Diciembre de 2015

*Correspondencia del los autores: E-mails: cacivil_uq@uniquindio.edu.co, hugom@uniquindio.edu.co, diego87andres@hotmail.com, marejo725@hotmail.com

RESUMEN

Este artículo propone dos modelos o ecuaciones en función del índice de plasticidad IP para describir la degradación del módulo normalizado de cortante y relación de amortiguamiento en suelos de ceniza volcánica para la ciudad de Armenia; las ecuaciones obtenidas se derivan de los ensayos dinámicos realizados a las muestras de suelo recolectadas en la microzonificación sísmica de la ciudad. El primer modelo está asociado a los suelos de ceniza, probados por medio del ensayo de triaxial cíclico que mide sus propiedades dinámicas a altos niveles de deformación; el segundo modelo se deriva del ensayo de columna resonante que mide las propiedades dinámicas del suelo ante bajas deformaciones. Se encontró que el índice de plasticidad IP es una variable fundamental en el modelo que describe el comportamiento dinámico de la ceniza volcánica, en donde se evidenció que la ausencia de la variable de esfuerzo de confinamiento efectivo σ'_o en los modelos obtenidos, generan una notable diferencia entre las curvas obtenidas con el modelo del ensayo de triaxial y el modelo del ensayo de columna resonante.

Palabras claves: Módulo de cortante, Relación de amortiguamiento, Índice de plasticidad, Triaxial cíclico, Columna resonante, Ceniza volcánica.

ABSTRACT

This paper proposes two models or equations based on the PI (plasticity index) to describe the degradation of normalized shear modulus and damping ratio in volcanic ash soils for the city of Armenia, the equations are derived from the dynamic tests performed at soil samples collected in the microzonation of the city. The first model is associated with ash soils, evidenced through cyclic triaxial testing to measure their dynamic properties at high strain levels. The second model is derived from the resonant column test that measures the dynamic properties of soil with low deformations. It was found that the IP is a fundamental variable in the model describing the dynamic behavior of volcanic ash, where it was shown that the lack of variable effective confinement pressure σ'_o in the obtained models, generate a notable difference between the curves obtained with the triaxial test model and the model of resonant column test.

Keywords: Shear modulus, Damping ratio, Plasticity index, Cyclic Triaxial, Resonant column, Volcanic Ash.

INTRODUCCION

Cuando se desea conocer la respuesta dinámica de un suelo frente a cargas sísmicas, se debe tener en cuenta la capacidad que tiene el suelo de disipar energía por medio de deformación; para ello se parte de las curvas de esfuerzo cortante versus deformación angular. Estas curvas de esfuerzo deformación se obtienen de ensayos de laboratorio, en donde se toma una probeta cilíndrica de suelo y se le aplica una carga hasta llegar al punto de falla de la muestra ensayada; la carga aplicada puede ser de dos tipos: constante y variable. La carga variable se conoce como carga cíclica, la cual hace que la curva esfuerzo deformación presente un comportamiento histerético.

Hacia finales de los años 60's y principios de los años 70's los ingenieros B. O. Hardin, V. P. Drnevich, T. Iwasaki y T. Kokushu investigaron estas curvas histeréticas de los suelos, encontrando que la rigidez del suelo, en este caso, el módulo de cortante, presentaba una degradación para cierto rango de deformaciones angulares, que de igual forma influyen en la capacidad de disipar la energía o de amortiguar la carga aplicada. Así nacieron las curvas de degradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento, las cuales dependen de ciertas características físicas y mecánicas del suelo. Como característica física se tiene el índice de plasticidad IP, y como característica mecánica se tiene el esfuerzo de confinamiento del suelo. Para el caso de los suelos de ceniza volcánica, se tiene que son muy sensibles a la variable física, encontrándose suelos altamente plásticos debido a su elevado contenido de humedad ω ; en muchas muestras ensayadas en laboratorio se han encontrado contenidos de humedad que superan el 100% en estado natural (1); por tal razón resulta muy importante obtener unas curvas de degradación y amortiguamiento en función del índice de plasticidad de las cenizas volcánicas de la ciudad de Armenia, ya que se ha demostrado que entre más alto sea el índice de plasticidad, menor es el amortiguamiento del suelo frente a cargas sísmicas (2).

