

Evaluación de las Propiedades Dinámicas de los Suelos de Bogotá Para Análisis de Respuesta Dinámica
Jorge Alberto Rodríguez O. IC, MSCE, PhD
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

RESUMEN

Se hace una evaluación del comportamiento mecánico observado de los suelos en las zonas 2 y 3 de la microzonificación sísmica de Bogotá, con base en los datos de unos 30 estudios de respuesta dinámica local. La información analizada corresponde a resultados de ensayos de Down Hole y ensayos triaxiales cíclicos. La información se analiza de una forma crítica para poder evaluar tendencias o correlaciones y establecer la variabilidad de los resultados. Se observa que la información más confiable corresponde a los datos de velocidad de onda de corte obtenida de ensayos de down hole en el terreno. Se encontraron claras relaciones entre los valores de VS medidos y los valores esperados a partir de correlaciones reportadas en la literatura en función del índice de plasticidad de los suelos. Estos resultados permiten predecir los valores de VS a partir de ensayos básicos de clasificación, en particular el índice de plasticidad, la relación de vacíos y el peso unitario o gravedad específica. El análisis de los datos también permite establecer el posible rango de variación de estos parámetros. Los resultados de los ensayos triaxiales cíclicos muestran una alta sensibilidad a las condiciones de las muestras y la forma de ensayo, dando como resultado una alta dispersión en los resultados. Debido a estos problemas a partir de los resultados directos de los ensayos no se aprecia de manera clara la concordancia con los resultados de ensayos reportados en la literatura técnica mundial sobre el tema. Sin embargo, teniendo en cuenta los efectos antes mencionados, y los resultados de ensayos realizados teniendo en cuenta las lecciones aprendidas, se aprecia que si hay una concordancia entre los resultados obtenidos para los suelos de Bogotá y los resultados reportados en la literatura. Esto es consistente con los hallazgos que se hicieron con respecto a los ensayos de campo. Los resultados de este estudio son importantes para el conocimiento del comportamiento básico de los suelos de Bogotá, y para los trabajos tendientes a revisar las recomendaciones de diseño para la microzonificación sísmica de la ciudad.

1 - Introducción

Los resultados de análisis de respuesta dinámica mediante modelos de propagación de ondas en el terreno dependen de las propiedades dinámicas y estratigrafía de los materiales involucrados. Los parámetros relevantes para este tipo de análisis son la rigidez a bajas deformaciones, la variación de la rigidez con la deformación y el número de ciclos y la variación del amortiguamiento. En el presente trabajo se hace una evaluación de estos parámetros con base en la información disponible de estudios de respuesta local realizados en la ciudad y se formulan conclusiones y recomendaciones para los análisis de respuesta.

Los aspectos que se consideran en el presente trabajo son:

- La estratigrafía
- La variación de la rigidez a bajas deformaciones
- La variación de la rigidez con la deformación
- La variación del amortiguamiento con la deformación

Para la evaluación de la variación de las propiedades es necesario considerar la variabilidad intrínseca de las propiedades en el terreno así como la incertidumbre asociada con la determinación mediante ensayos de campo y de laboratorio.

2 - Condiciones generales de suelos – estratigrafía

Las condiciones típicas del perfil de suelos en las zonas 3 y 4 de la Ciudad de Bogotá corresponden a tres formaciones. Un espesor pequeño de suelos superficiales desecados del orden de 5 m, seguido por una secuencia de suelos arcillosos de origen lacustre de la formación Sabana. Posteriormente se encuentra una secuencia de suelos de origen predominantemente aluvial con presencia de arenas que corresponde a la formación Subachoque. Estas formaciones tienen espesor variable que aumenta desde los piedemontes de los cerros que bordean la Sabana hacia la parte central de los valles que se forman entre las cadenas montañosas, y además en dirección sur y sur occidental en la misma dirección general de flujo del río Bogotá (H-MV, 2003). En el sector del norte de Bogotá, entre los cerros de Suba y orientales el espesor máximo es del orden de 200m (Microzonificación sísmica de Bogotá, 1997). Hacia el sur de la calle 80 aproximadamente, donde termina el cerro de Suba los espesores de los depósitos aumenta, posiblemente por efectos tectónicos. En el sector de Funza, se obtienen los máximos espesores del orden de 400 m.

Las formaciones Sabana y Subachoque tienen una composición relativamente uniforme en cuanto a tipos de materiales y su comportamiento mecánico está influenciado por la variación de los esfuerzos de confinamiento con la profundidad. Sin embargo localmente existen variaciones en la estratigrafía relacionados con el origen e historia de los suelos desde su formación. En el caso de la formación Subachoque las variaciones se deben a la dinámica deposicional de las antiguas corrientes de agua que formaron los depósitos aluviales y por lo tanto pueden presentar variaciones locales significativas. Esto es similar a lo que se observa a poca profundidad en el sector sur occidental de la ciudad correspondiente a los abanicos de los ríos Tunjuelo y Fucha. Los antiguos cauces y valles aluviales tuvieron una pendiente longitudinal del orden de 0,8%, la cual fue variando en función de los levantamientos tectónicos de la cordillera y la tasa de denudación, relacionada a su vez con las variaciones del clima.

En el caso de los suelos arcillosos de la Formación Sabana estos se formaron en un ambiente lacustre. Por lo tanto la pendiente de los depósitos estacionales es muy baja y los materiales son finos (arcillas y limos) Sin embargo durante el periodo de formación de esta formación, del orden de 1.200.000 años (Torres et al, 2005, Ingeominas, 2004), se presentaron variaciones importantes del clima, en particular periodos glaciares e interglaciares que hicieron variar la profundidad del lago y por lo tanto permitieron la formación de depósitos de suelos orgánicos así como perfiles de variación por desecación de los suelos depositados por debajo de estos niveles de manera similar a lo que ocurre actualmente en la Sabana de Bogotá. Estos paleosuelos fueron subsecuentemente cubiertos por nuevos depósitos en períodos húmedos sucesivos. En la Figura 1, tomada de (2004), se aprecia la variación climática representada en la variación del polen de diferentes especies halladas en el perfil de suelos. En dicha Figura también se indica la variación estratigráfica y de contenido de minerales de los suelos asociados con este proceso de formación. Se puede apreciar como en la parte inferior del depósito se encuentran depósitos arenosos de la formación Subachoque y en la parte superior arcillas de la formación Sabana, con la presencia de 4 niveles de turba o paleo suelos orgánicos.

Existe otro factor importante que afecta la composición, comportamiento y posiblemente la estratigrafía de los suelos de la formación Sabana y es el aporte de cenizas volcánicas provenientes de erupciones de los volcanes de la Cordillera Central. Estas cenizas fueron aportadas en cantidades importantes y se sedimentaron sobre el lago de la Sabana durante diferentes épocas en el cuaternario. El aporte de cenizas volcánicas confiere alta plasticidad y junto con la presencia de diatomeas la posibilidad de estructuración particular a los suelos blandos de la Sabana.

