

## Evaluación del mejoramiento de suelos arena limosos con columnas de grava por medio de velocidades de ondas de corte

Pablo Sanzana (1,2); Felipe Villalobos (1); Paulo Oróstegui (2); Gonzalo Montalva (3)

(1) Laboratorio de GeoMateriales - Universidad Católica de la Santísima Concepción,  
Alonso de Ribera 2850, Casilla 297 Concepción, Chile, psanzana@magister.ucsc.cl, avillalobos@ucsc.cl

(2) OITEC Geotecnia-Hidráulica-Topografía, Lincoyan 444, Of. 309, Concepción, Chile,  
porostegui@oitec.cl, psanzana@oitec.cl.

(3) Departamento de Ingeniería Civil - Universidad de Concepción, Casilla 160-C Concepción, Chile,  
gmontalva@udec.cl

### Resumen

Se presenta un proyecto de mejoramiento de suelos limo arenosos saturado para la construcción un edificio de 18 pisos y un subterráneo en el sector Collao de Concepción. El mejoramiento elegido consiste en la construcción de columnas de grava vibradas. Se utilizan métodos geofísicos para medir la velocidad de propagación de ondas de corte  $V_s$  antes y después de realizada la mejora con columnas de grava. Al comparar los resultados de dos perfiles de  $V_s$  versus profundidad antes del mejoramiento con 15 perfiles después del mejoramiento no indican un claro aumento de  $V_s$  después del mejoramiento. Es posible que la perforación para la columna haya disminuido la rigidez del suelo y luego el vibrado de la grava si bien compacta el suelo circundante haya al mismo tiempo incrementado las presiones de poros, disminuyendo así la rigidez.

Palabras-Clave: MASW, columna de grava, velocidad de ondas de corte, mejoramiento de suelos

### Abstract

A project of soil improvement in saturated silty sand for the construction of an 18 story and one basement building in the borough of Collao, Concepción, is presented. The improvement technique chosen was the construction of vibrating stone columns. Geophysical methods are used to measure shear-wave velocity ( $V_s$ ) before and after the soil improvement with stone columns. When comparing the results of two  $V_s$  – depth profiles before the improvement with 15  $V_s$  – depth profiles after the improvement, there is no clear increase of  $V_s$  after the improvement. It is possible that the boring for the column had reduced the soil stiffness and although the gravel vibration compact the surrounded soil, at the same time pore pressures may have increase, hence reducing the soil stiffness.

Keywords: MASW, stone column, shear wave velocity, soil improvement

### 1 Introducción

En los proyectos inmobiliarios ubicados en sitios susceptibles a licuación es necesario generar una solución o mejora de suelo que impida o mitigue posibles daños en las estructuras inducidos por este fenómeno. Este estudio se realizó en un terreno ubicado en avenida Collao 750, Concepción para la construcción de un edificio de 18 pisos con un subterráneo (ver Fig. 1). Se utilizó un mejoramiento de suelos con columnas de grava para disminuir asentamientos estáticos y reducir el riesgo de licuación. Para el control del mejoramiento se realizaron prospecciones geofísicas no invasivas (MASW) mediante la detección de cambios en el parámetro  $V_s$ . Por otro lado se busca definir si  $V_s$  es un parámetro adecuado para el control del mejoramiento. El uso de técnicas

geofísicas para detectar cambios en suelos mejorados ha sido estudiado por variados autores. Jefferson et al. (2008) mostraron como el método SASW puede ser utilizado para apreciar cambios en las propiedades del suelo circundante luego de aplicado el mejoramiento de suelos con columnas de grava. Moxhay et al. (2001) y Redgers (2008) aplicaron análisis de mediciones continuas de ondas de superficie para medir la rigidez en profundidad de un suelo modificado por columnas de grava asumiendo que el suelo y la roca agregada son un bloque. Madun et al. (2010) usar columnas de “jet grouting”. Kim y Kim (1997) comprobaron la viabilidad de utilizar SASW para verificar un mejoramiento de suelos mediante compactación dinámica.

