

Procedimiento metodológico para aplicar la geofísica a estudios geotécnicos en la ciudad de Luanda, Angola

Methodological procedure for applying geophysics to geotechnical studies in Luanda city, Angol

María Amelia Pereira de Barros da Silva¹, Héctor Manuel Fernández Núñez², João Júnior Baptista³, Gabriela Jeremías Pereira Teixeira Pires⁴

¹Facultad de Ciencias de la Universidad Agostinho Neto, Luanda, Angola, mely-barros@hotmail.com

²Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana, Cuba, hector@civil.cujae.edu.cu

³Facultad de Ciencias de la Universidad Agostinho Neto, Luanda, Angola, Joao.baptista@segeo.org

⁴Facultad de Ciencias de la Universidad Agostinho Neto, Luanda, Angola, gabrielapires@hotmail.com

Resumen

Se evaluó el uso del análisis de ondas superficiales en sus variantes activa y pasiva que, conjuntamente con la sísmica de refracción somera, permite determinar parámetros dinámicos a partir de las velocidades transversales y longitudinales obtenidas de los métodos sísmicos. Por primera vez, a partir del comportamiento de las velocidades de las ondas sísmicas, se logra caracterizar los suelos de Luanda, y se demuestra que un complejo de métodos sísmico conformado con la sísmica de refracción somera y el análisis multicanal de ondas superficiales en su variante 2D MASW permite obtener mayor continuidad en la caracterización geotécnica de los suelos.

Palabras clave: ensayos geotécnicos; parámetros dinámicos; sísmica de refracción somera; análisis multicanal de ondas superficiales.

Abstract

The use of the surface wave's analysis in its passive and active variants was jointly assessed by the shallow seismic refraction. It allows determining

dynamic parameters from the longitudinal and transverse velocities, obtained from seismic methods. For the first time, based on the performance of seismic wave velocities, the soils of Luanda city in Angola are characterized and it is demonstrated that a group of seismic methods formed with the multichannel analysis of surface waves and the shallow seismic refraction in its variant 2D MASW, allows greater continuity in the geotechnical characterization of soils.

Keywords: geotechnical tests; dynamic parameters; shallow seismic-refraction; multichannel analysis of surface waves.

1. INTRODUCCIÓN

La demanda de estudios geotécnicos en la ciudad de Luanda ha crecido con la proliferación de nuevas obras de infraestructura y sociales, lo que requiere de una mayor rapidez y eficiencia en estos estudios para que las empresas que realizan las investigaciones consigan ofrecer un servicio de calidad.

Luanda solo cuenta con la carta geotécnica de Horta-da Silva y Gomes-Teixeira (1973) como única cartografía importante que resume los estudios de suelos de la ciudad realizados antes de esa fecha. El citado documento considera las principales zonas geotécnicas de la ciudad y describe e indica algunas de sus propiedades mecánicas más importantes. No obstante, en la actualidad el procedimiento estándar consiste en realizar ensayos geotécnicos in situ, principalmente los ensayos de penetración estándar (SPT) y, en menor medida, el ensayo de penetración de cono (CPT) y el ensayo con el penetrómetro dinámico ligero (DPL). El empleo de la geofísica es prácticamente nulo, solo limitado a estudios hidrogeológicos.

El objetivo de esta investigación fue proponer, en las condiciones geológicas de la ciudad de Luanda, un procedimiento metodológico para los estudios geotécnicos, basado en los métodos de análisis de las ondas superficiales, especialmente en su variante activa: el análisis multicanal de ondas superficiales, más conocido por siglas en inglés MASW (*Multichannel Analysis of Surface Waves*).

Las técnicas activas (Park 1995) han sido introducidas a estudios geotécnicos (Miller *et al.* 1999, 2000; Park *et al.* 2000, 2001; Park, Miller y Miura 2002), así como sus variantes pasivas conocidas como sísmica de refracción de microtemblores (REMI) o MAM (*Microtremor Array Measurements*), desarrolladas por Louie (2001) y actualmente expandidas a nivel mundial para su uso en estudios geotécnicos en las ciudades (Aguirre,

Rodríguez y Vázquez 2017; Galvez 2014; Gamal y Pullammanappallil 2011; Pérez, Mateo y Maciá 2013; Raines *et al.* 2011; Sauvin *et al.* 2016).

Para probar la metodología geofísica se revisaron informes geotécnicos a fin de identificar lugares en la ciudad con características geotécnicas comunes en las condiciones geológicas de la urbe. Debido a que las empresas no planifican estudios geofísicos en la etapa de prospección, no fue posible realizar las investigaciones geotécnicas y geofísicas simultáneamente. A partir de la revisión de los informes se identificó un área que, por la cantidad y densidad de ensayos geotécnicos realizados, así como por las condiciones del terreno, permitían la realización de trabajos geofísicos

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Localización y características del área

El área de estudio está ubicada en la ciudad de Luanda (Figura 1). El objetivo de la obra es la construcción del pabellón de los deportes, conocido como Arena.

La prospección geotécnica planificada incluyó los ensayos de penetración estándar (SPT) y el ensayo con el penetrómetro dinámico ligero (DPL) manual, como se observa en la Figura 1. En total se ejecutaron 30 SPT y 23 DPL, por lo que la información geotécnica fue suficiente para validar la efectividad de los métodos geofísicos.

