

Aplicaciones de las técnicas de mejora del terreno en recuperación de vertederos de inertes para suelo industrial

JC Montejano Sanz⁽¹⁾, E Martínez García⁽¹⁾

(1) Departamento Técnico, MENARD España

jmontejano@menard.es

La creciente demanda de suelo, así como su elevado precio en las áreas metropolitanas, ha propiciado importantes inversiones por parte de las diferentes instituciones, mejorando los transportes y creando nuevas áreas logísticas destinadas a dar solución a las necesidades de espacio.

En las últimas décadas las grandes ciudades y zonas portuarias han desarrollado nuevos planes de ordenación para dar cabida a sectores estratégicos en la dinámica empresarial, creando nuevos complejos logísticos, industriales y energéticos.

Muchas de estas nuevas plataformas suelen situarse en zonas ganadas al mar, llanuras aluviales o en los alrededores de las grandes ciudades, donde existen grandes extensiones de antiguas escombreras procedentes de la construcción.

Es en estas circunstancias donde los tratamientos del terreno contribuyen a consolidar estos espacios, siendo habitual su uso debido a las grandes extensiones y bajas características geotécnicas de sus suelos.

En esta comunicación se describen varios casos de aplicación de tratamientos del terreno en la adaptación y reutilización de estas áreas de terreno no consolidadas.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, la creciente demanda de suelo industrial, junto con el elevado precio del suelo urbano (sobre todo en las grandes metrópolis), provoca que se generen o reaprovechen nuevos espacios para la instalación de redes logísticas e industriales, abaratando el precio del suelo y facilitando por tanto la implantación de las empresas.

Muchas de estas nuevas áreas se sitúan en los alrededores de importantes ciudades donde existen importantes extensiones de antiguas escombreras o vertedero de residuos inertes (RSI) procedentes de la construcción.

Es en este entorno donde los tratamientos del terreno consiguen un mejor aprovechamiento de estos espacios, debido a la necesidad de adecuar grandes extensiones de terreno a las diferentes necesidades de uso que se implanten.

2. ELECCIÓN DE LA TÉCNICA DE MEJORA DEL TERRENO

Estos espacios de un menor coste en su adquisición, suelen situarse en zonas con pésimas características geotécnicas, principalmente vertederos de RSI con escasa capacidad portante y elevada deformabilidad. Son en estas circunstancias donde se suelen aplicar las técnicas de mejora del terreno, ya que constituyen en muchos casos una alternativa más rápida y

económica frente a las soluciones tradicionales de sustitución o cimentación profunda. Además resultan soluciones menos agresivas ambientalmente al reducir los volúmenes de movimiento de tierras.

Existen un gran número de técnicas relacionadas con los tratamientos del terreno, cuya aplicación depende de muchos factores, como: naturaleza del terreno, área de la zona a tratar, espesor, grado de consolidación, etc, pero a grandes rasgos pueden clasificarse en:

- Aumento de la compacidad o resistencia a partir de la densificación del propio terreno, donde destacan: técnicas de compactación por vibración (vibroflotación) o por impacto (compactación dinámica) y precargas con o sin mechas,
- Introducción en el terreno de otros elementos (grava, mortero, hormigón, cal, etc.) de tal forma que se produce un aumento de la capacidad portante y una disminución de la deformabilidad del mismo. Destacando: columnas de grava, columnas de mortero, sustitución tradicional, sustitución dinámica, soil mixing, etc.

Con relación a proyectos de recuperación de terrenos, en el congreso ISSMGE - TC 211 International Symposium on Ground Improvement de 2012 [3] se presenta una clasificación de técnicas de mejora del terreno basada en el método de mejora según: consolidación, compactación, sustitución y técnica de adición de algún ligante. Esta clasificación se muestra en la tabla 1.

Método	Técnicas	Tipos de terreno	Profundidad aplicación	Profundidad tratamiento	Adaptado para		Mejoras			
					Subsuelo	Relleno	Asentamiento	Resistencia/Estabilidad	Licuefacción	Capacidad de drenaje
Consolidación	Precarga con o sin drenes verticales	Arcilla, turba, limo pecio y suelos compresibles como arenas carbonizadas	Drenes a profundidad sobrecarga en superficie (arena) o en profundidad (presión atmosférica)	De 30 a 60m	•	•	•	•		•
Compactación por vibración	Compactador roller	Material granular	En superficie	De 0,5 a 1,0m		•	•	•	•	
	Compactador poligonal de rodillo	Material granular y cohesivo		De 1,5 a 3,0m		•	•	•	•	
	Vibroflotación	Material granular (< 15% de finos)	En profundidad	> 30m	•	•	•	•	•	•
	Sondas vibratorias	Material granular		10 – 15m	•	•	•	•	•	