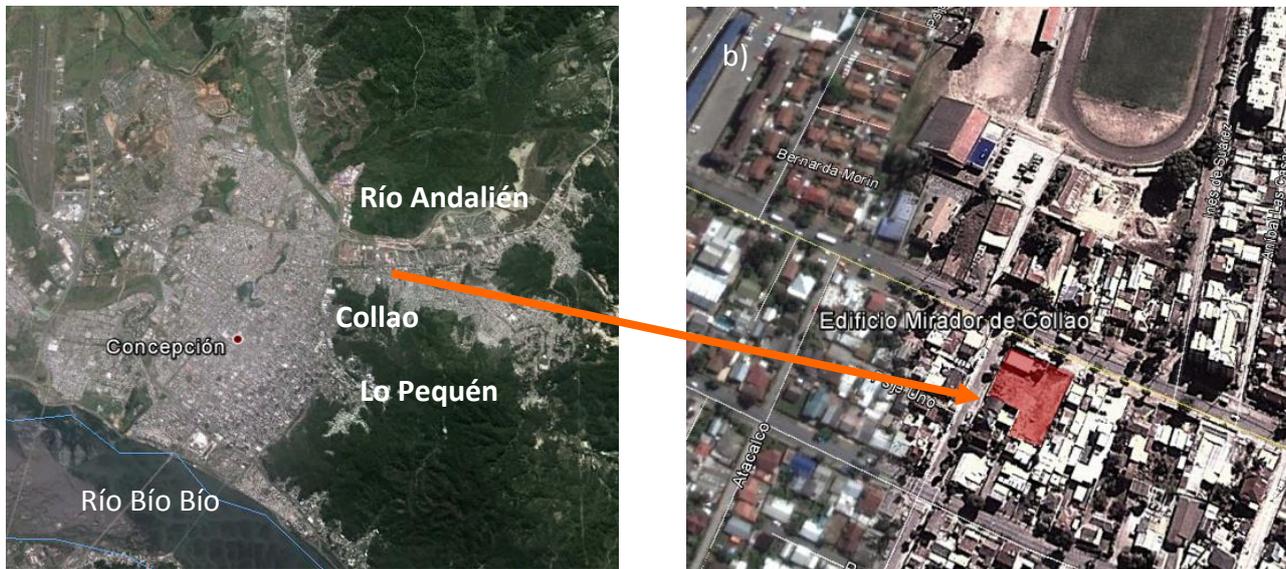


Fig. 1 – a) Ubicación general del proyecto y b) Sector de Proyecto

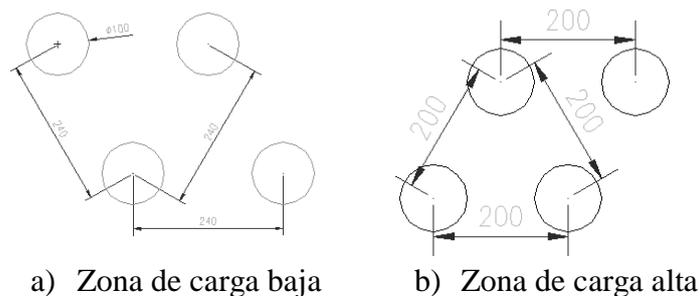
## 2 Antecedentes del mejoramiento de suelos

El mejoramiento de suelos fue realizado en base a columnas de grava mediante el método de vibrosustitución. Se construyeron 241 columnas de 1 m de diámetro y 6 m de profundidad desde la cota -4 hasta la cota -10 m (siendo 0 la cota de la calle), las cuales se ejecutaron mediante la instalación de una camisa de acero utilizando una grúa y un vibrador. Una vez instalada la camisa, se procedía a extraer el terreno dentro de la camisa con una pilotera, luego de extraído el suelo, se rellena la perforación con grava y se vibraba verticalmente la camisa generando compactación y expansión radial del relleno. Las vibraciones también generan compactación en el terreno circundante a la pila, este proceso se muestra en la Fig. 2. Una vez avanzado el proceso de extracción de la camisa se revisa si es necesario verter más grava dentro de la perforación. Luego de extraer la camisa se deposita grava sobre el sector de la perforación y se procede a compactar con un rodillo vibratorio.