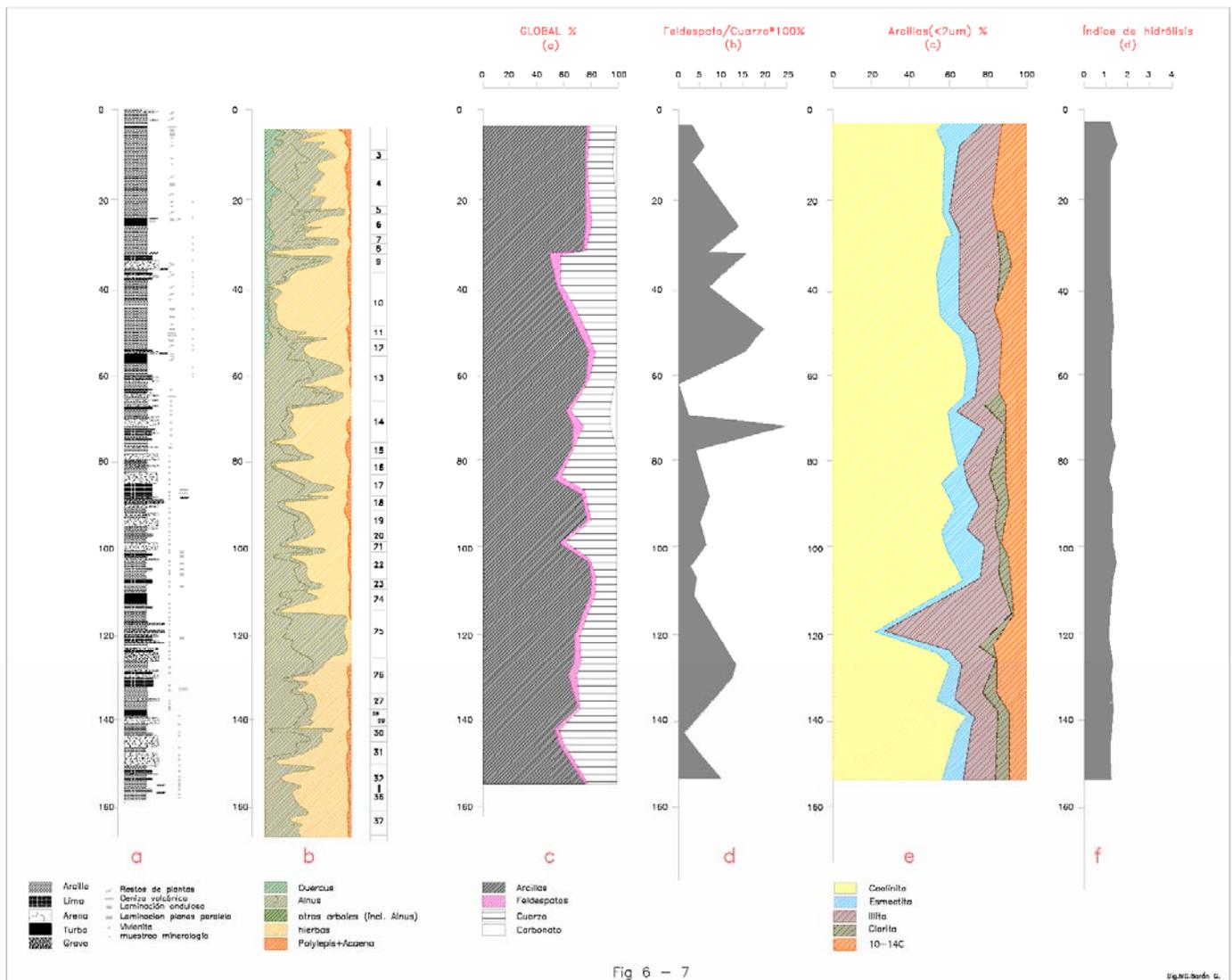


Figura 1 - Perfil estratigráfico en el Ingeominas (Tomado de Figura 6-7, Ingeominas, 2004)

El origen de los suelos define su mineralogía y estructura inicial. Cambios ambientales subsecuentes dan lugar a cambios de estado, en particular a lo que tiene que ver con la sobre-consolidación. Todos estos factores son los que finalmente determinan las propiedades mecánicas de los suelos y en particular las propiedades dinámicas. Con base en la información de la formación e historia geológica de los suelos de la Sabana de Bogotá, es de esperarse una tendencia de comportamiento característica para los suelos de la

formación Sabana y otra para los de la Formación Subchoque, aunque sin diferencias de tendencia muy marcadas. Dentro de esta tendencia se deben apreciar variaciones locales debidas a eventos particulares de depositación y cambios climáticos generales, los cuales deben ser consistentes en diferentes zonas de la Sabana, y cambios locales particulares de carácter puntual por cambios en las condiciones locales. Estas hipótesis se deben verificar con base en ensayos confiables que permitan evaluar con suficiente resolución los parámetros y los cambios que se produzcan. Una primera aproximación a este ejercicio se presenta a continuación.

3 - Determinación de propiedades dinámicas a bajas deformaciones

Para evaluar la importancia relativa de los diferentes parámetros es necesario hacer un análisis de sensibilidad alrededor de casos típicos representativos. De lo contrario habría que hacer un análisis paramétrico muy amplio, para muchos casos en los que la mayor parte no serían representativos de las condiciones de interés y no permitirían obtener conclusiones aplicables al caso de estudio.

Por lo tanto para el presente estudio se considera un caso típico del sector norte de la ciudad. Los parámetros básicos de clasificación de suelos se presentan en la Figura 2. En Esta figura se aprecia la variación de las propiedades en los primeros 50 m de profundidad, correspondiente a suelos de la Formación Sabana.