MARCO TEÓRICO

En el análisis unidimensional de un depósito de suelo, los parámetros dinámicos de los estratos son muy importantes en el cálculo de la respuesta del perfil de suelo modelado; dentro de estos parámetros dinámicos se tienen las curvas de degradación del módulo de cortante y radio de amortiguamiento, los cuales se generan por los esfuerzos cortantes inducidos por las

ondas sísmicas que se propagan por el subsuelo. Un suelo típico sujeto a cargas cíclicas simétricas puede exhibir comportamiento histerético, tal como se muestra en la Figura 1; este tipo de gráfico presenta unas curvas ("loops") con dos características importantes en cuanto a la forma: inclinación y amplitud. La inclinación de la curva depende de la rigidez del suelo, el cual puede ser descrito por el módulo de cortante tangente G_0 (3).

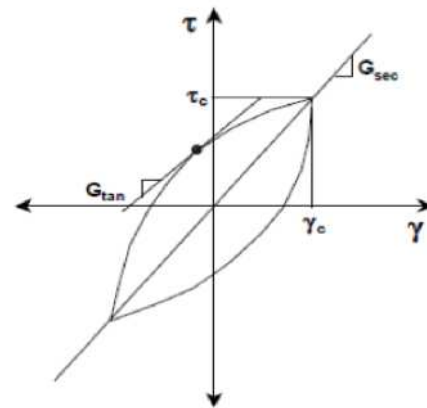


Figura 1: Módulo de secante G_{sec} en curva esfuerzo cortante-deformación angular [Tomado de Luna (3), 2000].

Obviamente este módulo varía con cada ciclo de carga, pero el valor promedio para toda la curva ("loop") se puede aproximar por medio del módulo de cortante secante:

$$G_{sec} = \tau_c / \gamma_c \quad (1.0)$$

Donde, τ_c y γ_c son el esfuerzo cortante y deformación cortante respectivamente, por lo tanto, el G_{sec} describe la inclinación general de una curva de histéresis. Por otro lado, la amplitud de la curva está relacionada con el área, con la cual se mide la energía disipada; esta puede ser descrita convenientemente por la relación de amortiguamiento:

$$\zeta = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{A_{loop}}{2\pi G_{sec} \gamma_c^2} \quad (2.0)$$

Donde W_D es la energía disipada, W_S la máxima energía de deformación y A_{loop} es el área de la curva ("loop"). Los parámetros anteriormente descritos, a menudo se refieren a un material lineal equivalente, con los cuales se puede obtener una curva de degradación del módulo de cortante y de relación de amortiguamiento tal como lo muestra la Figura 2.

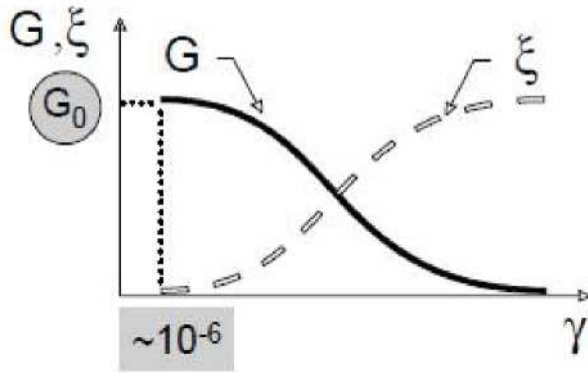


Figura 2: Curvas suavizadas de la degradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento (Tomado de Santos (4), 2003).

Estos gráficos se construyen a partir de ensayos dinámicos de laboratorio tales como columna resonante, triaxial cíclico, bender element y otros. El primer ensayo mide las propiedades del suelo ante bajas deformaciones, el segundo mide las propiedades dinámicas del suelo a altos niveles de deformación, y el último ensayo mide la velocidad de la onda cortante en laboratorio en especímenes de suelo, usando un elemento piezoeléctrico (5).