Fig. 2 - Construcción de pilas de grava vibrando el encamisado con grava en su interior

La Fig. 3 presenta la grilla de las columnas de grava, la cual fue definida en forma triangular manteniendo una separación de 2.4 m entre los centros de cada columna para los sectores con bajas cargas, mientras que para los sectores con cargas altas se ubicaron a 2 m entre los centros. La carga estática transmitida por el edificio a nivel de sello de fundación es de alrededor de 200 kPa repartida uniformemente, pero con máximos de 260 kPa.



a) Zona de carga baja

b) Zona de carga alta

Fig. 3 - Grilla triangular de columnas de grava.

### 3 Evaluación del mejoramiento de suelos

Para poder evaluar el mejoramiento del suelo de fundación mediante la medición de la velocidad de ondas de corte, fue necesario realizar mediciones antes y después de ejecutadas las columnas de grava. Todas las mediciones fueron realizadas con el equipo SoilspyRosina, de la marca Tromino, el que cuenta con 25 geófonos de 4.5 Hz.

#### 3.1 Mediciones previas al mejoramiento

La estratigrafía del suelo de fundación comprende arenas limosas SM con dos lentes de limos de baja plasticidad ML 7.4 m donde aparece un estrato ML de 1.7 m de espesor. Luego continúan intercalaciones de SM, SP y SW hasta los 18.4 m donde vuelve a aparecer un estrato ML de 5.3 m de espesor que sobreyace un estrato de 4.4 m de espesor de arcilla de baja plasticidad CL

mezclado con ML. Luego sigue ML hasta los 30 m del sondaje del ensayo SPT. Los antecedentes de mecánica de suelos del proyecto pueden ser consultados en Sanzana (2014). La Fig. 4 muestra los primeros 12 m (desde la cota de fundación) de dos mediciones de velocidad de ondas de corte Previa al Mejoramiento de Suelo llamadas PM MS (DICTUC, 2012) y PM MASW (OITEC, 2013).

