

EVALUACIÓN DE LA EFICACIA DEL MÉTODO DE COMPACTACIÓN DINÁMICA MEDIANTE ENSAYOS SÍSMICOS.

Autores: Javier Marín Loeches^{1*}, Itziar Pérez Santisteban^{2*}, Joaquín Dorronsoro Pérez^{3*}, Fernando Puell Marín⁴

* Dpto. de Geofísica Aplicada y Ensayos In Situ de Orbis Terrarum.

¹ Ingeniero Civil

² Doctora en CC Geológicas

³ Licenciado en CC Geológicas

⁴ Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos

1. Introducción.

La necesidad de construir en terrenos poco apropiados es cada vez un problema más habitual en la ingeniería civil, debido fundamentalmente a la elevada ocupación del suelo y la consiguiente disminución de terrenos en buenas condiciones para la construcción. Esto da lugar a un aumento de la necesidad de realizar tratamientos de mejora del terreno para evitar la necesidad de cimentaciones complejas y/o aumentar las garantías de funcionamiento de las mismas. De la misma forma, surge la necesidad de caracterizar el terreno para determinar el tratamiento a emplear y posteriormente realizar pruebas de comprobación que garanticen el correcto funcionamiento del tratamiento.

De entre estos tratamientos, la Compactación Dinámica se presenta como una solución rápida y eficaz para la mejora de grandes extensiones de terreno flojo, heterogéneo o con problemas de licuefacción, entre otros.

La aplicación de técnicas geofísicas para la comprobación de tratamientos de mejora del terreno es hoy una práctica habitual. En concreto, el método de análisis espectral de ondas superficiales (SASW) puede ser empleado para la comprobación del funcionamiento del tratamiento de mejora del terreno mediante Compactación Dinámica (*F. Muñoz et al 1995*).

El presente texto propone un método de comprobación más completo que el citado, mediante la combinación de dos técnicas, sísmica de refracción y sísmica pasiva (ReMi), y aporta los datos obtenidos de su empleo en la comprobación del tratamiento de Compactación Dinámica llevado a cabo en la construcción de la Central de Ciclo Combinado Duba Green, ejecutado por Orbis Terrarum, en Arabia Saudí. En este proyecto se aplicó el método de manera complementaria a los ensayos de diseño y comprobación del sistema de compactación, ejecutados por Trevi ASC

El empleo combinado de las técnicas de sísmica de refracción y sísmica pasiva ReMi proporciona datos más precisos de la distribución en profundidad de capas del terreno con diferentes propiedades sísmicas que el empleo de los métodos por separado, proporcionando, además, la posibilidad de calcular módulos dinámicos de las diferentes capas de terreno. Por otra parte presenta ventajas fundamentales frente a otros métodos sísmicos con las mismas capacidades como son el cross-hole o el down-hole, ya que no solo elimina la necesidad de realizar sondeos y complejas instalaciones, sino que supone una reducción en el tiempo empleado en la realización de los ensayos, ya que ambos realizan con el mismo equipo y sobre la misma implantación.

Es de destacar, que si bien el funcionamiento de los métodos sísmicos para la comprobación de tratamientos del terreno está constatado, no es ni mucho menos el más habitual siendo

otros procedimientos geotécnicos más clásicos los habitualmente empleados, como son los ensayos de penetración (dinámicos y estáticos) o los presiómetros.

El método propuesto contempla la realización de ensayos combinados de sismica de refracción y pasiva antes de la realización (en fase de campaña geotécnica) y de manera posterior a la compactación. De esta manera, será posible comparar los resultados y decidir si el tratamiento es o no suficiente.

2. La Compactación Dinámica.

La Compactación Dinámica es un tratamiento de mejora del terreno patentado por *Louis Menard* en 1970 consistente en la compactación del terreno mediante el golpeo del mismo con una masa suspendida de una grúa (o similar) que se deja caer libremente sobre el suelo a compactar. El objetivo fundamental del tratamiento es la mejora de la capacidad portante de grandes áreas de terreno compresible mediante la densificación del mismo por la recolocación de las partículas y la reducción de la porosidad inicial.