En la determinación de los modelos normalizados de laboratorio para la degradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento, se ha notado la influencia de la plasticidad del suelo en la forma de las curvas (5); se observó que el módulo de cortante de suelos con alta plasticidad se degradan menos rápido con deformaciones por cortante que los suelos de baja plasticidad, en cambio para la relación de amortiguamiento se comporta de manera opuesta. Después de hacer una revisión de los resultados experimentales de un amplio rango de materiales, se concluyó que la forma de la curva de degradación del módulo está más influenciada por el índice de plasticidad que por la relación de vacíos (2) y presentan el tipo de curvas mostradas en la Figura 3.

Estas curvas muestran que la deformación por cortante (γ) es muy grande para suelos de alta plasticidad en relación a los suelos de baja plasticidad; esta característica es extremadamente importante, ya que esto puede influenciar fuertemente la manera en la cual el depósito de suelo amplificará o atenuará el sismo.

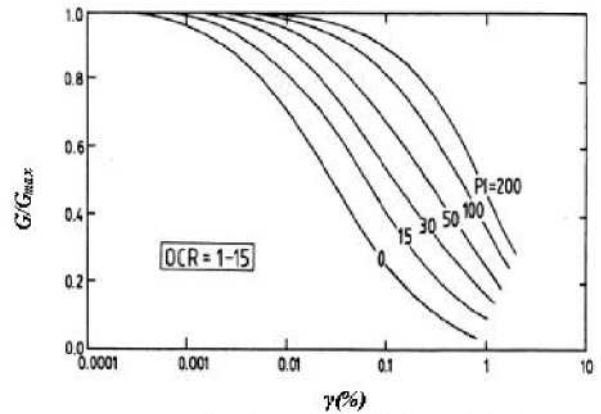


Figura 3: Curvas de degradación del módulo de cortante para suelos bien gradados con diferente plasticidad [adaptado de Kramer (5), 1996].

Las curvas de degradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento también están influenciadas por la presión de confinamiento efectiva, particularmente para suelos de baja plasticidad (6), (7); varios investigadores han generado modelos de laboratorio en donde se tiene la relación G/G_{max} en función de la deformación por cortante (γ), índice de plasticidad IP y presión de confinamiento efectivo σ'_m (8).

METODOLOGIA DE AJUSTE

Para obtener unas curvas de degradación del módulo normalizado de corte y relación de amortiguamiento, se utilizaron los datos provenientes de los ensayos de triaxial y columna resonante realizados por Ingeominas y Uniandes a las muestras inalteradas extraídas de las perforaciones mecánicas del estudio de microzonificación sísmica de la ciudad de Armenia (9). Para cada una de las muestras ensayadas, se varió el esfuerzo de confinamiento de acuerdo a la profundidad de extracción del espécimen de suelo. Para los ensayos de columna resonante y triaxial dinámico de Ingeominas, el esfuerzo de confinamiento varió de 0.3 a 2.2 Kg/cm², en cambio para los ensayos de Uniandes este confinamiento varió de 0.5 a 4 Kg/cm².

Se procedió a seleccionar el modelo matemático de Hardin y Drnevich (1972) (10) al considerarlo como el más adecuado para los datos recolectados:

Módulo de cortante:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} \tag{3.0}$$

Relación de amortiguamiento:

$$\frac{g}{g_{max}} = \frac{1}{1 + \gamma/\gamma_r} = 1 - \frac{G}{G_{max}} \tag{4.0}$$

Este modelo se basa en funciones hiperbólicas para suavizar las curvas obtenidas de los ensayos dinámicos, pero también se tuvo en cuenta la variación del índice de plasticidad y su directa relación con el comportamiento de las curvas de degradación del módulo de corte normalizado (G/G_{max}) y de amortiguamiento (ξ) (2).