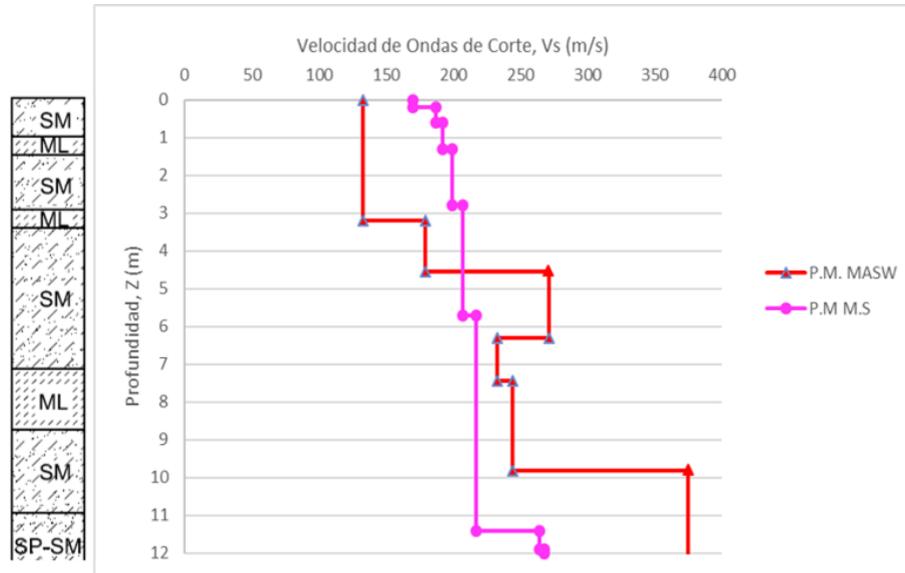


Fig. 4 – Mediciones de Vs previas al mejoramiento PM MS y PM MASW

### 3.2 Mediciones post mejoramiento

Se realizaron 5 campañas de exploración superficial MASW con fuente activa (maso de 15 kg), luego de realizado el mejoramiento de suelos con columnas de grava. El 24/09/2013 se realizaron dos campañas de medición, y las tres restantes en los días 25 y 27 de octubre y 9 de noviembre 2013, todas las mediciones se realizaron en la cota del sello de fundación. La Tabla 1 presenta las configuraciones de los arreglos lineales. En cada campaña se realizaron 3 mediciones, obteniendo así 15 mediciones en total nombradas con letras desde la A a la Ñ. Se optó por medir sobre líneas que contaran con columnas de grava y sobre líneas de terreno natural, lo que se representa en la Fig. 5. La Fig. 6 presenta la distribución y ubicación de las campañas de exploración en la superficie del terreno, además de la ubicación de las columnas de grava, en azul se presenta la grilla de 2.0m y en café la grilla de 2.4m. Cabe destacar que las campañas de exploración 1, 2, 3 y 5 fueron realizadas luego del horario de trabajo de la construcción, o sea que estaban sometidas al ruido normal de la ciudad, mientras que la campaña de exploración 4 fue realizada en horas de trabajo de la obra.

Tabla 1 – Vs y Vs1 a 6 m y 12 m de profundidad

Campaña Exloración	N° Geófonos	Separación (m)	Largo Arreglo (m)
1	22	1	21
2	22	1	21
3	25	0.5	12
4	11	1.5	15
5	11	1.5	15



Fig. 5 – Fotografías de las exploraciones superficiales sobre sobre columnas de grava

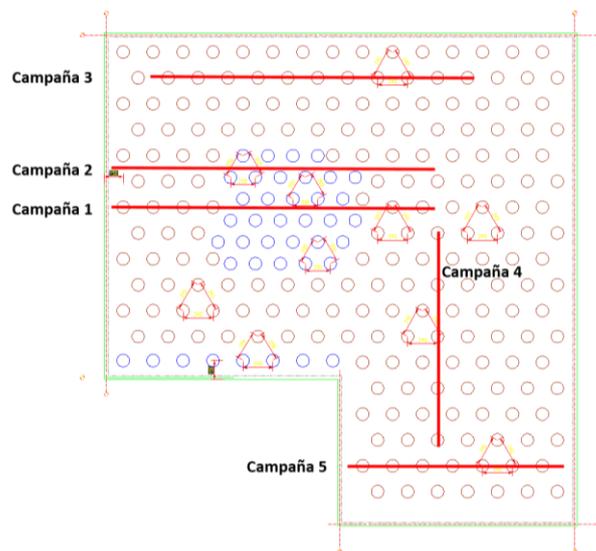


Fig 6 – Ubicación de las campañas de exploración post mejoramiento de suelos

#### 4 Resultados

La Fig. 7 muestra los perfiles de velocidad de ondas de corte pre y post mejoramiento de columnas de grava (PM son las mediciones pre mejoramiento mientras que Med son las mediciones post mejoramiento). El detalle del procesamiento de los datos (curvas de dispersión, método de inversión, incertidumbre asociada a cada estrato) se presenta en Sanzana (2014), cabe destacar que las mediciones post mejoramiento (Med) se trataron con los mismos métodos que las mediciones pre mejoramiento (PRE MASW). Se observa que las mediciones Med post mejoramiento de suelos no son siempre mayores que las mediciones PM pre mejoramiento. Esto indicaría que no siempre aumentó el valor de  $V_s$  con la profundidad respecto a los valores PM.