Los efectos principales de la Compactación Dinámica son (*J.C. Montejano et al*):

- Mejora del módulo de deformación hasta valores de 20 a 30 MPa con la consecuente reducción de los asientos relativos y absolutos a corto y largo plazo.
- Aumento de la capacidad portante con cargas admisibles de 0,2 a 0,3 MPa.
- Homogenización en el comportamiento de terrenos no homogéneos y no clasificados.
- Mejora del terreno frente al riesgo de licuefacción y/o colapso.
- Inducción de asientos del 5 al 15 % respecto a la profundidad del tratamiento como reflejo directo en superficie de la reducción del índice de huecos del terreno tratado.

Es importante destacar que la compactación dinámica es un tratamiento para terrenos de carácter granular, con bajo contenido en finos, si bien son admisibles la presencia de lentejones o capas finas de material cohesivo aislado.

La Compactación Dinámica es un método que carece de desarrollo matemático contrastado que permita, a partir de formulación, obtener la cuantía de tratamiento necesario en uno u otro terreno. Es por este motivo que el método se basa en la experiencia previa en terrenos similares, en el desarrollo de un área de prueba en la que se definirán los parámetros del tratamiento (malla de golpes, masa de golpeo, altura de caída, etc.) a emplear en el resto del área a compactar y en la comprobación tras el tratamiento de los resultados obtenidos.

De cara al diseño y al control de la efectividad del tratamiento es necesario controlar diversos aspectos como son:

- Control de asientos inducidos mediante la medida de la huella y la deformación del terreno tras el golpeo.
- Control de parámetros de mejora del terreno en términos de resistencia y deformabilidad.
- Control de vibraciones que puedan afectar a construcciones o procesos próximos.

Tanto el primero como el último de los tres aspectos citados serán controlados para el diseño del tratamiento. El segundo sin embargo será empleado en todas las fases, diseño, ejecución y control, ya que será la base tanto para marcar los objetivos del tratamiento, como para establecer si es válido o no. Los ensayos de control de parámetros de resistencia y deformabilidad más empleados con esta técnica son los siguientes:

- Ensayos de penetración dinámica, ya sean DPSH (N20) o SPT (N30).
- Presiómetros.

- Ensayos de penetración estática (CPT/ CPTu)

3. Técnicas empleadas.

En el proyecto de construcción de la Planta de Ciclo Combinado Duba Green (Duba, Arabia Saudí), se ha llevado a cabo un tratamiento de mejora del terreno por Compactación Dinámica abarcando un área total de 213.894,344 m² (divididos en 8 subáreas) sobre terreno formado por capas sedimentarias de entre las que destaca una capa de arenas limosas con presencia ocasional de gravas, con compacidad que varía entre muy suelta y medianamente densa, cuya mejora es el objetivo principal del tratamiento. El tratamiento de este área tiene como objetivos principales la mejora de la rigidez del terreno y el incremento de la densidad del mismo, lo que además conlleva como consecuencia directa un aumento de la capacidad portante y una disminución del riesgo de licuefacción.

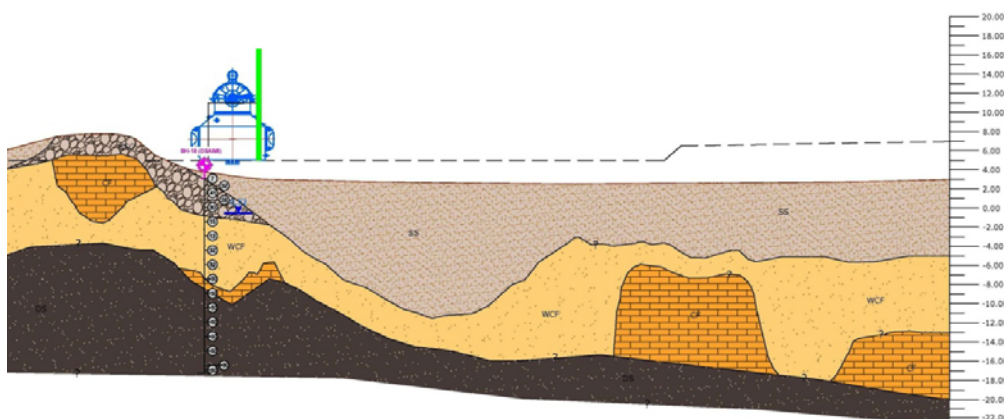


Fig 01. Perfil Geológico del terreno tratado.