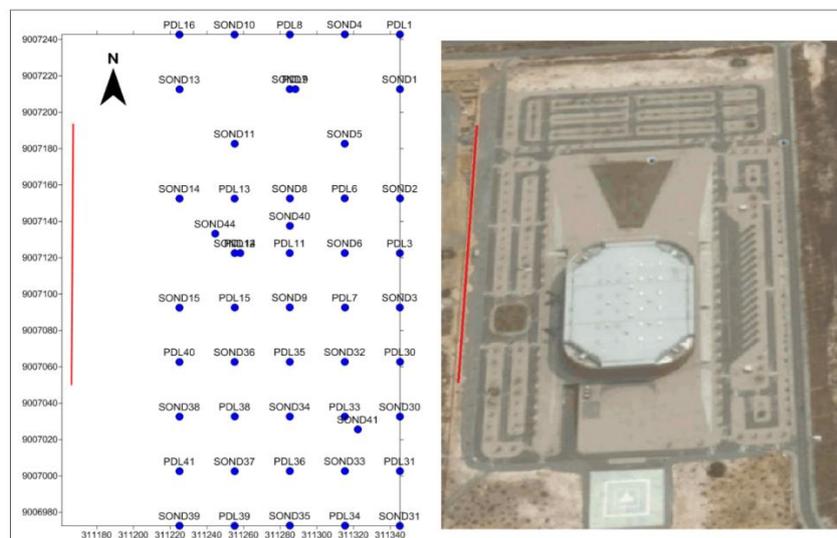


Figura 1. Área de estudio y localización del perfil geofísico con los ensayos geotécnicos.

2.1.1. Geología

La geología de Luanda está relacionada con la evolución de la cuenca sedimentaria del Kwanza. El final del Cretácico quedó marcado como el inicio de un nuevo ciclo sedimentario, el cual comenzó con una transgresión en el Cenomaniano/Turoniano que se prolongó hasta el Maestrictiano, durante el Senoniano. En el paso hacia el Terciario pudo haber ocurrido una regresión en el Daniano, seguidamente ocurrió otra transgresión durante el Eoceno y el Oligoceno, conocida como "Transgresión Numulítica". Los sedimentos son constituidos por capas espesas de margas, arcillas y calcáreos. El Mioceno correspondió al último ciclo de sedimentación y al final de este periodo ocurrió una nueva transgresión que se prolongó hasta el Plioceno con un nuevo ciclo sedimentario, donde se depositaron arenas, sílices y arcillas de la formación Luanda; este ciclo se extendió hasta el Pleistoceno donde la deposición fue generalmente arenosa.

2.1.2. Características geotécnicas

Aunque en la ciudad existen otras formaciones serán solamente tratadas aquellas presentes en el área investigada: La formación Quelo y la formación Luanda.

La formación Quelo es la más extensa y conocida de la ciudad, ya que aflora en gran parte de esta. Está constituida por arenas y sílices con características bastante homogéneas, aunque estos materiales presentan espesores muy variables que varían desde pocos centímetros hasta más de 15 m, debido a que yacen sobre una superficie muy irregular.

La formación Luanda típicamente está constituida por depósitos con litologías muy diversas (calcáreos, arcillas, arenas de diferentes granulometrías y granos de sedimentación) con espesores muy irregulares en sentido horizontal y vertical (Figura 2).

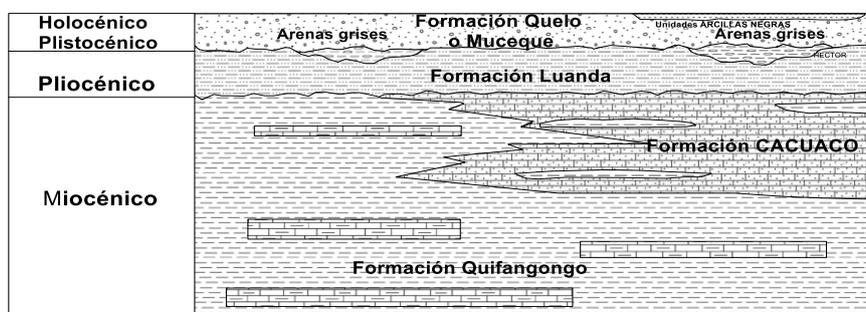


Figura 2. Perfil geológico esquemático de la ciudad de Luanda.

Del informe geotécnico de se determinaron tres unidades geotécnicas (Figura 3) conformadas por:

- C1- Terreno superficial arenoso y arenas finas a medias, arcillosas o ligeramente arcillosas, medianamente compactas (NSPT entre 11 y 29);
- C2- Arenas finas a medias arcillosas o ligeramente arcillosas compactas (NSPT entre 30 y 56);
- C3- Arenas finas a medias ligeramente arcillosas muy compactas (NSPT > 60).

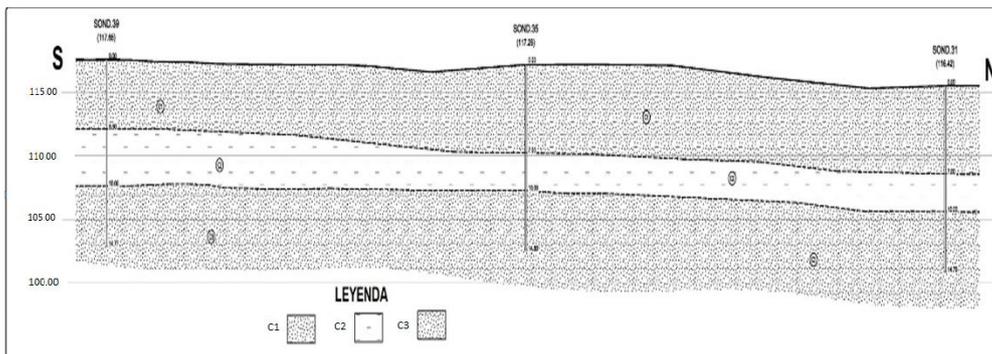


Figura 3. Perfil geotécnico interpretado del área de estudio. Modificado de Teixeira-Duarte (2012).