Para obtener el modelo de de-gradación del módulo de cortante y relación de amortiguamiento se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. De los ensayos dinámicos se extrajeron los siguientes datos:

Profund. Ext	V (Kg/cm ²)	PI	LL	W	Gmax(Kg/cm ²)
2.4-2.85 m	0.5	61.4	81.9	86	50

Información del espécimen ensayado (Muestra inalterada de suelo tipo ceniza).

Tabla 1: Datos provenientes de ensayo de triaxial dinámico (9).

γ	ξ	G(Kg/cm ²)
0.01401	0.05227	12.39947
0.00998	0.07817	13.62469
0.00656	0.10313	16.46924
0.00317	0.19043	19.54483
0.00123	0.12496	29.36797
0.00071	0.09455	32.36029
0.00036	0.05592	39.00609

2. Se realizó un suavizado de los datos provenientes de los ensayos dinámicos, empleando modelos basados en funciones hiperbólicas-potenciales (11), esta función tiene la forma:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \alpha \gamma^\beta} \quad (5.0)$$

En donde la expresión $y = \alpha Y^\beta$, es una función potencial derivada de los valores γ/γ_r versus las deformaciones angulares (Y); de la Tabla 1 se divide los valores de G entre el valor de $G_{max} = 50$, obteniéndose así el módulo de cortante normalizado (G/G_{max}) y también se obtiene el amortiguamiento máximo ξ_{max} que se calcula con la ecuación (4.0). Posteriormente se calcula para cada nivel de deformación angular (Y) los valores (G_{max}/G) -1.

Tabla 2: Módulo de cortante normalizado y amortiguamiento máximo para datos de laboratorio.

G/Gmax	ξ_{max}	Gmax/G-1
0.24799	0.06951	3.03243
0.27249	0.10745	2.66981
0.32938	0.15379	2.03596
0.39090	0.31265	1.55822
0.58736	0.30283	0.70253
0.64721	0.26801	0.54510
0.78012	0.25432	0.28185

Se grafican los datos de la Tabla 2 de (G/G_{max} -1) versus las deformaciones angulares (Y) en escala logarítmica (ver figura 4), y se calcula una línea de tendencia obteniéndose así una expresión matemática para representar una curva suavizada para los datos del primer ensayo dinámico. Además, se obtiene el mayor valor para el amortiguamiento $\xi_{max} = 0.31265$ para la muestra ensayada.

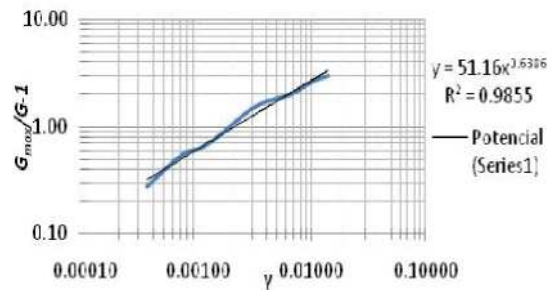


Figura 4: Regresión para obtener Y/Y_r

La ecuación para el primer espécimen tomado a una profundidad de 2.4 a 2.85 metros y con un IP= 61.4 es:

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + 51.16\gamma^{0.639}} \quad (6.0)$$

El procedimiento descrito anteriormente se realiza para cada uno de los especímenes ensayados, ya que el índice de plasticidad IP cambia según la muestra extraída de campo.

3. En virtud a que la forma de las curvas de degradación del módulo normalizado de cortante y relación de amortiguamiento se ven afectadas directamente con el índice de plasticidad IP, entonces se obtiene una correlación de los Y_r versus IP de cada espécimen. Para hacer posible la correlación, las curvas que se generan por el suavizado de cada muestra deben tener un punto en común, en donde ese punto en común corresponde a un γ_r para el cual $G = G_{max}/2$ (de acuerdo a la ecuación 1). De esta manera se obtienen

tantos Y_r como especímenes (índice de plasticidad) se hayan ensayado; en la Tabla 3 se exponen los valores obtenidos de Y_r para $G/G_{max}=0.5$, en donde los valores subrayados no se tuvieron en cuenta en la correlación. Para el estrato de cenizas se suavizaron 8 curvas de degradación y amortiguamiento, pero solo 4 de ellas se seleccionaron para obtener la correlación, debido a que las 4 restantes (datos subrayados) se ensayaron con valores de confinamiento iguales y no representativos del perfil de suelo, afectando de manera significativa la correlación obtenida.