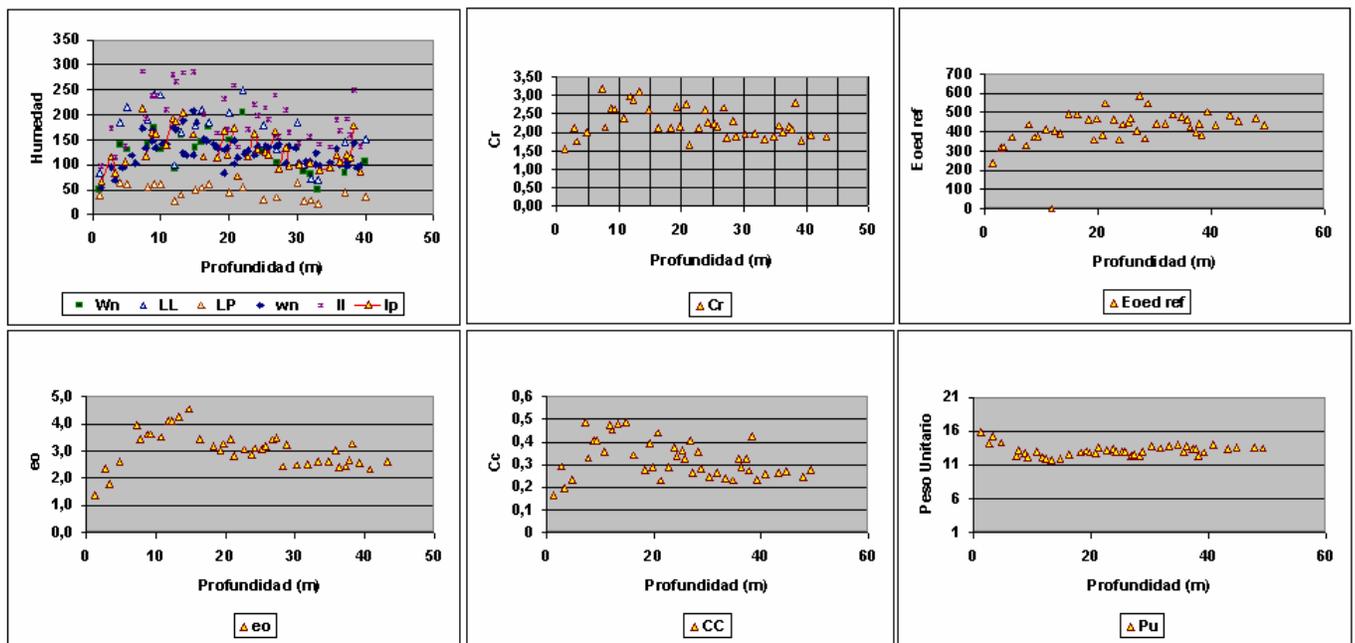


Figura 2 - Propiedades de suelos típicas en el norte de Bogotá. De izquierda a derecha y de arriba abajo. Límites de consistencia, índice de plasticidad y humedad natural. Índice de recompresión (a partir de correlaciones y ensayos de consolidación), Módulo edométrico en KPa para presión de referencia de 100 kPa, relación de vacíos, Índice de recompresión (a partir de correlaciones y ensayos de consolidación), peso unitario total (kN/m^3).

Los resultados de la figura 2 permiten observar el comportamiento de los parámetros en la capa superficial desecada, y luego la variación con la profundidad debido al aumento de la presión de confinamiento de los

suelos de la formación Sabana con variaciones puntuales dentro de un rango del 10% al 20% dependiendo de los parámetros considerados.

Los valores de rigidez a bajas deformaciones para un perfil de suelos se obtienen a partir de ensayos de Down Hole. En la Figura 3 se presentan resultados de ensayos de down hole en la zona de interés.

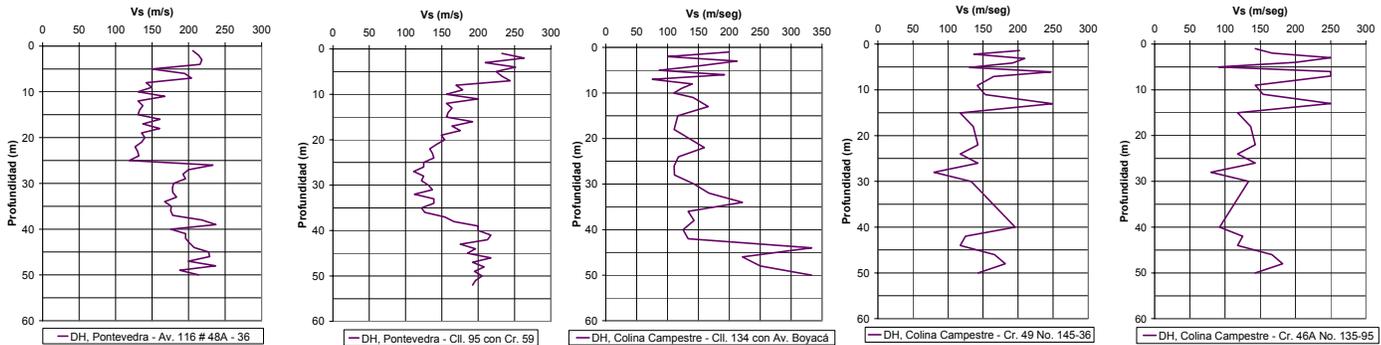


Figura 3 – Resultados de down hole. Se aprecia de izquierda a derecha la variación del perfil de VS a medida que se aleja del piedemonte de los cerros de Suba hacia la parte mas profunda del valle. Se aprecia la presencia de los suelos más rígidos superficiales, y como se va profundizando el comienzo de los suelos arenosos más rígidos de la formación Subachoque.

En la Figura 3 se aprecia que en toda la zona los ensayos de down hole son bastante consistentes entre sí, y muestran un rango de variación que está relacionado con la variabilidad intrínseca del suelo, el aumento de la presión de confinamiento con la profundidad y con las limitaciones de precisión (posibilidad de medir tiempos de arribo) y de resolución (diferencia entre mediciones sucesivas y distancia entre mediciones) del ensayo de down hole. Rodriguez (2006) ha presentado resultados del análisis de correlación y variabilidad de los datos de VS que se obtienen de los ensayos de down hole realizados en la zona. En la Figura 4 se muestra la variación de VS en los rangos de profundidad correspondiente a las tres unidades identificadas en la zona de los ensayos que se muestran en la Figura 3. Se distinguen valores del orden 200 m/s en los primeros 7 m de profundidad correspondiente a los suelos desecados. Posteriormente se encuentran los suelos de la formación Sabana, con valores de VS del orden de 150 m/s. Debajo de estos suelos se encuentran suelos más rígidos de la formación Subachoque con valores típicos de VS de 200 m/s.

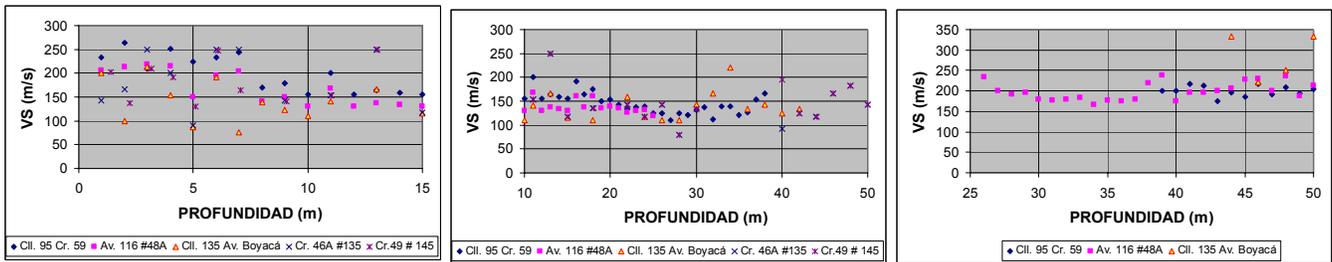


Figura 4 – Variación de VS en las tres formaciones del área. A la izquierda efecto de la sobreconsolidación superficial, en la parte media VS en la formación Sabana, a la derecha VS en la formación Subachoque con estratos arenosos.