2.2. Metodología

Los datos de la prospección geotécnica fueron procesados utilizando técnicas de representación tridimensional para su interpretación. Para realizar esta tarea se confeccionó una base de datos con los resultados de cada sondeo de SPT que incluyó la profundidad, número de golpes (N_{SPT}), DPL, la descripción litológica y la clasificación geotécnica. Los datos organizados de esta forma permitieron confeccionar diferentes tipos de voxel (Figura 4), utilizando distintos métodos de interpolación para estimar los parámetros entre los diferentes sondeos; siendo el método del inverso a la distancia el que mejor resultados ofreció. Se pudo constatar que esta forma de visualización es muy efectiva para lograr una correcta interpretación con respecto a la información puntual que ofrecen los sondeos, no obstante, estas herramientas matemáticas, dada la distribución entre los pozos, no logran hacer estimaciones adecuadas en la distancia media entre los mismos.

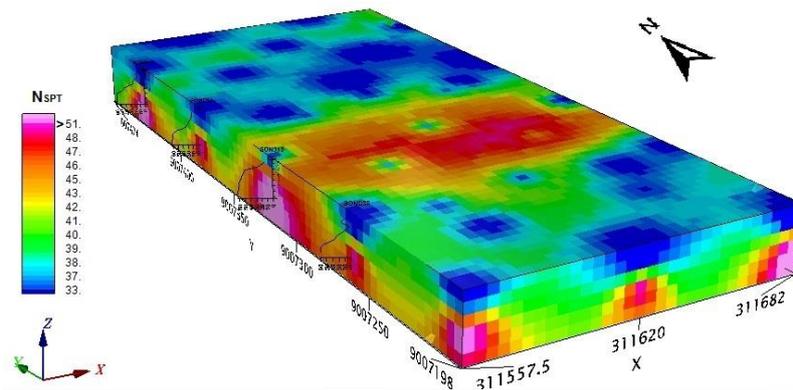


Figura 4. Voxel confeccionado con los valores de N_{SPT} .

Para poder comparar mejor los resultados de la geofísica se escogió el perfil de pozos más cercano, donde se hicieron los trabajos geofísicos y se graficaron e interpolaron los valores de N_{SPT} , comprobándose que existen dificultades en estimar los valores intermedios entre los pozos.

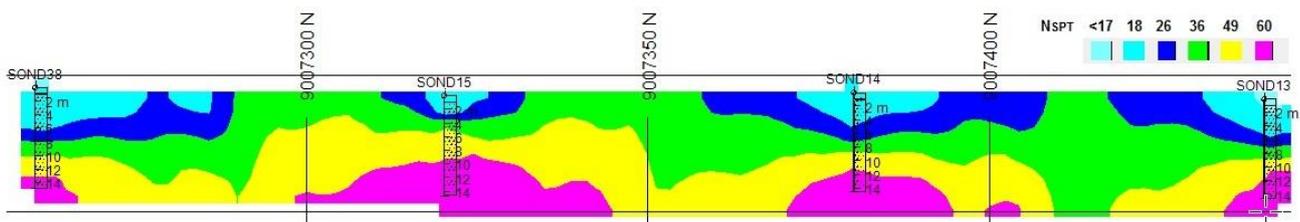


Figura 5. Valores de N_{SPT} en el perfil de sondeo paralelo a los perfiles geofísicos.

2.2.1. Ensayos geofísicos

Una vez recopilada la información geológica, geotécnica y topográfica del área se planificaron los trabajos de campo con el objetivo de ensayar diferentes metodologías de adquisición; para esto se conformó un complejo de métodos geofísicos, resultado también del análisis bibliográfico que evidenció que los métodos eléctricos y sísmicos son los más empleados en los estudios geotécnicos.

El complejo de métodos geofísicos empleado estuvo compuesto por:

- Método de refracción sísmica
- Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D y 2D)
- Sísmica de microtemblores (REMI o MAM).

Método de refracción sísmica

Los parámetros de adquisición para este método se planificaron basados en el corte areno-arcilloso que existe en esta localidad, que fueron estudiados

durante los ensayos de SPT (Figuras 3 y 5); además se consideró las profundidades someras de las capas geológicas y la alta variabilidad de la capa de arena más superficial que en ocasiones se mostraba muy compacta y en otras muy suelta. Por otro lado, en algunas regiones del área de estudio se observaba material de relleno compuesto también por arenas finas muy sueltas, que en su conjunto provocan mucha absorción de la energía, imposibilitando el estudio de las capas más profundas.

Por tal motivo se planificaron los siguientes trabajos sísmicos:

| | |
|-----------------------------------|---|
| Rumbo de las líneas sísmicas: | S-N |
| Número de líneas sísmicas: | Una línea |
| Distancia entre tendidos: | 5 m. Se pretendió hacer un seguimiento continuo de los refractores de interés sin dejar intervalos sin registrar y tampoco que existiera mucho solapamiento |
| Distancia entre receptores: | 3 m |
| Distancia fuente-primer receptor: | 1,5 m; 3 m y 5 m |
| Duración de registro: | 100 ms (se obtuvo mediante registro de pruebas, al mantener la fuente fija e ir alejando los tendidos de geófonos) |
| Intervalo de muestreo: | 0,25 ms |
| Tipo de fuente sísmica: | Percusión (martillo de 8 kg) |

El área es fuente de mucho ruido sísmico al estar cerca de una avenida y de dos generadores de electricidad, por lo que los tendidos sísmicos tuvieron en cuenta estos aspectos para su ubicación. También se pudo comprobar que en la zona de los trabajos se habían hecho movimientos y compactación de los suelos producto de las obras de construcción, lo que provoca una atenuación mayor de las ondas.

Se realizaron las mediciones de los tiempos de llegada de las ondas y se estudiaron particularmente las ondas longitudinales (P) en sus primeras llegadas, que es lo típico para este tipo de trabajos.