El diseño del tratamiento, llevado a cabo por Trevi ASC, está basado en los estudios geotécnicos previos, apoyado por los estudios Geotécnico y Geofísico de Detalle, desarrollados por Orbis Terrarum y RGF, y puesto a punto mediante las áreas de prueba realizadas in situ para tal fin.

El método empleado por Trevi como medio de comprobación del funcionamiento consiste fundamentalmente en la realización de ensayos PMT, de manera previa al tratamiento y posteriormente al él, incluyendo también ensayos intermedios para valorar el avance de los trabajos. El diseño de la campaña de comprobación propuesta por el contratista del tratamiento depende del tipo de estructuras que se pretende cimentar sobre cada área, proponiendo un PMT por cada 3.500 m² tratados en las zonas más sensibles o cada 5.000 m² en zonas donde se ubicarán construcciones de menor entidad. Además, se realizarán CPT (Cone Penetration Test), con la misma densidad, de cara a evaluar el potencial de licuefacción del terreno tratado. La profundidad prevista para ambas investigaciones es de ocho metros o rechazo, habiéndose llegado en ocasiones puntuales hasta los doce metros de profundidad.

Para la auditoría externa del funcionamiento del tratamiento, el departamento del Geofísica Aplicada y Ensayos In Situ de Orbis Terrarum, propone un método de comprobación basado en la realización de perfiles geofísicos mediante la combinación de las técnicas de sísmica de refracción y sísmica pasiva (ReMi).

Mediante la técnica de sísmica de refracción se obtienen perfiles de distribución en profundidad de velocidad de propagación de ondas P (V_P), mientras que la sísmica pasiva (ReMi) proporciona valores de velocidad de propagación de ondas S (V_S), a partir de la cual se es posible determinar la rigidez y la deformabilidad del terreno, así como el valor de la V_{S30} ,

parámetro fundamental para la evaluación del comportamiento del terreno de cara al diseño sísmorresistente.

La sísmica pasiva ReMi (Louie, 2001), estudia la velocidad de propagación de ondas de corte (S) basándose en el análisis espectral del ruido ambiental (o microtemores) el cual se propaga a través del terreno principalmente en forma de ondas Rayleigh. Las aplicaciones de la técnica en ingeniería civil son numerosas, pero destacan las orientadas a la caracterización sísmica del terreno mediante parámetros reconocidos a nivel internacional como la V_{S30} , o la detección de zonas blandas (o cavidades) gracias a la posibilidad de esta técnica para observar inversiones de velocidad.

A nivel pragmático, la combinación de ambas técnicas supone múltiples ventajas como la disminución en los gastos del transporte (tanto a nivel económico como en plazos), ya que el equipo necesario para realizarlas es el mismo, siendo este un equipo ligero cuyos componentes pueden transportarse en maletas de viaje convencionales. Las ventajas prácticas no acaban aquí dado que la implantación necesaria para realizar los dos ensayos es la misma, reduciendo aproximadamente a la mitad el tiempo necesario para realizar los ensayos, y con ello el plazo total de ejecución de trabajos de campo. En concreto, de cara a la comprobación del tratamiento con Compactación Dinámica para el proyecto de Duba Green, se han realizado hasta la fecha un total de 64 perfiles combinados Refracción-ReMi (34 para la caracterización previa al tratamiento y 30 de comprobación) para los que se han empleado las siguientes implantaciones:

- 24 geófonos. Equidistancia de 4 metros entre geófonos.
- 7 “disparos”, cada 16 metros, comenzando 2 metros antes de la posición del primer geófono.
- Distancia total de la implantación 96 m.



Figura 02. Vistas de una de las implantaciones realizadas.