Tabla 3: Valores de Y_r para $G/G_{max} = 0.5$

σ (KPa)	IP	Y_r
150	11.79	0.00393
100	19.9	0.00261
150	22.98	0.00368
300	24.9	0.00418
150	27.3	0.00360
300	36.7	0.00682
150	61.4	0.00285
150	80.73	0.00376

La correlación obtenida fue una tendencia lineal con un $R^2= 0.991$, la ecuación posee la forma:

$$Y_r = 0.00024IP - 0.002 \quad (7.0)$$

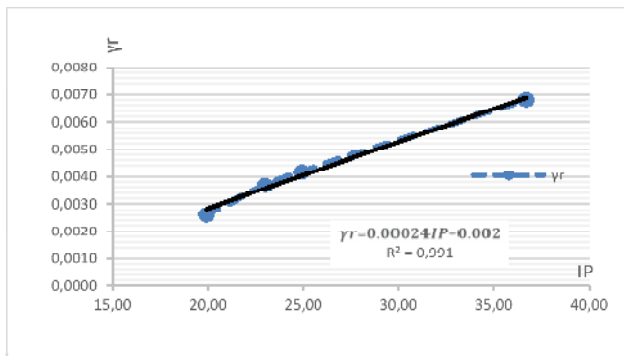


Figura 5: Correlación de Y_r versus IP para la muestra en estudio.

4. De igual forma se procedió para la obtención de correlación entre el amortiguamiento máximo ξ_{max} y el índice de plasticidad IP de cada espécimen; se seleccionaron 4 valores de ξ_{max} con confinamiento constante, obteniendo una correlación potencial con un $R^2 = 0.42$; por otra parte, se calculó otra correlación con confinamiento variable en donde se obtuvo una tendencia lineal con un $R^2=0.91$. En la Figura 6 se muestra el comportamiento del amortiguamiento ξ de las dos correlaciones para un $IP=15$. El problema que se tuvo con esta última correlación era que para va-

lores de IP menores a 20, se obtenían valores negativos de amortiguamiento, por lo tanto se decidió tomar como correlación la función potencial puesto que no presentaba este comportamiento.

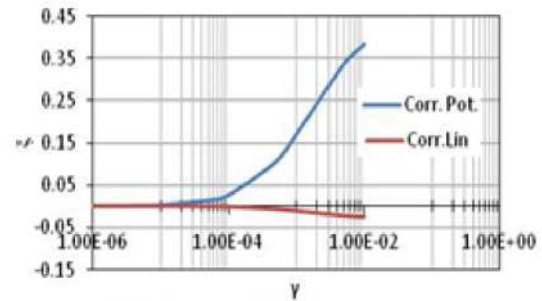


Figura 6: Curva amortiguamiento para $IP=15$.

Por lo tanto, la correlación potencial tiene la forma:

$$\xi_{max} = 1.5802 IP^{-0.479} \quad (8.0)$$

De acuerdo a la literatura, el ensayo de triaxial dinámico induce grandes deformaciones a la muestra de suelo, en cambio, el ensayo de columna resonante produce bajos niveles de deformación en el espécimen (5). Por tal razón, se decidió generar dos ecuaciones de curvas de degradación del módulo de corte y amortiguamiento, el primero para los datos provenientes del ensayo triaxial y el segundo modelo se generó para datos provenientes del ensayo de columna resonante, esto con el fin de evitar la mezcla de datos de uno u otro ensayo, puesto que los procedimientos que se realizan en laboratorio para estas dos pruebas dinámicas difieren tanto en el tamaño de la muestra como en los componentes del equipo para ensayarlas.