Métodos de las ondas superficiales

Los métodos de ondas superficiales pueden ser clasificados según el tipo de fuente utilizada en activos y pasivos, aunque puede existir una variante donde se combinan ambos. El método activo utiliza una fuente para generar

las ondas, muy similar a la refracción sísmica, incluido el arreglo de los receptores; su principal limitación es la profundidad de estudio debido a la dificultad de generar energías de bajas frecuencias. Las técnicas fundamentales que se recogen en la bibliografía consultada son los métodos de análisis espectral de ondas superficiales (SASW por sus siglas en inglés), el otro método es el análisis multicanal de ondas superficiales o MASW, los de fuentes pasivas utilizan los ruidos ambientales y microtemblores, generalmente se conocen por sus siglas en inglés MAM o REMI.

Los pasos fundamentales de los métodos de ondas superficiales (MOS) según De Lucena (2016) y Strobbia (2003) consisten en: Adquisición, Procesamiento e Inversión (Figura 6).

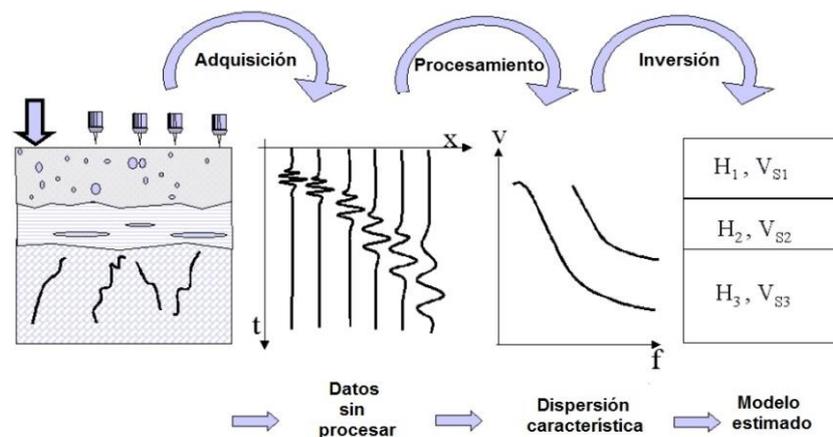


Figura 6. Pasos para los métodos de ondas superficiales. Modificado de Strobbia (2003).

Adquisición

Los parámetros de adquisición están adaptados a las profundidades someras que se necesitan estudiar para las investigaciones geotécnicas, que en este caso no sobrepasaban los 40 m de profundidad, aunque los ensayos de SPT no sobrepasaron los 20 m en esta área.

Para este trabajo se experimentó con una metodología de adquisición que permitió hacer ambas técnicas, utilizando el mismo arreglo de geófonos; para esto se tuvieron en cuenta diferentes aspectos:

Adquisición de los datos 1D MASW

- Puesta sísmica de longitud $L=69$ m tal que $L=2H$ (siendo la profundidad de estudio alrededor de los 20 m)
- Distancia entre canales: 3 m

- Receptores verticales: 14 Hz (el recomendado es de 4,5 Hz)
- Tiros directo e inverso con distancia *offset* del 10 % hasta el 20 % de la longitud L del tendido. Fue utilizado 14 y 7 m
- Intervalo del muestreo: 0,5 ms
- Longitud del registro: de 1 a 2 s.

El modelo de velocidades transversales con la profundidad referido al centro del arreglo se obtuvo a partir del diagrama de dispersión, del cual se obtiene la curva de dispersión. Se observa, de manera general, cómo la velocidad V_s crece con la profundidad donde se encuentran las arenas más compactas (Tabla 1).

Tabla 1. Valores estimados de V_s

| Profundidad (m) | V_s (m/s) | V_p (m/s) |
|-----------------|-------------|-------------|
| 0,00 | 315,26 | 1 641,22 |
| 1,07 | 315,00 | 1 640,99 |
| 2,31 | 316,56 | 1 642,96 |
| 3,71 | 314,68 | 1 641,20 |
| 5,27 | 323,41 | 1 650,95 |
| 7,01 | 336,53 | 1 665,08 |
| 8,90 | 344,63 | 1 673,28 |
| 10,96 | 349,29 | 1 677,55 |
| 13,19 | 353,42 | 1 681,35 |
| 15,58 | 356,48 | 1 684,19 |
| 18,13 | 358,40 | 1 685,99 |
| 20,85 | 359,40 | 1 686,96 |
| 23,74 | 359,82 | 1 687,40 |
| 26,79 | 360,00 | 1 687,61 |
| 36,43 | 360,00 | 1 687,61 |

Adquisición de los datos 2D MASW

- Profundidad H de investigación entre $L/4$ y $L/2$
- Distancia entre canales sugeridas 1,5 m a 3 m
- Puntos golpe: punto medio entre canales. Primero y último punto con igual paso pero fuera del tendido

- Intervalo del muestreo: 0,5 ms
- Longitud del registro: 1 s.

Se obtuvo el modelo (Figura 7) de velocidades transversales con la profundidad a lo largo de todo el perfil de estudio a partir de las curvas de dispersión, observándose de manera general las variaciones en la lateral de V_s .