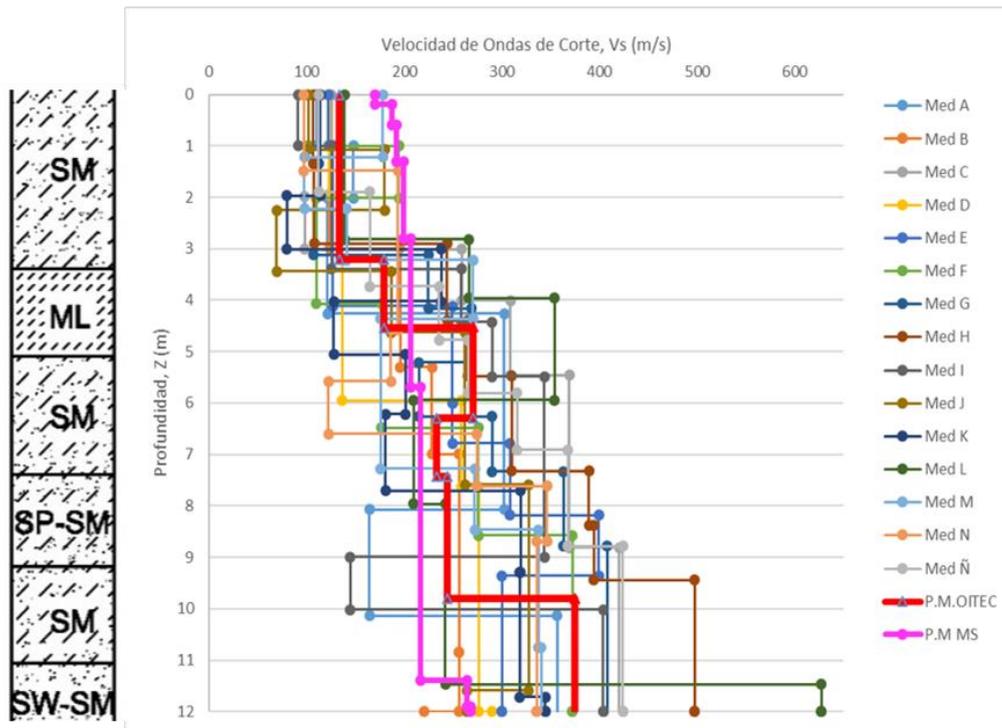


Fig. 7 – Comparación de perfiles de velocidad de ondas de corte

A modo de ejemplo se presentan en la Fig. 8 las curvas de dispersión de las mediciones F y K.

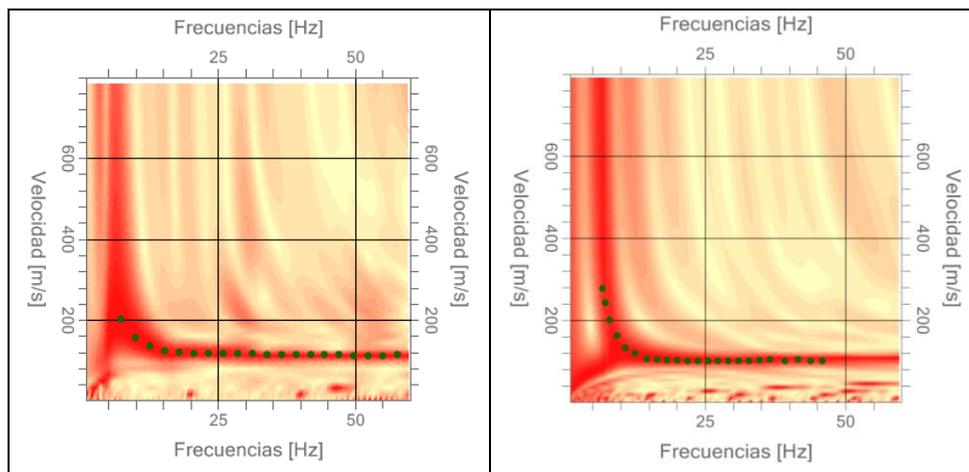


Fig. 8 – Curva de dispersión de las mediciones F y K respectivamente

Las curvas de dispersión se obtuvieron utilizando el método f-k, mientras que la inversión se realizó mediante el método de mínimos cuadrados.