A continuación se exponen las ecuaciones obtenidas en función del índice de plasticidad IP para los suelos de ceniza.

- Cenizas, ensayo triaxial (datos Uniandes):
Módulo normalizado de corte (para $IP > 10$):

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{Y}{0,00024 * IP - 0,002}} \quad (9)$$

Relación de amortiguamiento:

$$g = (1.58 * IP^{-0.47}) \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right) \quad (10.0)$$

- Cenizas, ensayo columna resonante (datos Uniandes):

Módulo normalizado de corte (para $IP > 3$):

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{1}{1 + \frac{Y}{0.00005 * IP - 0.0001}} \quad (11.0)$$

Relación de amortiguamiento:

$$g = (0.006 * IP + 0.09) \left(1 - \frac{G}{G_{max}}\right) \quad (12.0)$$

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con los modelos obtenidos se obtuvieron curvas de degradación de acuerdo a varios índices de plasticidad. En la Figura 7 se puede observar las curvas de degradación del módulo normalizado de corte de acuerdo a la ecuación del ensayo triaxial, y en la Figura 8 se observan las curvas de amortiguamiento asociadas a los ensayos de triaxial.

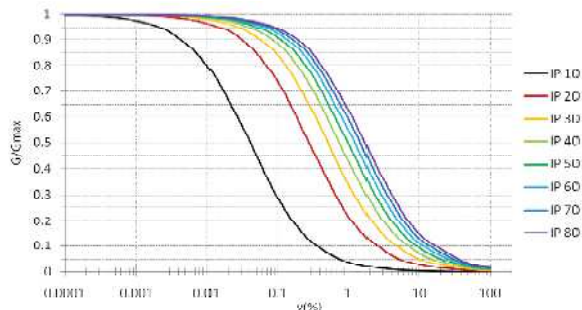


Figura 7: Curva de degradación del módulo normalizado de corte; modelo triaxial.

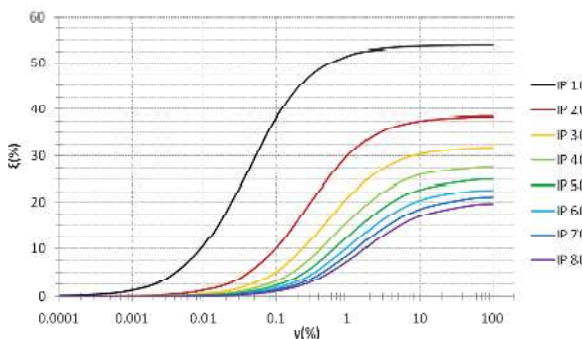


Figura 8: Curva de amortiguamiento; modelo triaxial.

En la figura 8 se puede ver que a medida que aumenta el índice de plasticidad, el amortiguamiento disminuye, lo cual es congruente con el comportamiento de las curvas de amortiguamiento para suelos bien graduados (2). Esta variación en las curvas se presenta, debido a que se obtuvo una correlación potencial que hace que los valores pequeños del índice de plasticidad no generen amortiguamientos de magnitud negativa. Para mejorar el modelo, se deben emplear más ensayos bajo distintos índices de plasticidad refinan-

do así la correlación obtenida.

En la Figura 9 se pueden ver las curvas de degradación del módulo normalizado de corte asociado a los ensayos de columna resonante.

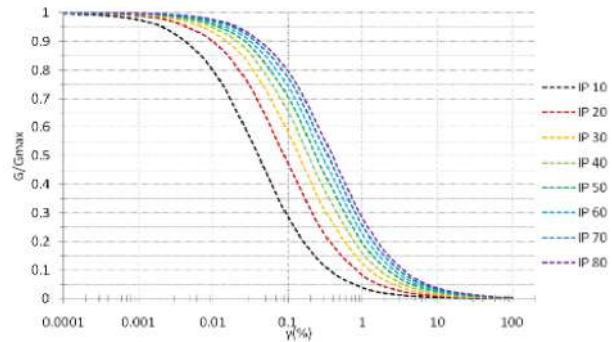


Figura 9: Curva de degradación del módulo normalizado de corte; modelo columna resonante.