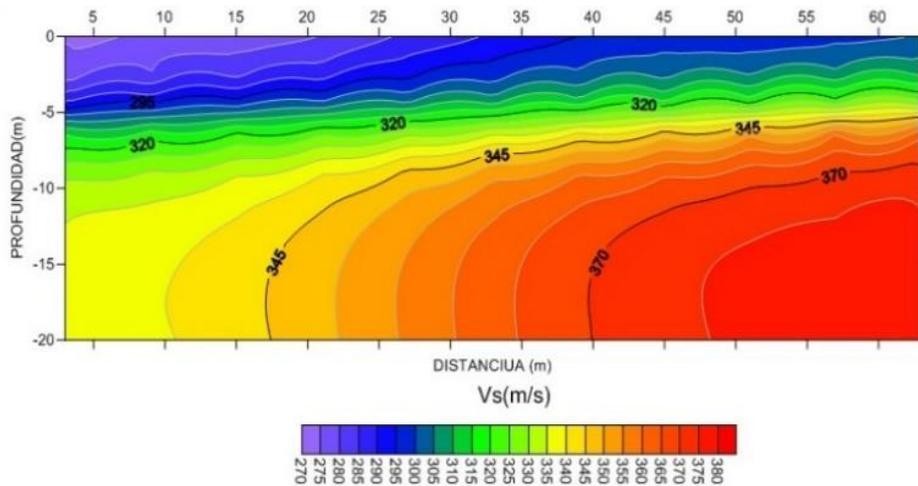


Figura 7. Modelo 2D de velocidades (V_s) a partir del método análisis multicanal de ondas superficiales en su variante 2D MASW.

Adquisición de los datos MAM Longitud puesta \geq profundidad interés

- Puestas: lineal
- Distancia entre canales: 3 m
- Fuente pasiva (ruido ambiental)
- Intervalo del muestreo: 2 ms
- Cantidad de registros: 20
- Longitud del registro: 32 s.

Para el procesamiento y la interpretación se utilizó el procedimiento siguiente: a partir del diagrama de dispersión se obtiene la curva de dispersión y luego el modelo de velocidades transversales V_s con la profundidad referido al centro del arreglo utilizado. Se observa, de manera general, cómo la velocidad V_s crece con la profundidad donde se encuentran las arenas más compactas; no obstante, los valores de velocidad obtenidos no están acorde al corte areno-arcilloso del área de estudio por lo que este método no ofreció los resultados esperados (Tabla 2).

Tabla 2. Velocidades estimadas

| Profundidad (m) | Vs (m/s) | Vp (m/s) |
|------------------------|-----------------|-----------------|
| 0,00 | 117,69 | 1 421,56 |
| 1,07 | 118,08 | 1 422,11 |
| 2,31 | 129,99 | 1 434,76 |
| 3,71 | 137,50 | 1 442,90 |
| 5,27 | 145,91 | 1 451,89 |
| 7,01 | 148,72 | 1 454,43 |
| 8,90 | 150,14 | 1 455,71 |
| 10,96 | 149,49 | 1 455,13 |
| 13,19 | 147,56 | 1 453,41 |
| 15,58 | 145,59 | 1 451,64 |
| 18,13 | 144,37 | 1 450,53 |
| 20,85 | 144,11 | 1 450,27 |
| 23,74 | 144,71 | 1 450,79 |
| 26,79 | 145,89 | 1 451,82 |
| 36,43 | 150,14 | 1 455,71 |

Se usaron geófonos de 14 Hz en lugar de los recomendados de 4,5 Hz, pues se comprobó que era posible separar los diferentes modos de las ondas de Rayleigh y que las velocidades de las ondas transversales obtenidas después de la inversión estaban acorde con el corte areno-arcilloso del área de estudio. Se ha reportado que es posible usar estos geófonos en lugar de los de 4,5 Hz. En GEOMETRICS (2017) se plantea que si se usan geófonos de 14 Hz en vez de 4,5 Hz para investigaciones con el método de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW) y/o *Microtremor Array Measurements* (MAM), la respuesta estará entre 14 y 4,5 Hz por debajo de la curva de sensibilidad de los geófonos de 14 Hz.

Según Rosa (2013), la viabilidad de un sensor para trabajar con frecuencias claramente menores que su frecuencia natural de corte dependerá del ruido instrumental del conjunto registrador digitalizador y, especialmente, de la energía del ruido registrado por el propio arreglo de geófono. De hecho, si dicha energía es elevada para las frecuencias que se desean muestrear, entonces incluso con la limitación de los sensores de 10 Hz es posible captar parte de esa energía y obtener buenos resultados. Por este motivo es preciso realizar un estudio previo sobre el nivel de ruido registrado por el

arreglo. Para ello se propone comparar las funciones de densidad espectral (PSD) de los registros normalizados para los sensores de 1 Hz y los geófonos de 10 Hz.

Louie (2001) afirma que para estudios de microtemblores, configuraciones con geófonos verticales de 8 Hz a 12 Hz permiten obtener velocidades de fases tan bajas como de 2 Hz y tan altas como de 26 Hz. Esto permite realizar un análisis de las ondas transversales hasta profundidades de 100 m.

Al-Heety y Al-Saigh (2014) utilizan geófonos de 10 Hz para las mediciones conjuntas de la refracción y del MASW. Este último permitió obtener la velocidad de las ondas transversales con excelente calidad y así estimar algunos parámetros dinámicos de los suelos. Pasquet y otros investigadores (2015) comentan que el uso de geófonos de 14 Hz para hacer mediciones conjuntas de sismica de refracción y análisis de ondas superficiales ofrece un buen compromiso para obtener el rango de frecuencias deseado. Para lograr buenos resultados, las fuentes fueron colocadas a la mitad de la distancia entre geófonos, al estilo de la adquisición para el MASW 2D. La experiencia de este trabajo demostró que, con una buena metodología de adquisición, el estudio de ondas superficiales puede realizarse, incluso determinando con cierto grado de precisión el modo fundamental.

Una vez calculadas las velocidades de las ondas transversales se escogieron tres de los ensayos de SPT más cercanos al tendido sísmico y se seleccionaron los valores de estas velocidades para las mismas profundidades de los sondeos con el objetivo de correlacionarlas. El procedimiento utilizado fue el de hacer el análisis individual por pozos y, en su conjunto, los tres. Finalmente se calculó la ecuación de regresión lineal (Figura 8).