Dentro de los valores generales de las tendencias indicadas hay variaciones que están relacionadas con variaciones en las condiciones del perfil de suelos y con limitaciones en su determinación. Con base en los datos de Rodríguez (2006) se puede estimar esta variabilidad en función de la profundidad como se presenta en las Figuras 5 y 6. En estas figuras se muestran los datos de la Figura 3 junto con los valores de VS calculados a partir de los datos de la Figura 2 para un sitio típico de los alrededores de la autopista norte al frente del cerro de suba, considerando dos perfiles de preconsolidación. Para obtener los datos de la Figura 5 se estimó la presión de preconsolidación considerando que la relación de sobreconsolidación es directamente proporcional al valor del peso unitario, con lo que se obtiene el perfil de preconsolidación que se muestra a la derecha de la Figura 5. Esta suposición es consistente con el origen del depósito como se muestra en la Figura 1, suponiendo que pudo haber tiempos en que el nivel del lago estuvo bajo y el suelo pudo sufrir sobreconsolidación por desecación. Para el perfil de la Figura 6 se ha considerado otra distribución de la presión de preconsolidación que puede ser factible dependiendo de la localización del sitio con respecto al borde del agua en diferentes sitios de la cuenca y en diferentes épocas. En ambos casos se obtiene un rango de variación de VS que corresponde bien con los valores medidos en ensayos de down hole en estudios cercanos. Estos resultados muestran que es posible predecir los valores de VS con base en el conocimiento del tipo de materiales (índice de plasticidad) y su estado actual (relación de sobreconsolidación y relación de vacíos), de acuerdo con los principios básicos de la mecánica de suelos y los resultados de los estudios del comportamiento dinámico de los suelos reportados en la literatura. Si no hay incertidumbre con respecto al estado del suelo, el estimativo de VS se puede hacer en un rango del orden de 25 m/s. Como generalmente no se conoce con suficiente detalle el perfil de índice de plasticidad y relación de vacíos, ni tampoco (como en el caso de las figuras 2, 5 y 6) la presión de preconsolidación, es necesario considerar rangos de variación de Vs, los cuales se encuentran relativamente bien acotados dentro de un rango del orden de 50 m/s. Esto aplica también para las mediciones de Vs, en las que la incertidumbre está dada por la resolución y precisión de los ensayos de down hole que se utilizan en nuestro medio.

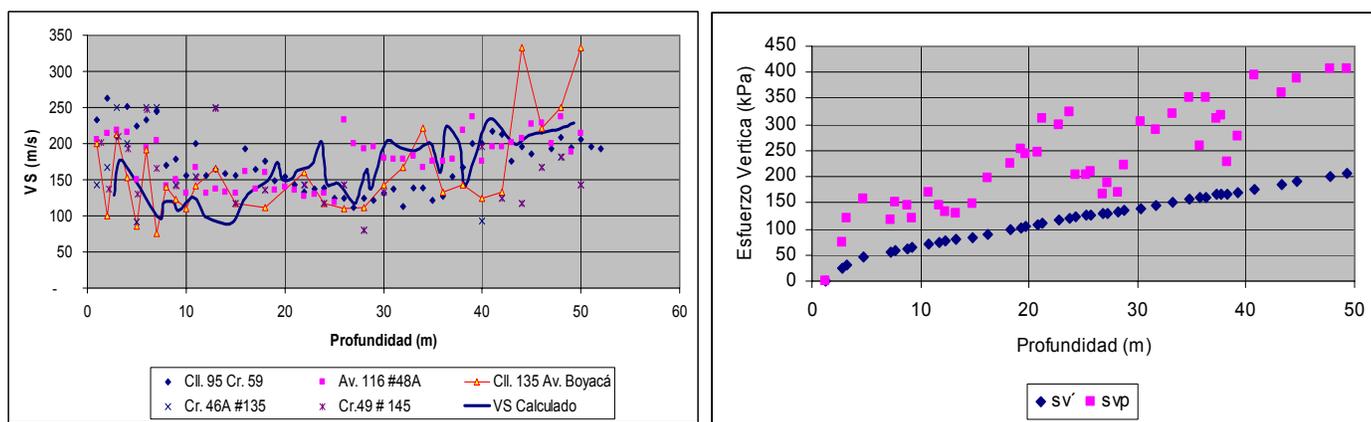


Figura 5 – Variación de los valores de VS para el perfil de preconsolidación que se indica a la derecha.

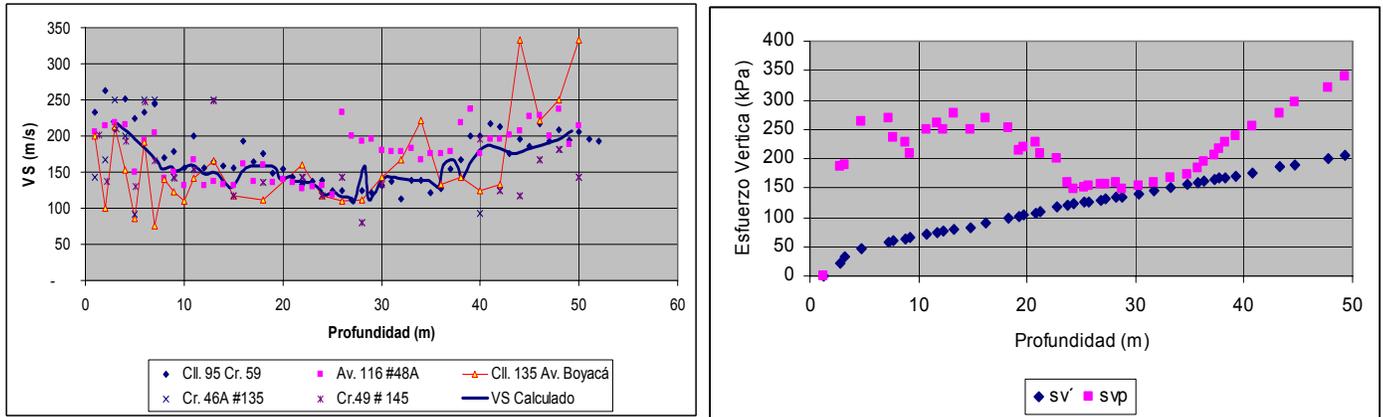


Figura 6 – Variación de los valores de VS para el perfil de preconsolidación que se indica a la derecha.

4 - Variación de la rigidez y el amortiguamiento con la deformación

Para la determinación de las curvas de variación de la rigidez y el amortiguamiento con la deformación se consideraron resultados típicos de ensayos dinámicos, principalmente triaxial cíclico, teniendo en cuenta las experiencias recopiladas en el análisis de este tipo de ensayos y considerando las variaciones que se han obtenido (Rodríguez, 2005b). En este caso se quiere hacer una primera aproximación a la confiabilidad y representatividad de los resultados de ensayos disponibles en la ciudad, y la relación que estos resultados tienen con los datos reportados en la literatura.