Luego de generados los perfiles de velocidad de ondas de corte, se definieron 2 profundidades de interés para la comparación de la velocidad promedio ( $V_s$ ), además se utilizó su corrección por confinamiento ( $V_{s1}$ ) como una segunda opción de comparación, siendo estas hasta 6 m, que es la profundidad de las pilas de grava, y hasta 12 m para observar si hay algún cambio del parámetro  $V_s$  bajo las columnas de grava. La Tabla 2 muestra las velocidades promedio hasta 6m y 12m, en

ambas profundidades de las mediciones post mejoramiento, mientras que la Tabla 3 presenta las velocidades promedio para las mediciones pre mejoramiento.

Tabla 2 – Vs y Vs1 a 6 m y 12 m de profundidad

Medición	Vs (m/s)		Vs1 (m/s)	
	6 m	12 m	6 m	12 m
A	149	174	213	236
B	137	190	187	238
C	165	225	237	305
D	132	182	173	217
E	138	201	200	251
F	126	186	182	236
G	142	201	206	320

Medición	Vs (m/s)		Vs1 (m/s)	
	6 m	12 m	6 m	12 m
H	138	223	197	264
I	153	200	206	297
J	130	182	184	236
K	123	171	177	224
L	198	217	279	270
M	159	200	222	254
N	149	188	211	250
Ñ	164	228	231	298

Tabla 3 – Velocidad de ondas de corte a 6m y 12m de profundidad

Medición	Vs, m/s		Vs1, m/s	
	6 m	12 m	6 m	12 m
PM MS	200	210	209	206
PM MASW	162	205	215	252

Comparando los resultados de las mediciones, se observa que para la medición pre-mejoramiento PM MS la velocidad promedio a 6 m de profundidad está por sobre las mediciones post-mejoramiento, mientras que la medición a 12 m de profundidad se encuentra entre los valores máximos obtenidos en las mediciones post-mejoramiento.

Las Figs.9 y 10 muestran otra forma de comparar las velocidades promedio pre y post mejoramiento de suelos con columnas de grava a 6 y 12 m de profundidad, respectivamente.