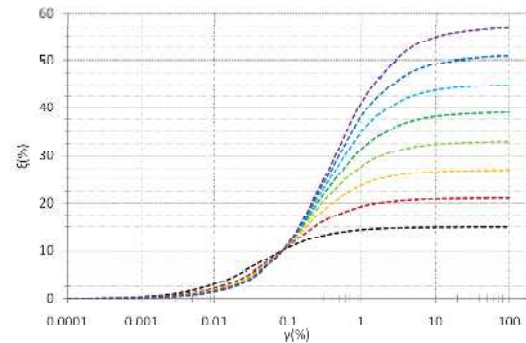


Figura 10: Curva de amortiguamiento; modelo columna resonante.

En la Figura 10 se puede observar el comportamiento de las curvas de relación de amortiguamiento, en donde éste aumenta conforme lo hace el índice de plasticidad, comprobando así que la correlación lineal obtenida para los datos del ensayo de columna resonante no es congruente con el comportamiento de las curvas de Vucetic y Dobry (2).

En la Figura 11 se tiene una comparación de las curvas de degradación del módulo normalizado de corte para un suelo con $IP=20$; se puede ver que la curva para el ensayo de triaxial (TRX) se degrada menos rápido que la curva asociada al ensayo de columna resonante (CR). De acuerdo a los rangos de deformación que describe cada ensayo, se esperaría una intersección de las curvas para un rango intermedio de deformaciones (0.1% a 1%); se sabe que para deformaciones menores 0.1%, el ensayo de columna resonante es ideal, por su parte el ensayo de triaxial describe mejor el compor-

tamiento de los suelos para deformaciones mayores a 0.1% (12). Al comparar las curvas, se observa que no ocurre la intersección esperada.

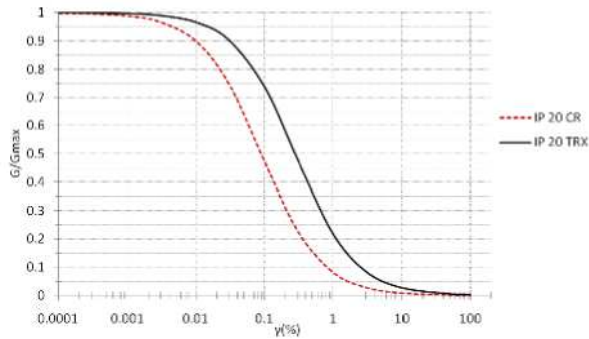


Figura 11: Curva de degradación del módulo normalizado de corte para suelo con IP=20, para ensayo de triaxial y columna resonante.

Este comportamiento se asocia a la forma como se obtuvieron las correlaciones para cada modelo, ya que solo se tuvo en cuenta como variable crucial el índice de plasticidad IP, pero de acuerdo a otros estudios, estas curvas están fuertemente influenciadas por el esfuerzo de confinamiento σ'_0 , ya que los suelos bajo tensiones de confinamiento altas se comportan como materiales más rígidos que los suelos sujetos a confinamientos menores (8).

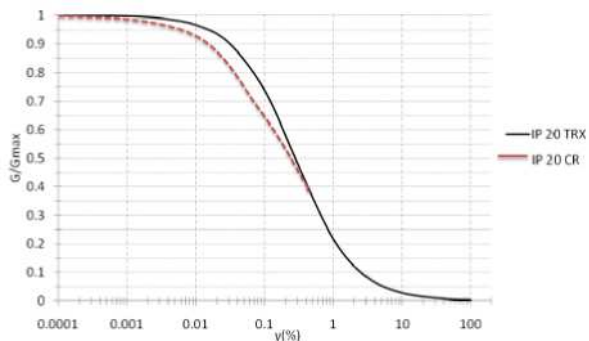


Figura 12: Comportamiento ideal de curva de degradación del módulo normalizado de corte de un suelo con IP=20.