Las curvas dinámicas se obtienen a partir de ensayos triaxiales, de columna resonante y bender elements. En la definición de estas curvas es importante tener en cuenta que los resultados del laboratorio son diferentes a los que se obtienen en el terreno. Esto se debe a varias causas a saber:

- Alteraciones de las muestras por efecto del muestreo. Esto se relaciona con el tipo de muestreador y procedimiento de toma y en particular con las dimensiones del muestreador en relación con el espesor de su pared. Muestras de alta calidad se obtienen cuando la relación entre el área de la pared del muestreador y de la muestra es menor del 10%, siempre y cuando que la pared del muestreador sea perfectamente lisa, libre de irregularidades, óxido u otros factores que puedan alterar la muestra, y que el procedimiento de hinca, transporte y extracción de la muestra tanto del terreno como del muestreador sean tales que la muestra no se vea sometida a esfuerzos y deformaciones que la puedan alterar. Los muestreadores y métodos de muestreo que se utilizan en Bogotá permiten obtener muestras que en el mejor de los casos sólo corresponden a muestras de regular calidad de acuerdo con estándares internacionales (Lowe, 1975). Por lo tanto es de esperar que los datos de los ensayos de laboratorio tengan una mayor incertidumbre que los datos de campo.
- Las muestras al ser extraídas en el laboratorio para su ensayo se ven sometidas a cambios de esfuerzos de gran magnitud que producen deformaciones bajo condición no drenada y bajo condición de consolidación si se mantienen durante algún tiempo en el laboratorio sin tomar medidas especiales para controlar la presión. Estas deformaciones pueden llegar a ser muy grandes, mucho mayores que las que sufre el suelo durante carga sísmica. Dado que las curvas de variación de la rigidez varían mucho con las deformaciones, y es justamente esta variación la que se quiere

estudiar, al hacer los ensayos sobre muestras que han sufrido deformaciones hace que esta determinación sea muy poco representativa. Este efecto se ha observado en estudios de laboratorio en los que se han ensayado varias muestras idénticas a diferentes tiempos luego de obtenidas del terreno (Toro, 2004)

- Por otra parte los resultados de los ensayos de laboratorio dependen de la variación del estado de esfuerzos de consolidación con respecto a las condiciones reales en el terreno que son una condición K_0 mientras que la condición del ensayo es usualmente de consolidación isotrópica. Rodríguez, (2005a) reporta valores de K_0 del orden de 0,8 medido en el laboratorio para una arcilla blanda a 6m de profundidad de la Formación Sabana. Sin embargo, el valor de K_0 para los suelos blandos de Bogotá no se ha estudiado en detalle, en especial teniendo en cuenta que hay evidencia de la anisotropía de estos suelos (Rodríguez, 2005a), lo cual es típico de los suelos naturales en general (Leroueil, 2001)
- Hay otros factores relacionados con el comportamiento mecánico de los suelos que tienen influencia en los resultados, tales como la tasa de carga y el número de ciclos. Debido al comportamiento viscoso de los suelos finos la rigidez y la resistencia dependen de la tasa de carga en función del Índice de Viscosidad, que a su vez depende de la plasticidad del suelo (Berre y Bjerrum, 1973, Mitchell et al, 1968, Mesri y Ajlouni, 1997). El número de ciclos es importante en la medida que se producen deformaciones plásticas o cambio de la estructura del suelo con la deformación y depende del tipo de sismo que se esté considerando. Por lo tanto el diseño e interpretación de los ensayos debe considerar estos aspectos.
- Por otra parte hay factores relacionados con el equipo, el montaje de la muestra, la secuencia de ensayo incluyendo la saturación, consolidación y posterior carga cíclica por medio de deformación o esfuerzo controlados, la resolución y precisión del sistema de medición, la medición de las presiones de poros que se pueden generar durante el ensayo y que cambia los esfuerzos efectivos de confinamiento, la adquisición de los datos y el procesamiento de la información.

Todos los aspectos considerados hacen que la determinación de las curvas dinámicas de suelos naturales, en especial suelos blandos, sea difícil y tenga mucha incertidumbre. Por estas razones no se ha podido establecer en Bogotá con claridad si existe una relación entre la plasticidad y el nivel de esfuerzos y las curvas dinámicas, y si esta relación es similar a la información reportada en la literatura y validada en varios estudios muy cuidadosos bajo condiciones controladas (Dobry y Vucetic, 1987, Harding y Black, 1968, Ishibashi y Zhang, 1993, Kokushu 1980, 1987). Las curvas dinámicas reportadas en el estudio de microzonificación sísmica muestran serias diferencias e inconsistencias con respecto a lo que se espera a partir de la información reportada en la literatura y el conocimiento del comportamiento del suelo. Resultados reportados por Rodríguez, E. (2002) muestran que no es posible asociar el comportamiento observado con lo reportado internacionalmente a partir de un buen número de resultados reportados con posterioridad al estudio de la microzonificación. Esto puede tener dos explicaciones. Una es que los resultados para los suelos de Bogotá son definitivamente diferentes a lo reportado en la literatura, o que los resultados de los ensayos considerados no son precisos. La primera hipótesis se invalida si se encuentran casos que la desmientan, pero aún si fuera cierta, debería haber tendencias de comportamiento en función de parámetros de estado u origen de estos suelos. La segunda se confirma si se encuentran explicaciones para las discrepancias, y si al superarlas se obtienen resultados más consistentes con los reportados internacionalmente. Los resultados de Rodríguez (2006), muestran una muy clara y fuerte correlación entre

el origen y estado de los suelos blandos de Bogotá, y de estas propiedades (en particular el índice de plasticidad y relación de vacíos), con la rigidez a bajas deformaciones (V_s), incluyendo el efecto de la presión de confinamiento y la preconsolidación. Estas observaciones muestran que los suelos de la ciudad se comportan de la misma forma como se ha observado y reportado en la literatura. Por lo tanto la primera hipótesis se puede descartar. La segunda hipótesis se confirma con los resultados reportados por Rodríguez (2005b). A continuación se discuten algunos aspectos relacionados con los ensayos de laboratorio.

En la Tabla 1 se muestran datos básicos de las muestras empleadas en ensayos triaxiales cíclicos realizados en cuatro sitios en Bogotá y los valores de E_0 correspondiente al módulo de elasticidad a bajas deformaciones, obtenido a partir de las curvas dinámicas obtenidas en los ensayos triaxiales y de ensayos de campo para las mismas muestras. El sitio 1, correspondiente a la zona 2 de la microzonificación, presenta los mayores valores de E_0 , peso unitario, y peso unitario, las menores humedades naturales, propiedades índice y relación de vacíos; mientras el sitio 4, correspondiente a la zona 3, presenta una situación contraria donde los suelos presentan altos valores de relación de vacíos y humedad, lo cual es característico de los suelos de origen lacustre. En la Tabla 1 se puede observar la alta humedad de las muestras 2-1 y 4-4. Las altas humedades se presentan generalmente en los estratos del depósito con alto contenido de materia orgánica. Se debe anotar que estos estratos son usualmente de poco espesor y las muestras presentan muy baja rigidez en los ensayos de laboratorio. Los valores de rigidez obtenidos de los ensayos de down hole, $E_0(V_s)$, usualmente no son muy representativos para estos estratos pues es muy difícil, si no imposible, en los ensayos normales de down hole evaluar con precisión capas de poco espesor de suelos que tienen una rigidez menor que los adyacentes hacia arriba y hacia abajo. Por esta razón las mayores diferencias entre los valores de E_0 calculados en el laboratorio y a partir de los datos de VS ocurren en estas muestras. El comportamiento dinámico de estos suelos orgánicos ha sido evaluado en detalle por Moreno y Rodríguez (2004).