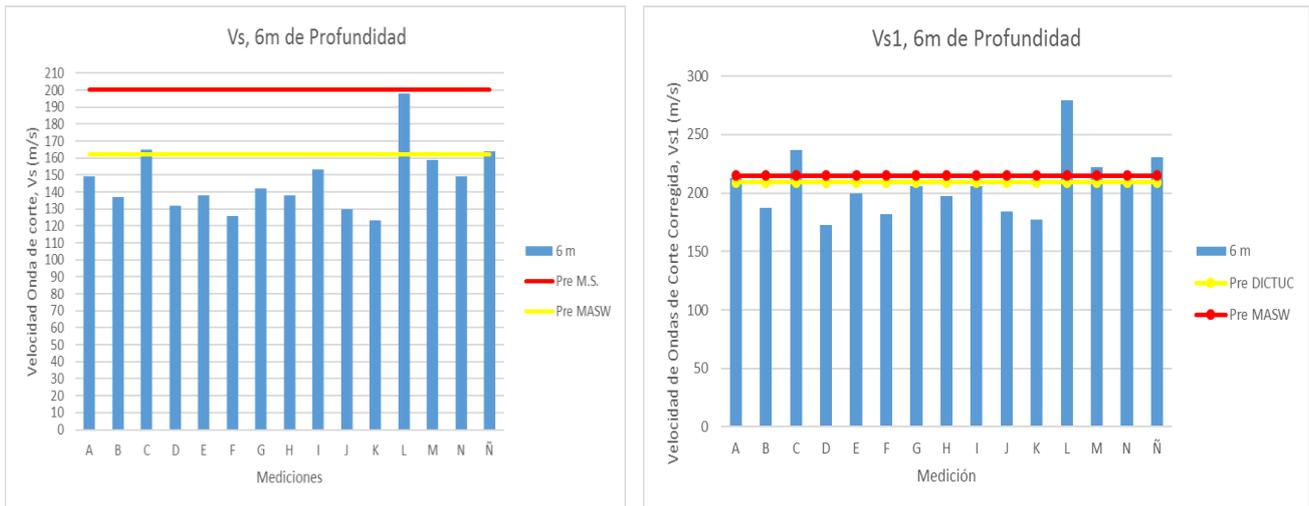


Fig. 9 – Comparación de Vs y Vs1 a 6 metros de profundidad.

Las mediciones post mejoramiento fueron realizadas a los pocos días después de construir las columnas de grava, lo cual no da tiempo suficiente para que el suelo consolide alrededor de la columna de grava. Es probable que la construcción de las columnas de grava usando vibración haya incrementado las presiones de poros, disminuyendo la rigidez del suelo circundante temporalmente.

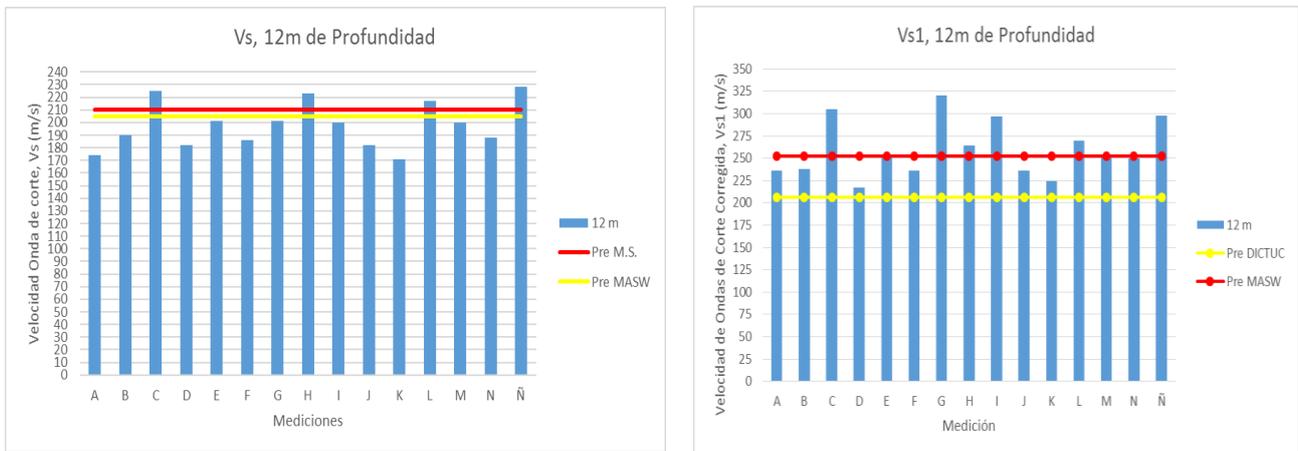


Fig. 10 – Comparación de velocidad de ondas de corte promedio a 12 metros de profundidad.

## 5 Conclusiones

En la presente investigación se analizó la mejora de suelo generada por las columnas de grava, usando como parámetro de control la velocidad de propagación de onda de corte  $V_s$ . Para esto se realizaron 5 campañas de exploración, en las cuales se realizaron mediciones de velocidad de ondas de corte con fuente activa MASW, Park et al (1999). De los resultados se pueden señalar las siguientes conclusiones.