En la Figura 12, se puede observar el comportamiento ideal entre el ensayo de columna resonante CR y en-

sayo de triaxial dinámico TRX, en donde la línea discontinua representa los valores del ensayo de CR para deformaciones menores a 0.1%; la línea continua que se encuentra por encima del ensayo CR, es una sobre estimación del módulo de corte G que se obtiene por el suavizado de la curva de laboratorio, puesto que con el ensayo de triaxial se obtienen los valores de cortante a partir de deformaciones mayores a 0.1%.

CONCLUSIONES

- Se obtuvieron dos modelos de degradación del módulo normalizado de corte y de relación de amortiguamiento para suelos de ceniza volcánica, debido a que se tienen dos ensayos dinámicos en donde las condiciones de las pruebas varían para el rango de deformaciones.
- Se encontró que la correlación con el índice de plasticidad IP en el modelo de relación de amortiguamiento más congruente con las curvas teóricas de Vucetic y Dobry es una función potencial, ya que la función lineal obtenida para el ensayo de columna resonante hace que los valores de amortiguamiento sean muy altos para suelos de alta plasticidad.
- Se comprobó que las curvas dibujadas con los modelos obtenidos bajo los ensayos de columna resonante y triaxial dinámico varían notablemente en todo el rango de deformaciones para un mismo valor de IP, producto de la influencia del esfuerzo de confinamiento, el cual no se tuvo en cuenta en las correlaciones.
- Se requiere de más ensayos dinámicos a suelos de ceniza volcánica con diferentes índices de plasticidad para así refinar el modelo de degradación del módulo normalizado de corte y relación de amortiguamiento de acuerdo a las correlaciones obtenidas en este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Lizcano A., Herrera M.C., Santamarina J.C. (2006). Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol 6 (2). Pp 167-198.
2. Vucetic M. and Dobry R.(1991) Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response. *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117, N°1., Pp. 89-107.
3. Luna, R. and H. Jadi (2000), Determination of Dynamic Soil Properties Using Geophysical Methods. *Proceedings of the First International Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure*, St. Louis, MO.
4. Santos J.A. (2003). Guías de clase: “Rigidez dos Solos-Curvas de Degradação, Projecto Geotecnico I. Mestrado em Geotecnia para Engenharia Civil. IST.
5. Kramer Steven L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. University of Washington Editorial Prentice Hall. Pp. 230-240.
6. Iwasaki T., Tatsuoka F. and Takagi Y. (1978). Shear Modulus of Sands Under Torsional Shear Loading. *Soil and Foundation*, Vol. 18, N° 1. Pp. 39-56.
7. Kokusho T. (1980) Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range. *Soil and Foundation*, Vol. 20, N° 2. Pp 45-60.
8. Ishibashi I. and Zhang X. (1993). Unified Dynamic Shear Module and Damping Ratios of Sand and Clay. *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soils Mechanics and Foundation Engineering. Vol. 33, N° 1. Pp. 182-191.
9. Asociación Colombiana de ingeniería Sísmica (AIS), Universidad de los Andes, Universidad del Quindío, corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ), Ingeominas. (1999) Estudio de micro-zonificación sísmica para orientar la reconstrucción de Armenia – Quindío. – Informe final.
10. Hardin B. O. and Drnevich V. P. (1972). Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves. *Journal of Soils Mechanics and Foundations*, Vol. 98, N° 7. Pp. 667- 692.
11. Yokota, K Imai; T. and Konno M. (1981). Dynamic deformation characteristic of soils determined by laboratory test. *OYO Tec. Rep 3*. Pp. 13-37.
12. Castellvi J. S. (1993). Medida de la deformabilidad de suelos mediante el equipo de Columna Resonante. *Revista de Obras Públicas*. N° 3319, Pp 57-66.