Tabla 1 – Propiedades Básicas de las Muestras

# Sitio	# Muestra	Prof. (m)	Clasif. USC	LL (%)	LP (%)	ω_n (%)	γ (KN/m ³)	Gs	e	σ_c (KPa)	E_0 (KPa)	$E_0(V_s)$ (KPa)
1	1	7.9-8.6	CH	54.9	25.6	44.0	17.2	2.49	1.09	97	40000	94395
1	2	11.9-12.6	CL	31.8	19.8	24.1	19.8	2.61	0.64	117	60000	234091
1	3	18.5-19	CL	37.6	25.2	32.4	18.6	2.60	0.85	154	48000	219903
2	1	9.2-9.9	MH	303.5	242.8	224.9	12.2	2.40	5.39	83	8500	157197
2	2	24.1-24.8	MH	93	51.2	69.4	15.5	2.48	1.71	123	25000	221293
2	3	50.0-50.6	CH	92.3	31.7	50.8	16.5	2.47	1.26	147	24000	212602
3	1	10-10.5	CH	188.9	50.9	119.2	13.4	2.48	3.19	57	18000	123975
3	2	20-20.5	MH	289	98.6	143.3	12.1	2.18	3.49	99	19000	167608
4	1	15	CH	152.60	92	187	13	2.56	3.6	85	60000	95040
4	2	25	CH	152.60	67	110.7	15	2.56	2.2	128	60000	98093
4	3	36	MH	86.7	43	75.2	14.5	2.44	1.7	175	90000	153878
4	4	51	CH	206.10	52	110.7	15.7	2.34	2.1	240	70000	116166

Al observar las curvas dinámicas de todos los sitios se observó ver que, por lo general las tendencias encontradas en los suelos blandos de la Sabana (zona 3 y 4) determinan que la degradación comienza antes que la degradación dada por las curvas típicas reportadas en la literatura (Ishibashi y Zhang, 1993), que la relación de amortiguamiento tiende a dar valores mayores a los esperados, y que las curvas de amortiguamiento no tienden a un valor constante después deformaciones de 1% en la mayoría de los casos. Sin embargo en los suelos de alta rigidez típicos de la zona 2 que rodean la cuenca se da una situación

inversa en cuanto a los valores de amortiguamiento y las curvas de tendencia de degradación y las de Ishibashi y Zhang (1993) ya que tienden a dar los valores muy parecidos y el inicio de la degradación se da a niveles de deformación similar.

La observación de los resultados de los ensayos y la consideración de los factores relacionados con la confiabilidad de los ensayos ya mencionados, ha permitido mejorar la calidad de las pruebas, lo cual ha ayudado a dar solución a los interrogantes planteados al comienzo de esta sección. Con base en la experiencia obtenida en casi dos años de hacer ensayos para estudios de respuesta local en Bogotá, realizados en el equipo triaxial cíclico GDS de la Universidad Javeriana, se ha definido un procedimiento de ensayo que permite obtener la mejor definición posible de las curvas dinámicas. Este considera en la fase de carga cíclica la aplicación de esfuerzos controlados incrementando el nivel de esfuerzos a partir del mínimo nivel que se puede registrar con el sistema (del orden de 10 kPa). Para cada nivel de esfuerzos se hacen diez ciclos, lo cual se considera representativo del tipo de movimiento correspondiente a los niveles de diseño de acuerdo con la amenaza sísmica para la ciudad, y para cada ciclo se calcula el módulo de elasticidad equivalente del ciclo y la relación de amortiguamiento. Debido a que en cada ciclo la deformación, y por lo tanto el módulo y el amortiguamiento cambian ligeramente por la respuesta del suelo, esta forma de ensayo permite identificar la curva dinámica de manera más completa que en los ensayos de deformación controlada. Por otra parte se logran datos para niveles de deformación a partir de 10^{-5} por lo que se pueden definir mejor las curvas dinámicas.

Las Figuras 7 y 8 presentan resultados recientes obtenidos para suelos de dos sitios de la zona 3 utilizando el procedimiento mencionado. En las gráficas se indican los resultados correspondientes a cada ciclo de carga con cada nivel de esfuerzos. Los resultados muestran que el procedimiento de ensayo produce un comportamiento consistente en el que la rigidez varía con el número de ciclos y el nivel de deformación. Se aprecia una mayor dispersión en los datos a muy bajas deformaciones por efecto de la resolución del equipo de medición, pero se obtienen buenos valores para deformaciones del orden de $2E-4\%$. La dispersión es mayor en los datos de amortiguamiento porque normalmente los ciclos de histéresis no corresponden muy bien con los ciclos idealizados y por lo tanto el cálculo del amortiguamiento a partir del área dentro de los ciclos tiene variaciones.

En las Figuras 7 y 8 se presentan como referencia las curvas obtenidas por medio de las expresiones de Ishibashi y Zhang (1993). La comparación permite apreciar que en todos los casos las curvas obtenidas en los ensayos, si bien están un poco por debajo de las de referencia, tienen patrones bastante similares, y en el caso de la Figura 8 son muy similares. Las diferencias en el caso de la Figura 7 son mayores que en la Figura 6, posiblemente por una menor calidad de las muestras. Se debe mencionar que los resultados obtenidos con procedimientos de ensayo diferentes, en particular pruebas de deformación controlada, con pocos ciclos de carga, o sobre muestras suministradas ya extraídas de los tubos shelby, o que han tenido que esperar varias semanas en el laboratorio para su ensayo, muestran resultados con una alta variabilidad y casi nunca correlacionables con los valores reportados en la literatura.

Se considera que dado que los resultados obtenidos al hacer ensayos con un procedimiento adecuado, sobre muestras razonablemente buenas, son muy similares a los reportados en la literatura, y dado que se han evidenciado las limitaciones ya anotadas en las muestras y procedimientos de ensayo, se puede concluir que el comportamiento dinámico de los suelos de Bogotá no es significativamente diferente que los reportado en la literatura para otros suelos teniendo en cuenta su plasticidad, estado y niveles de esfuerzos. Por otra parte obtener buenos resultados en los ensayos dinámicos de laboratorio es muy difícil. Por lo tanto para efectos prácticos siempre es recomendable tomar como referencia los valores reportados en la literatura y tener en

cuenta la variabilidad intrínseca en estos datos. También se hace evidente la necesidad de obtener mejores muestras y realizar los ensayos de manera muy cuidadosa y oportuna.