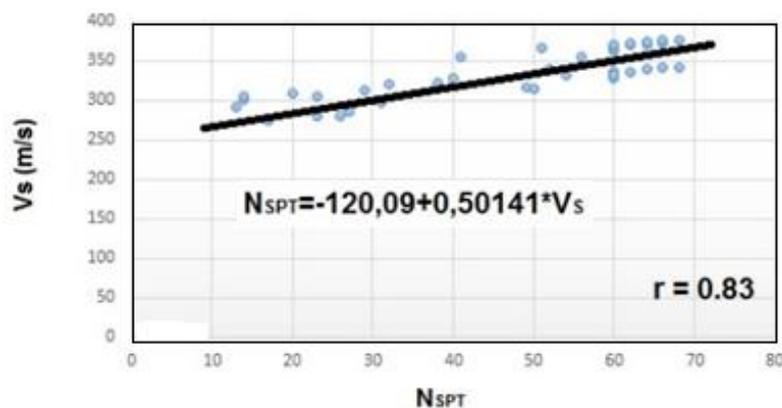


Figura 8. Correlación entre las velocidades de las ondas transversales V_s y los valores N_{SPT} .

3. RESULTADOS

3.1. Propiedades geotécnicas

Una vez obtenido el perfil de velocidades de las ondas longitudinales (V_p) y el de las transversales (V_s) se estimaron otros parámetros geotécnicos que son muy importantes para el cálculo de la capacidad portante de los suelos utilizando las siguientes expresiones matemáticas:

Módulo de Corte o Cizallamiento (G): definido como la relación entre la tensión y la deformación de corte; es una medida de la dureza del material (Figura 9).

$$G = \frac{E}{2(1+\eta)} = \delta V_s^2 \quad \delta = 0.2V_p^{0.25} \text{ (densidad del material del terreno)}$$

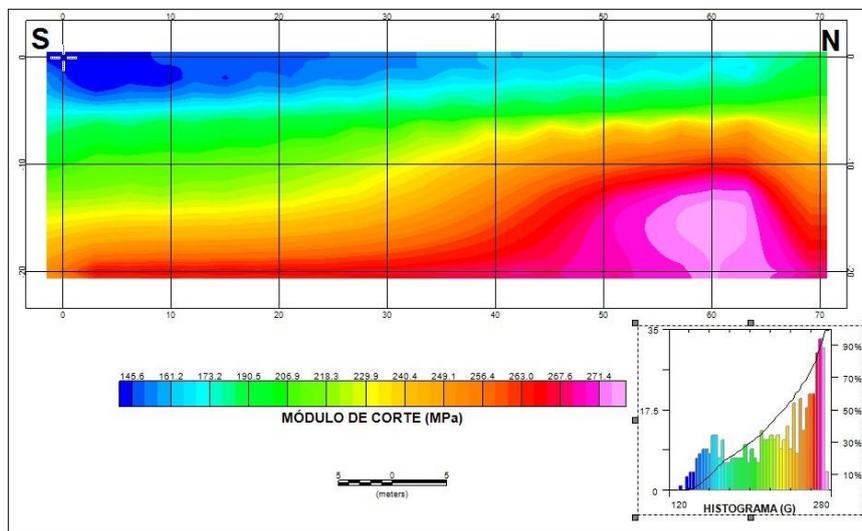


Figura 9. Perfil del módulo de corte o cizallamiento (G) calculado por los métodos sísmicos.

Coefficiente de Poisson (μ): expresa la relación entre las deformaciones transversales y longitudinales (Figura 10).

$$\eta = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)} \tag{1}$$

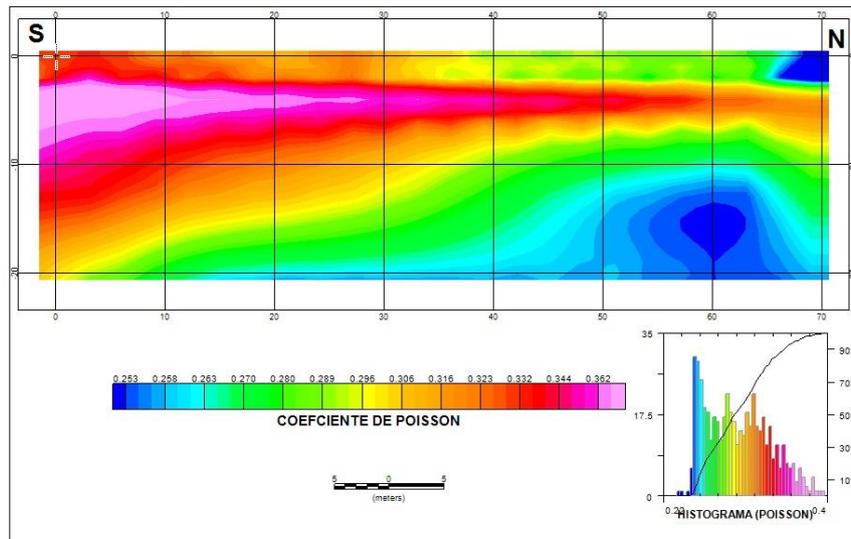


Figura 10. Perfil del coeficiente de Poisson calculado por los métodos sísmicos. *Módulo de Elasticidad o Módulo de Young (E_{din})*: representa la cantidad de esfuerzo por unidad de deformación (Figura 11).

$$E_{din} = \delta V_S^2 \left(\frac{3V_P^2 - 4V_S^2}{V_P^2 - V_S^2} \right) \tag{2}$$