Por otra parte, en comparación con otros métodos geofísicos que ofrecen la posibilidad del estudio combinado de velocidad de transmisión de ondas P y S, como son el Cross-Hole o el Down-Hole, presenta claras ventajas como es la supresión de los sondeos necesarios para la realización del ensayo, eliminando la necesidad del empleo de maquinaria de perforación y los costes asociados, los problemas generados por la instalación del dispositivo en el sondeo, que requiere inyecciones que en numerosas ocasiones no obtienen los resultados deseados, y la posibilidad de realizar perfiles más extensos, en menos tiempo.

En el plano técnico, la combinación de ambas técnicas ofrece las ventajas citadas a continuación:

- Mayor precisión en la interpretación de los perfiles: La combinación de ambas técnicas permite ajustar de manera más precisa los modelos físicos que generan la respuesta registrada. Además, la técnica ReMi permite detectar capas de inversión de velocidad, es decir de menor velocidad en profundidad, lo que es imposible empleando solo la refracción.
- Cálculo realista de módulos dinámicos: Las velocidades de propagación de las ondas dependen directamente de las propiedades físicas del material por el que se propagan (densidad y deformabilidad) por tanto, conociendo el valor de propagación de ondas P y S y la densidad de un terreno es posible calcular sus módulos en el rango de baja deformación, siguiendo la siguiente formulación:

Nombre	Definición	Modelo elástico	En función de V
Módulo de Young E (MPa)	$\frac{\sigma \text{ longitudinal}}{\varepsilon \text{ longitudinal}}$	$E = 2 \cdot G \cdot (1 + \nu)$	$E = 2 \cdot V_s^2 \cdot \rho \cdot (1 + \nu)$
Módulo de rigidez G (MPa)	$\frac{\sigma \text{ cizalla}}{\varepsilon \text{ cizalla}}$	$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$	$G = V_s^2 \cdot \rho$
Módulo de bulk K (MPa)	$\frac{P \text{ hidrostática}}{\varepsilon \text{ volumétrica}}$	$K = \frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)}$	$K = V_p^2 \cdot \rho \cdot \frac{4 \cdot V_s^2 \cdot \rho}{3}$
Coefficiente de Poisson ν	$\frac{\varepsilon \text{ transversal}}{\varepsilon \text{ longitudinal}}$	$\nu = \frac{3K - 2G}{2 \cdot (3K + G)}$	$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2 \cdot \left(\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 1\right)}$

Además, es posible determinar parámetros de cálculo dinámico como son los coeficientes elásticos de los muelles (K) y el factor de amortiguamiento (D) para el establecimiento de un modelo visco-elástico que represente la interacción suelo-estructura frente a cargas dinámicas.

- Determinación de la mejora del comportamiento del terreno frente al sismo: Dado que uno de los resultados del aumento de la compacidad del terreno es una mejora de la respuesta sísmica del terreno y una disminución del potencial de licuefacción, el método presentado permite, por medio de parámetros como la V_{S30} , comparar el terreno mejorado con el anteriormente existente en términos sismoresistentes.

4. Comparación de resultados.

Para validar el procedimiento de comprobación propuesto, se comparan los resultados obtenidos por los métodos empleados por el contratista del tratamiento (PMT y CPT) y los obtenidos mediante ensayos sísmicos. En la tabla 01 es posible observar los valores medios obtenidos en los ensayos PMT pre y post-tratamiento, considerando un modelo simplificado del terreno en 3 capas.

Profundidad	Datos pre-tratamiento		Datos post-tratamiento		% Mejora	
	pl (Mpa)	Em (Mpa)	pl (Mpa)	Em (Mpa)	pl	Em
0-6 m	0,37	2,50	1,67	25,33	381,67%	1183,33%
6-8 m	0,93	7,67	1,70	25,00	80,29%	246,67%
8-12 m	1,67	23,33	1,87	28,00	14,44%	24,44%

Tabla 01. Valores medios obtenidos en los Presiómetros.