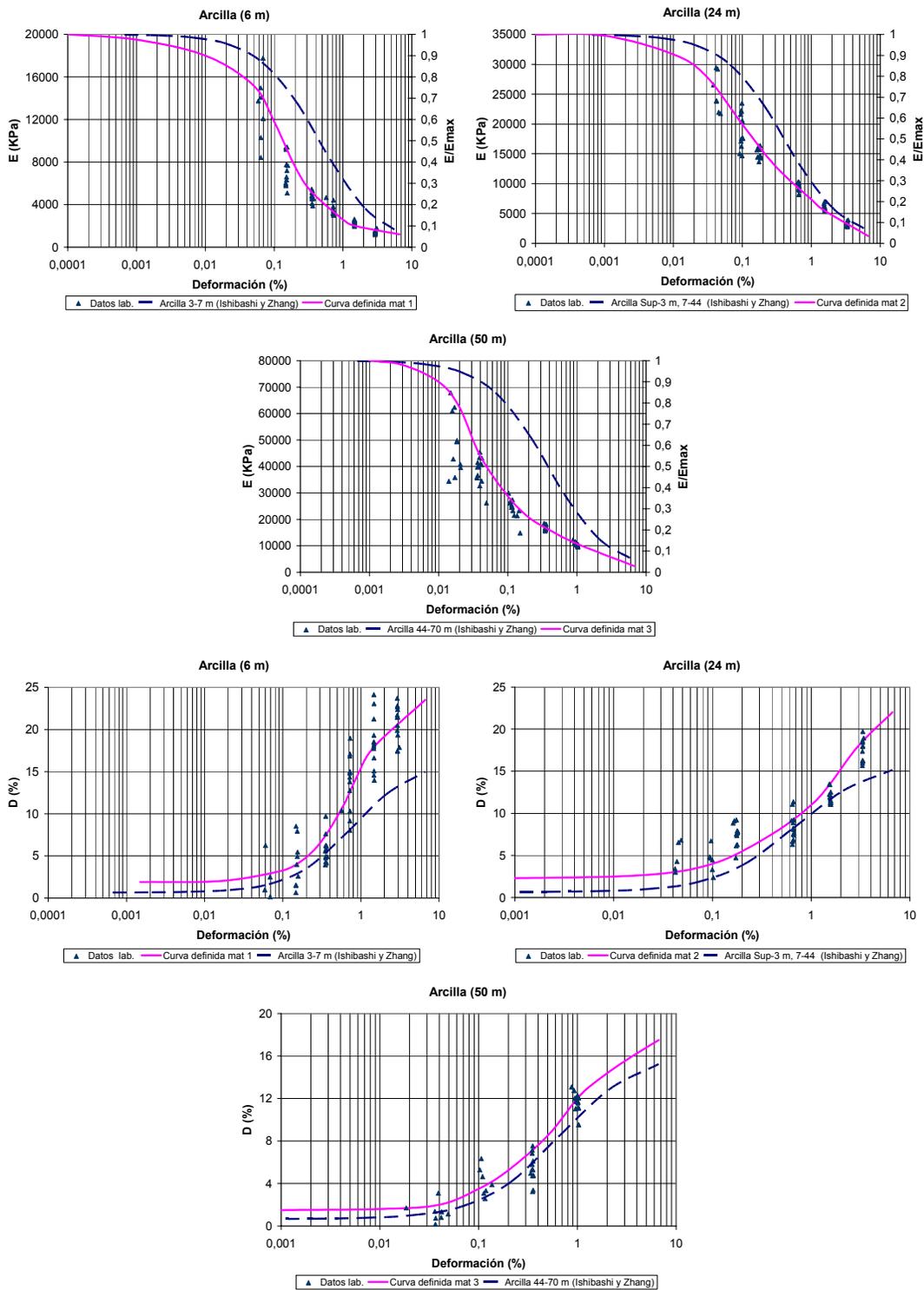


Figura 7 – Resultados de ensayos triaxiales cíclicos a tres profundidades en la zona 3. Se indican a trazos las curvas obtenidas por medio de las expresiones de Ishibashi y Zhang, 1993.

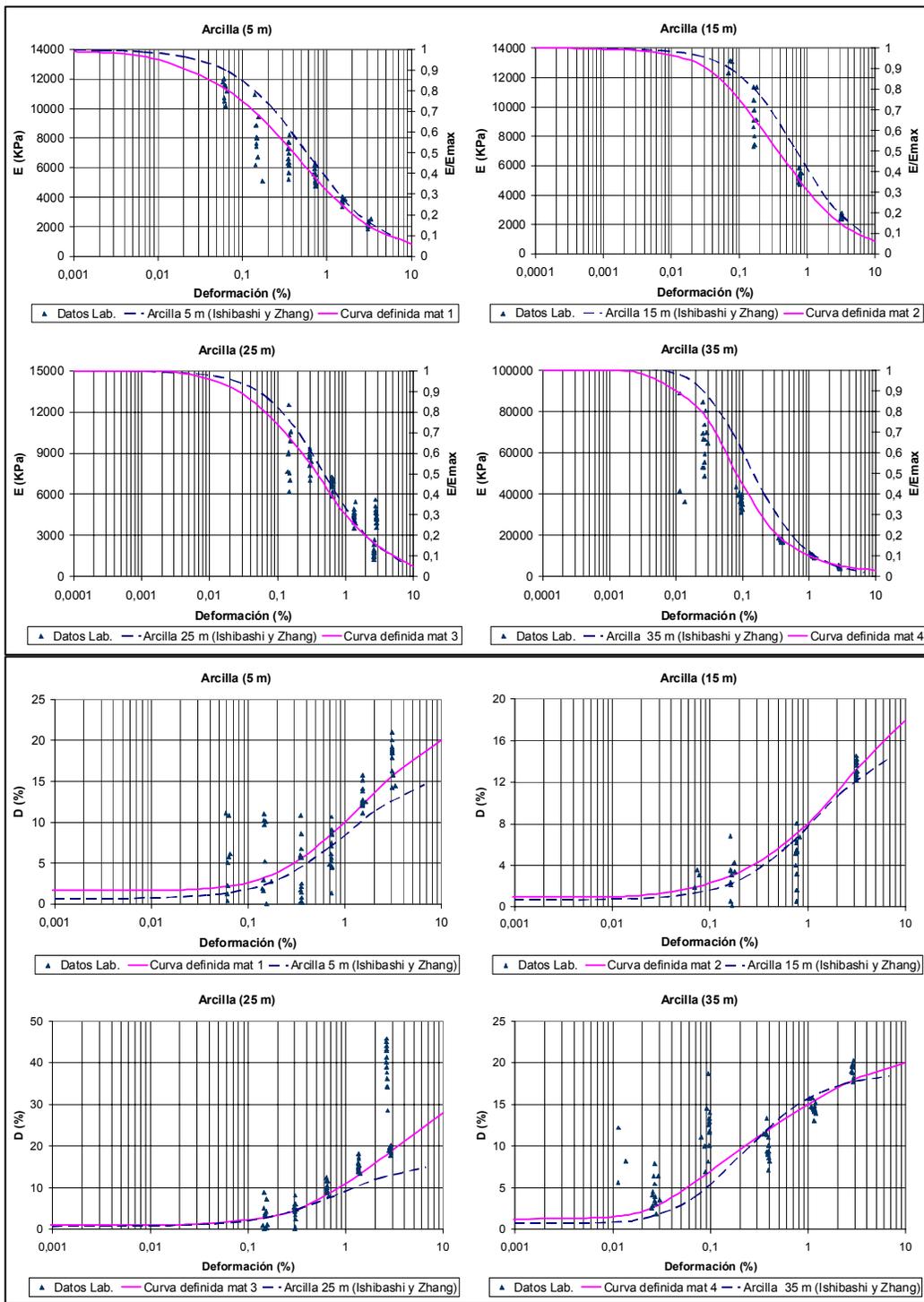


Figura 8 – Resultados de ensayos triaxiales cíclicos a cuatro profundidades en otro sitio de la zona 3. Se indican a trazos las curvas obtenidas por medio de las expresiones de Ishibashi y Zhang, 1993.