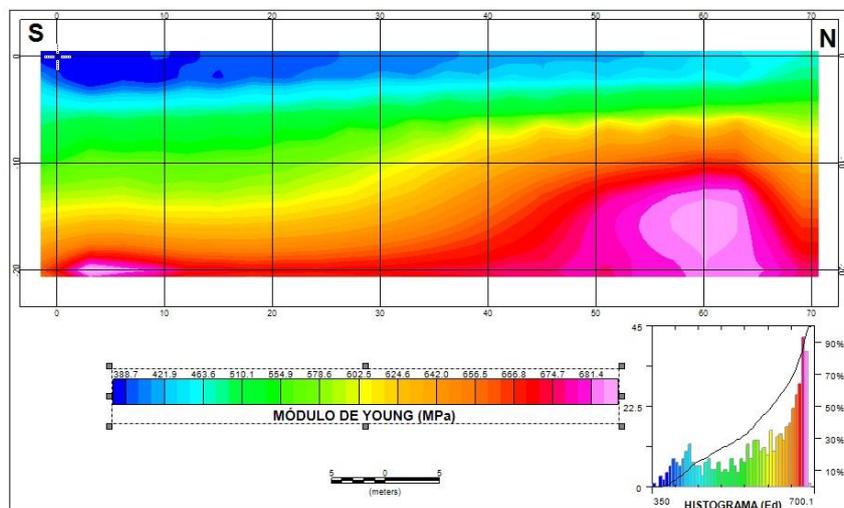


Figura 11. Perfil del módulo de Young (E_{din}) calculado por los métodos sísmicos. Se debe tener en cuenta que el módulo dinámico se diferencia del módulo de deformación, siendo de un 10 % al 15 % en las rocas duras, llegando a ser hasta 10 veces superior en los suelos sueltos, como es el caso del corte superior de los suelos de Luanda, de ahí la importancia de conocer que generalmente E_{din} > E_{def.} En Naranjo y Dranichnikov (2012) se hace un breve análisis sobre este tema y se presentan algunas de las relaciones más importantes entre ellos; en la actual investigación se asume la relación que

más se ajusta a los suelos presentes en el área de estudio que son los areno-arcillosos.

$$E_{def} = 0.09343E_{din} + 4.0 \text{ [kgf/cm}^2\text{]} \quad (3)$$

4. DISCUSIÓN

Se pudo definir que la combinación de la sísmica de refracción somera y el método 2D MASW son suficientes para caracterizar los suelos, desde el punto de vista geotécnico. La variante del 1D MASW ofrece una información muy puntual que no es suficiente para conocer cómo se distribuyen las propiedades geotécnicas en el área de estudio dado las variaciones laterales que pueden existir en estos tipos de suelos y que, de hecho, son muy comunes. Sin embargo, la variante pasiva no ofreció resultados satisfactorios debido a que se obtuvieron velocidades muy bajas que no son las típicas para estos tipos de suelos; la causa puede estar relacionada con el uso de geófonos de 14 Hz y no los de 4,5 Hz que son los recomendados para el estudio de las bajas frecuencias relacionados con las ondas Raleigh. Por otro lado, las fuentes de ruidos estaban bien localizadas pero no fue posible colocar el arreglo perpendicular, quizás se podría utilizar el método MAPS con el objetivo de obtener mejores resultados.

El empleo de los métodos sísmicos permitió caracterizar las diferentes unidades geotécnicas a partir del comportamiento de las velocidades (Figura 12). Se llega a la conclusión que la unidad C1 de los terrenos superficiales arenosos son los que menores velocidades V_p y V_s poseen, por ser los menos compactos, al estar las arenas más sueltas; le siguen, con velocidades intermedias, la unidad C2, al estar más compacta, y por último, la unidad C3 donde las arenas se encuentran en un estado de compactación muy alto. Obsérvese la variabilidad que existe en cuanto a la velocidad de las ondas transversales, lo que demuestra el alto grado de dispersión de las ondas sísmica que poseen estos suelos.

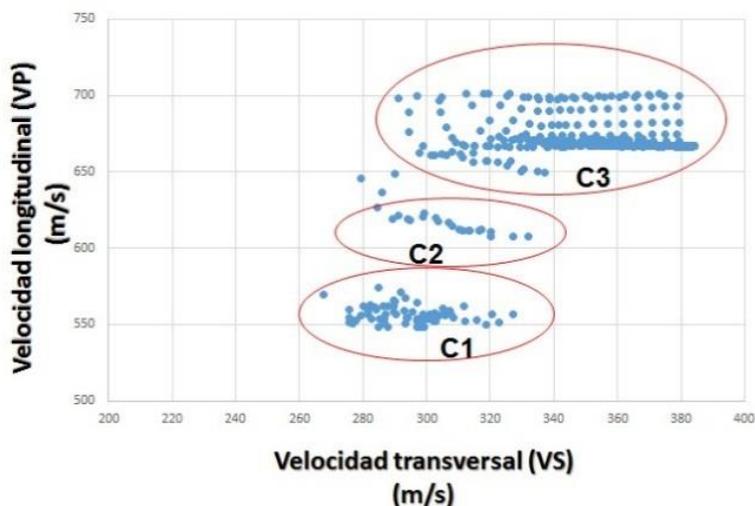


Figura 12. Relación entre las velocidades longitudinales (V_p) y velocidades transversales (V_s).

5. CONCLUSIONES

- La representación 3D y 2D de los resultados de los ensayos geotécnicos aporta mayor visualización de las características geotécnicas del área estudiada.
- El uso combinado de la sísmica de refracción somera y el método 2D MASW es suficiente para caracterizar los suelos desde el punto de vista geotécnico y asegura mayor continuidad de la información obtenida con respecto a los ensayos geotécnicos convencionales.
- Por primera vez la caracterización geotécnica de los suelos de Luanda se obtiene a partir del comportamiento de las velocidades de las ondas sísmicas.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a Sasscal (*Southern African Science Service Centre Sea Climate Change And Adaptive Land Use*) por la financiación del equipo y algunas actividades para el desarrollo de este trabajo.