Observando la tabla anterior es posible concluir que el tratamiento es eficaz, especialmente en los primeros seis metros, obteniéndose resultados que homogenizan las propiedades del terreno en los primeros doce metros. Si bien, estos datos de manera bruta son insuficientes para determinar si el terreno alcanza las propiedades exigidas en proyecto. Para este fin, Trevi

ASC calcula por medio de correlaciones los módulos estáticos y dinámicos del terreno y los compara con la especificación técnica del cliente.

El método propuesto como medio para auditar los resultados proporcionados por el contratista del tratamiento, proporciona un análisis más intensivo del terreno, relajándose perfiles de 96 m de longitud para los que se calculan velocidades de transmisión de las ondas P y S para cada unidad geotécnica identificada. Se muestran a continuación los valores medios obtenidos para unidad, así como sus porcentajes de mejora.

Unidad Geotécnica	Litología	Profundidad (m)	Vp pre-tratamiento (m/s)	Vs post-tratamiento (m/s)	Vp post-tratamiento (m/s)	Vs post-tratamiento (m/s)	% Mejora	
							Vp	Vs
SS / SSG	Arena limosa con gravas	0-10	500	223	954	541	90,80%	142,60%
WCF	Arenas coralinas (CF alterado)	7-10	975	475	1.650	860	69,23%	81,05%
CF	Calizas coralinas	10-16	1500	885	1.700	893	13,33%	0,90%
CSG	Arenas y gravas cementadas	16-20	1650	964	2.000	1.100	21,21%	14,11%
DS	Arenas densas a muy densas	16-30	1800	1063	2.000	1.100	11,11%	3,48%

Tabla 02. Valores medios obtenidos en los Ensayos sísmicos Refracción-ReMi.

Comparando ambos métodos es posible afirmar que existe una mejora evidente de las propiedades del terreno en los primeros 10-12 metros, siempre y cuando el terreno a estas profundidades sea susceptible de mejora, es decir no se trata de roca o material muy cementado. Pudiéndose dar por válida la comprobación del tratamiento realizada por Trevi ASC.

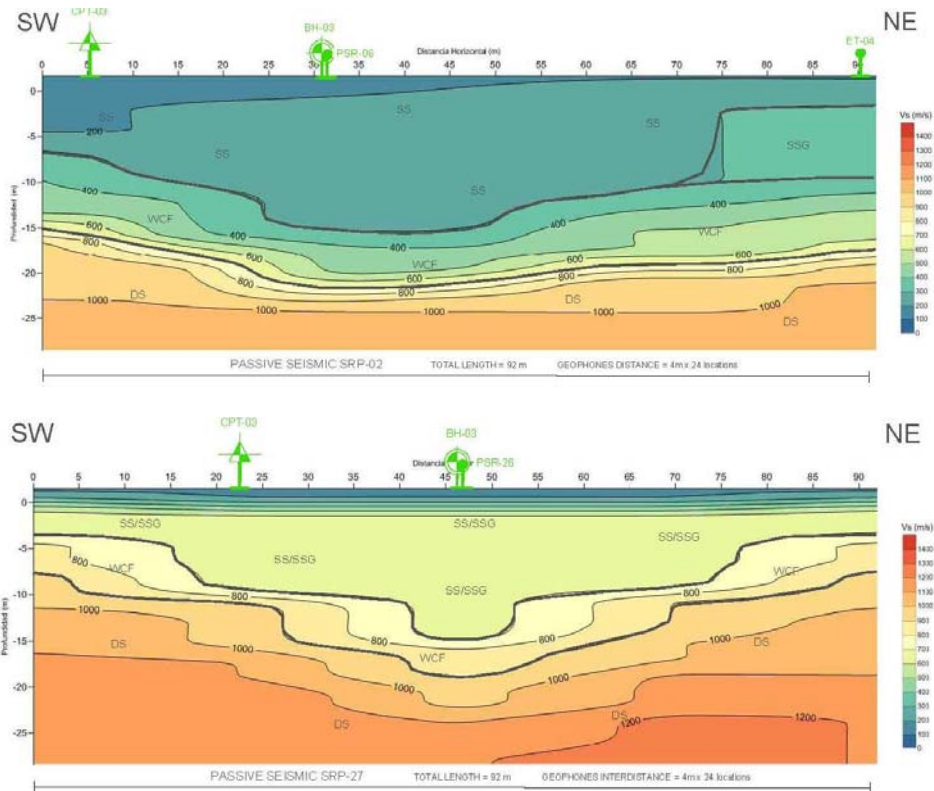


Figura 03. Perfiles de sismica pasiva ReMi pre y post-tratamiento (SRP-02 y SRP-27 respectivamente).