5 - CONCLUSIONES

Se presentan análisis de resultados típicos de ensayos triaxiales cíclicos y de velocidad de onda de corte medida en el terreno mediante ensayos de down hole en la ciudad de Bogotá.

Al examinar el comportamiento de los suelos en los sitios analizados se puede ver como van variando las propiedades de los materiales en función de la distancia con respecto a los bordes de la cuenca de sedimentación. Esto es debido a la variación en la energía de depositación que se ve reflejada en mayores relaciones de vacíos y menor rigidez. En el depósito se encuentran tres niveles característicos de suelos correspondientes a los suelos desecados superficiales, los suelos lacustres de la formación Sabana y los suelos aluviales arenosos de la formación Subachoque. Estos presentan valores típicos de VS que varían con el esfuerzo de confinamiento y variaciones locales relacionadas con variaciones climáticas y efectos volcánicos durante el proceso de formación.

El análisis de la variación de los valores de VS en el terreno muestran una muy clara correlación con los parámetros de composición (índice de plasticidad) y estado (relación de vacíos), de acuerdo con lo esperado a partir de la información reportada en la literatura.

La experiencia en la realización de ensayos dinámicos en el laboratorio de suelos de la Universidad Javeriana muestra que los rangos de variación de los datos de módulo de elasticidad y de relación de amortiguamiento para valores iguales de deformación inducen una incertidumbre en la asignación de las curvas dinámicas del perfil de suelos de un sitio. La comparación con datos reportados en la literatura (Ishibashi y Zhang, 1993) muestra que las tendencias de comportamiento evaluadas en los suelos del perímetro de la cuenca de la Sabana, que son relativamente rígidos y de origen predominantemente aluvial o de abanicos de depositación en el lago de la Sabana son similares a los reportados en la literatura. Los suelos más blandos de origen lacustre, en los que se tienen limos y arcillas, con horizontes muy orgánicos y con aporte de cenizas volcánicas presentan diferencias con lo esperado a partir de ensayos realizados en otros suelos. Estos suelos blandos presentan una estructura y composición particulares, que pueden ser la razón de las diferencias. Estas diferencias también pueden estar relacionadas con el proceso de muestreo y ensayo. Los resultados obtenidos al hacer ensayos con un procedimiento adecuado, sobre muestras razonablemente buenas, son muy similares a los reportados en la literatura, y dado que se han evidenciado limitaciones en las muestras y procedimientos de ensayo, se puede concluir que el comportamiento dinámico de los suelos de Bogotá no es significativamente diferente que los reportado en la literatura para otros suelos teniendo en cuenta su plasticidad, estado y niveles de esfuerzos. Por otra parte obtener buenos resultados en los ensayos dinámicos de laboratorio es muy difícil. Por lo tanto para efectos prácticos siempre es recomendable tomar como referencia los valores reportados en la literatura y tener en cuenta la variabilidad intrínseca en estos datos. También se hace evidente la necesidad de obtener mejores muestras y realizar los ensayos de manera muy cuidadosa y oportuna.

6 - REFERENCIAS

- Berre T., Bjerrum, L. (1973). Shear strength of normally consolidated clays. 8th Intl. Conf on Soil Mech. And Found. Eng., Moscú, Vol 1, p 39-49.
- Dobry, R., Vucetic, M. (1987). Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits. Proceedings. International symposium on geotechnical engineering of soft soils 2, 51 – 87.

- Hardin, B.O., and Black, W. L., (1968) “Vibration Modulus of normally Consolidated Clay”. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 94 SM2.
- H-MV Ingenieros Ltda. (2003) Estudio De Actualización Del Plan Maestro De Alcantarillado De La Cuenca Del salitre informe Técnico - Producto 6 – Tecn-969001-Ar – Versión 01 - Análisis De Riesgo Sísmico Red Troncal De Alcantarillado De La Cuenca Del Salitre. Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.
- Ingeominas, 2004, Aspectos Geoambientales de la Sabana de Bogotá, Publicación No. 27
- Ingeominas y UniAndes (1997) Microzonificación sísmica de Santa Fé de Bogotá; publicaciones Ingeominas; Santa Fé de Bogota; Ministerio de Minas y Energía (MZSB,1997)
- Ishibashi, I., and Zhang, X. (1993). Unified dynamic shear moduli and damping ratios of sand and clay. *Soils and Foundations* 33:1, 182-191.
- Kokushu, T. (1980) “Cyclic triaxial test of dynamic soil properties for wide strain range”. *Soils and Foundations* 20:2, 45-60.
- Kokushu, T. (1987) “In situ dynamic soil properties and their evaluation”. *Proceedings of the 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kyoto, Vol. 2, pp. 215-435.*
- Leroueil, S., (2001), Natural slopes and cuts: movement and failure mechanisms, *Geotechnique* 51, No. 3, 197-243
- Lowe Jhon, (1975) Capítulo 1 de *Foundation Engineering Handbook*, Winterkorn H., Fang H., eds.. Van Nostrand Reinhold Co.
- Mesri G., Ajlouni M.A., (1997) Discussion Viscous behaviour of soil under oedometric conditions. *Canadian Geotechnical Journal*. 34(1), p159-161
- Mitchell J.K., Campanella R.G., and Singh A., (1968) Soil creep as a rate process. *J. Soil Mech. And Found. Div. ASCE*, 231-253
- Moreno, C. A., Rodríguez, E. (2004). Dynamic behavior of Bogota’s subsoil peat and its effect in seismic wave propagation. 13th World Conference on Earthquake Engineering.
- Rodríguez, E. (2002). Espectros de respuesta para suelos blandos de Bogotá a partir de estudios recientes de respuesta local. IX Congreso Colombiano de Geotecnia, Noviembre de 2002, Medellín.
- Rodríguez, J. A. (2005a). Comportamiento Dinámico de Suelos Blandos de Bogotá. Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Novenas Jornadas.
- Rodriguez, J.A., (2005b) Yielding and stress strain relationships for Bogotá clays. 16th Intl. Conf. On Soil Mech. And Found. Eng. Osaka.
- Rodríguez, J.A., Escallón, J.P., (2006). Evaluación de las Propiedades Dinámicas a Bajas Deformaciones de los Suelos de Bogota. *Revista Escuela Colombiana de Ingeniería (en proceso)*.
- Toro D., (2004) “Comportamiento mecánico de una arcilla típica de la Sabana de Bogotá en condiciones no drenadas”, Tesis de Grado en Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.
- Vladimir Torres V., Vandenberghe, J., Hooghiemstra, H. (2005), An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogotá basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 226 127– 148