7. REFERENCIAS

- Aguirre, J.; Rodríguez, M. y Vázquez, R. 2017: *Sísmica de dispersión de ondas superficiales usando ruido sísmico. Siete mediciones en el Estado de Colima, México*. Universidad Nacional Autónoma de México, México, D. F.
- Al-Heety, A. y Al-Saigh, N. 2014: Seismic refraction tomography and MASW survey for geotechnical evaluation of soil for the teaching Hospital Project at Mosul University. *Journal of Zankoy Sulaimani-Part A*, 16(1): 15.

- De Lucena, R. F. 2016: *Avaliações e testes dos métodos MASW e REMI por meio do tratamento de dados empíricos e sintéticos em um programa de processamento e inversão desenvolvido em MATLAB e sua aplicação em um problema geológico na Bacia de Taubaté*. Tesis doctoral. Universidade de São Paulo. 212 p.
- Galvez, P. 2014: *Metodología REMI "Refracción de Microtremores"*. Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso.
- Gamal, M. A. y Pullammanappallil, S. 2011: Validity of the refraction microtremors (ReMi) method for determining shear wave velocities for different soil types in Egypt. *International Journal of Geosciences*, 2(04): 530-540.
- Geometrics. 2017: Typical Equipment for MASW and MAM Surveying of the Near-Surface. Disponible en: <http://www.geometrics.com>
- Horta-da Silva, J. A. y Gomes-Teixeira, J. A. P. 1973: Carta geotécnica da região de Luanda 1.^a aproximação. *Técnica e Economia Ultramarinas*, 11(2): 91-100.
- Louie, J. N. 2001: Faster, Better: Shear-Wave Velocity to 100 Meters Depth From Refraction Microtremor Arrays. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91(2): 347-364.
- Miller, R. D.; Park, C. B.; Xia, J.; Ivanov, J. M. y Laflen, D. R. 2000: Potential of MASW to delineate fractures in the Winterset Limestone at the Johnson County Landfill, Kansas. Kansas Geological Survey. 27 p. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Julian_Ivanov/publication/237759178_Potential_of_MASW_to_Delineate_Fractures_in_the_Winterset_Limestone_at_the_Johnson_County_Landfill_Kansas/links/00b7d52a7a7b23e415000000/Potential-of-MASW-to-Delineate-Fractures-in-the-Winterset-Limestone-at-the-Johnson-County-Landfill-Kansas.pdf
- Miller, R. D.; Xia, J.; Park, C. B. e Ivanov, J. 1999: Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *The Leading Edge*, 18(12): 1392-1396.
- Naranjo, H. y Dranichnikov, T. 2013: *Cálculo de capacidad portante basado en geofísica y método convencional. El caso del puente sobre el río Maicito*. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/6133>
- Park, C. B. 1995: Characterization of geotechnical sites by multichannel analysis of surface waves. Proceedings of the 95th annual meeting Korean Ground Society. Seoul, Korea, p. 15-21.
- Park, C. B.; Ivanov, J.; Miller, R. D.; Xia, J. y Ryden, N. 2001: *Multichannel analysis of surface waves (MASW) for pavement-feasibility test*. Proceedings of the 5th SEGJ International Symposium. Tokyo, p. 25-30.

- Park, C. B.; Miller, R. D. y Miura, H. 2002: Optimum field parameters of an MASW survey. Japanese Society of Exploration Geophysics. Tokyo, Japan. Disponible en: <http://www.masw.com/files/ParkEtAl2002.pdf>
- Park, C. B.; Miller, R. D.; Xia, J. e Ivanov, J. 2000: *Multichannel seismic surface-wave methods for geotechnical applications*. Kansas Geological Survey, University of Kansas. 11 p. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Julian_Ivanov/publication/228593945_Multichannel_seismic_surface-wave_methods_for_geotechnical_applications/links/00b7d52a7a7b466dbc000000/Multichannel-seismic-surface-wave-methods-for-geotechnical-applications.pdf
- Pasquet, S.; Bodet, L.; Longuevergne, L.; Dhemaied, A.; Camerlynck, C.; Rejiba, F. y Guérin, R. 2015: 2D characterization of near-surface V P/V S: surface-wave dispersion inversion versus refraction tomography. *Near Surface Geophysics*, 13(4): 315-331.
- Pérez, C.; Mateo, M. y Maciá, A. 2013: Aplicación de tomografía de refracción sísmica y análisis de microtemores como técnicas de prospección geofísicas en estudios geotécnicos en edificación. *Informes de la Construcción*, 65(530): 203-212
- Raines, M. G.; Gunn, D. A.; Morgan, D. J. R.; Williams, G.; Williams, J. D. O. y Caunt, S. 2011: Refraction microtremor (ReMi) to determine the shear-wave velocity structure of the near surface and its application to aid detection of a backfilled mineshaft. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 44(2): 211-220.
- Rosa, S. 2013: *Estudio y optimización de técnicas basadas en ruido ambiente para la caracterización del terreno: Aplicación en el SE de la península ibérica*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. España. 243 p.
- Sauvin, G.; Vanneste, M.; L'Heureux, J. S.; O'Connor, P.; O'Rourke, S.; O'Connell, Y. y Long, M. 2016: Impact of data acquisition parameters and processing techniques on S-wave velocity profiles from MASW—Examples from Trondheim, Norway. In: Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting. Reykjavik, Islandia.
- Strobbia, C. 2003: *Surface Wave Methods Acquisition, processing and inversion*. Doctoral thesis. Politecnico Di Torino. Italy. 277 p.
- Texeira-Duarte, M. C. 2012: *Informe geotécnico Arena de Luanda, Camama*. Engenharia e Construções S. A., Luanda, Angola. 40 p.

Recibido: 11/09/17

Aceptado: 09/02/18

María A. Pereira de Barros da Silva, Facultad de Ciencias de la Universidad Agostinho Neto, Luanda, Angola mely-barros@hotmail.com