Los valores de  $V_s$  y  $V_{s1}$  obtenidos después del mejoramiento no mostraron un aumento, más bien en la mayoría de los casos disminuye luego de la aplicación de las columnas de grava, es así como la velocidad de propagación de ondas de corte, medida con métodos de ondas superficiales, no se ve influenciada. Esto queda demostrado al comparar el parámetro  $V_{s6}$  y  $V_{s12}$  entre las mediciones pre mejoramiento y post mejoramiento. Las mediciones realizadas entre las columnas, presentan el mismo comportamiento que las realizadas sobre las columnas de grava.

Mediante las mediciones MASW, se detectó que el procedimiento de ejecución del mejoramiento de suelos mediante columnas de grava suelta los 2 primeros metros (en profundidad) aproximadamente, ya que el perfil de velocidades de ondas de corte disminuye considerablemente al compararse con las mediciones pre mejoramiento. Este problema debe ser revisado y tomado en cuenta cuando se ejecute este tipo de mejoramiento de suelos en todo tipo de proyectos.

Uno de los parámetros que rige la clasificación sísmica en la nueva normativa Chilena (D.S.61) es la velocidad de ondas de corte, para el cual no se detectó un incremento al mejorar el suelo mediante columnas de grava. Es por esto que la reclasificación del terreno queda descartada y aunque aumentara  $V_{s30}$ , dados los supuestos que hay detrás de los sistemas de clasificación, no correspondería reclasificar.

Es posible que no se haya detectado un aumento en la velocidad de ondas de corte del terreno debido al poco tiempo que paso entre la ejecución de las columnas y las mediciones de  $V_s$ , como producto del llamado "set up". Como el efecto de drenaje radial no es inmediato, las mediciones no pudieron detectar cambios en las propiedades del suelo.

Si bien es posible medir la velocidad de ondas de corte sobre sitios con mejoramientos de suelos con columnas de grava mediante prospecciones geofísicas superficiales (MASW), esto no implica que sea una forma certera ni adecuada de hacerlo. Para poder aseverar esto, es necesario desarrollar una forma de medición y procesamiento de datos que no se vea afectada por las inclusiones verticales.

## Referencias

- [1] Jefferson I, O'Hara-Dhand, K A and Serridge C J. Assessment of the ground improvement of problematical soils. *Proceedings of the 3rd International Conference on Site Characterization, Taipei, Taiwan, Expanded Abstracts*, 2008.
- [2] Moxhay A L, Tinsley R D, Sutton J.A. Monitoring of soil stiffness during ground improvement using seismic surface waves. *Ground Engineering* 34, 2001, pp. 34-37
- [3] Redgers J D, Moxhay A L, Ghataora G S, Jefferson I. Case histories of settlement performance comparisons on ground improvements using stiffness, seismic waves and traditional methods., *Proceedings of the 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Arlington, Virginia, USA, Expanded Abstracts*, 2008
- [4] Madun A, Jefferson I, Chapman D, Culshaw M, Foo K and Atkins P. Evaluation of the multi-channel surface wave analysis approach for the monitoring of multiple soil-stiffening columns. *Near Surface Geophysics* 8(6), pp. 611-621, 2010.
- [5] Kim S and Kim D. Evaluation of ground densification by dynamic compaction using SASW method, *Ground Improvement Geosystems: Densification and Reinforcement*, Ed. Davies and Schlosser, pp. 141-147, 1997.
- [6] Yang, J. and Gu, X.Q, Shear stiffness of granular material at small strains: does it depend on gran size?, *Géotechnique* 63, No- 2, pp. 165-179, 2013
- [7] Sanzana, P.I. Evaluación del mejoramiento de suelos areno limosos con columnas de grava por medio de velocidades de ondas de corte, M.Sc Tesis, UCSC, 2014.
- [8] Park C.B, Miller R.D, Xia J. Multichannel analysis of surface waves, *Geophysics* 64, 800-808, 1999.