Además de la validación del tratamiento, el método propuesto proporciona valores realistas de los módulos dinámicos, mientras que a partir de los ensayos PMT solo es posible calcularlos a partir de correlaciones basadas en el SPT, las cuales subestiman notablemente el valor real de los módulos. El conocimiento realista de los módulos dinámicos conlleva una optimización de los modelos de cálculo que podrá traducirse en una disminución de los costes de construcción de las cimentaciones y en un incremento de confianza en el funcionamiento de las mismas.

	Cálculo a partir de correlaciones	Cálculo a partir de Vp y Vs
E₀ (Mpa)	462	1478
G₀ (Mpa)	174	585

Tabla 03. Comparativa de módulos dinámicos, calculados a partir de correlaciones a partir de Vp y Vs

Es posible también comprobar la mejora global que supone el tratamiento del terreno de cara al diseño sismoresistente. Tomando como referencia el valor de la V_{S30} , valor empleado por el IBC (International Building Code) como básico para la caracterización de los terrenos frente al sismo, es posible afirmar el terreno ha mejorado que tras el tratamiento, viéndose este valor aumentado aproximadamente 1,5 veces con respecto a los valores pre-tratamiento.

5. Conclusiones.

Tras el análisis de los datos obtenidos en campo para la validación del tratamiento de Compactación Dinámica se puede concluir que el tratamiento es válido como medio para aumentar la rigidez y la compacidad del terreno.

Comparando los resultados obtenidos por el método sísmico propuesto con los obtenidos por el método más habitual basado en presiómetros (PMT) se puede concluir:

- Ambos métodos concluyen que existe una mejora de las propiedades mecánicas del terreno entre los 10 y los 12 primeros metros. Por lo que el método propuesto puede considerarse válido para su empleo como método de comprobación.
- El método sísmico propuesto supone un ahorro en costes de maquinaria y una mejor relación entre los metros de terreno investigados y el tiempo empleado para ello, tratándose además de un método no invasivo.
- Los módulos dinámicos calculados a partir de la velocidad de ondas responden a la formulación física de los mismos y no a ninguna correlación, por lo que se pueden considerar más representativos, evitando la subestimación de estos valores al ser calculados mediante correlaciones.
- El método sísmico no proporciona valores estáticos ni permite calcular de manera precisa la capacidad portante del terreno mejorado. Serán necesarias por tanto otro tipo de investigaciones para cumplir este objetivo.

Se recomienda por tanto un método de comprobación del tratamiento mixto que combine las técnicas de refracción y ReMi con investigaciones directas, con una menor densidad de puntos, seleccionando para estas los emplazamientos críticos a nivel estructural. Destacando, sin embargo, que como método de validación del tratamiento por medio de una entidad independiente del contratista encargado de realizar el mismo, el método propuesto es válido por sí mismo, siendo innecesaria la realización de otros ensayos.

A la vista de los resultados obtenidos se puede constatar, también, que el método propuesto no es válido solo como un método de comprobación del tratamiento con Compactación Dinámica, sino que puede ser empleado como método de control para cualquier tratamiento que afecte a la rigidez global del terreno tratado.

6. Referencias.

- 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.
- Muñoz, C. Cuellar, V. y Valerio, J. (1995): "Evaluación del la mejora del terreno en ingeniería civil mediante el análisis de ondas superficiales". *Física de la Tierra* **7**, 259-280. *Servicio de Publicaciones, Universidad Complutense*.
- Montejano, J.C. Pérez Rodríguez, T. (2012) "Aplicaciones recientes de la técnica de compactación/sustitución mecánica en el campo de las cimentaciones industriales". *9º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica. Cimentaciones y Excavaciones Profundas* 111-123.