Compactación por impacto	Compactación dinámica (CD)	Material granular	Desde la superficie	De 8 a 12m	•	•	•	•	•	
	RIC			De 6 a 7m	•	•	•	•	•	
	Compactación por impacto de alta energía			De 2 a 4m		•	•	•	•	
Sustitución del terreno	Columnas de grava	Suelos cohesivos, blandos, grava, arena, limo, arcilla	En profundidad	0 a 30m	•		•	•		•
	Pilotes de arena compactados	Grava, arena, limo, arcilla		20 – 30m	•	•	•	•	•	•
	Columnas de arena confinadas con geotextil	Arcilla, turba		Normalmente 10 – 15m	•	•	•	•		•
	Sustitución Dinámica (SD)	Grava, arena, limo, arcilla		Hasta 6 – 7m	•	•	•	•	•	•
	Eliminación y sustitución del terreno	Todos los terrenos blandos	En superficie	n/a	•	•	•	•	•	•
Soil mixing (aditivos de cemento o cal)	Soil mixing superficial	Arena, arcilla blanda, limo y suelo orgánico	En profundidad y superficie	≤ 12m (SSM)	•	•	•	•	•	•
	Soil mixing profundo	Arena, arcilla blanda, limo y suelo orgánico	En profundidad y superficie	3 – 50m (DSM)	•	•	•	•	•	•

Tabla 1. Revisión de las técnicas de mejora del terreno relacionadas con los proyectos de recuperación de terrenos (Van't Hoff y Nooy van der Kolff, 2012)

La elección entre los diversos métodos de mejora del terreno es un proceso donde debe tenerse en cuenta una serie de factores: naturaleza del terreno, requisitos de capacidad portante de la estructura y criterios de funcionalidad. Lo ideal es que exista una relación estrecha entre los especialistas del terreno y los ingenieros encargados del diseño.

Por otro lado, existen otra serie de condicionantes que pueden inclinar hacia el empleo de un método u otro, tales como tiempos de consolidación, sismicidad y riesgo de licuefacción, extensión de la zona a tratar, efecto de las vibraciones sobre instalaciones existentes, etc.

A modo orientativo, en la tabla 2 se resumen los principales elementos que intervienen en la elección del método de mejora.

Tipo de terreno	Tamaño de las partículas	Granulometría y plasticidad	Presencia de nivel freático	M. orgánica, expansividad, colapso, otros.
Afección al medio	Vibraciones	Ruido	Residuos	Presencia de suelos contaminados.

Objetivos a alcanzar	Aumento de la capacidad portante	Disminución de la deformabilidad	Reducción de los asentamientos por consolidación	Riesgos geotécnicos (licuefacción y otros)
-----------------------------	----------------------------------	----------------------------------	--	--

Tabla 2. Parámetros a considerar en la elección del método de tratamiento del terreno.

3. EXPERIENCIAS DE TRATAMIENTOS DEL TERRENO EN VERTEDEROS DE RESIDUOS INERTES.

A lo largo de los últimos 15 años, las principales actuaciones de tratamientos del terreno llevadas a cabo a la largo de la península ibérica, se pueden agrupar igualmente en dos grandes grupos:

- Actuaciones mediante técnicas de compactación dinámica para la recuperación de vertederos y escombreras para desarrollos relacionados con grandes plataformas logísticas, generación de zonas portuarias para almacenamiento y mejoras bajo tanques de almacenamiento.
- Técnicas de inclusiones en el terreno (sustitución dinámica, columnas de grava y columnas de módulo controlado). Utilizadas fundamentalmente en cimentación de naves logísticas y/o almacenamiento situadas sobre formaciones geológicas donde se acumulan suelos flojos naturales y rellenos antrópicos de diversa naturaleza.

Uno de los mayores campos de actuación de las técnicas de mejora en los últimos años ha sido el tratamiento de vertederos de inertes para cambiar su uso de marginal a urbano/ industrial. En particular, mediante compactación dinámica, que resulta la técnica de mejora más ventajosa para estos casos.

Estas obras se han acometido históricamente en zonas portuarias con rellenos vertidos ganados al mar, pero en los últimos años se ha aplicado en cinturones industriales o nuevos desarrollos urbanísticos (PAU) en varias ciudades en cuyo alfoz se acumulan grandes extensiones de estas escombreras de desechos procedentes de la construcción.

A continuación se describen varios casos de aplicación de esta técnicas de compactación dinámica sobre vertederos de inertes.

3.1. Caso nº1: Área logística PLAZA en Zaragoza

La ciudad de Zaragoza constituye un punto de enlace y articulación entre Madrid-País Vasco-Valencia-Barcelona, estando implantadas empresas especializadas en servicios de intermediación (transporte, logística, almacenaje, distribución, etc.). Su posición geográfica es clave, ya que su radio de influencia entre las localidades españolas y del sur de Francia, hace que en una distancia inferior a 500km tenga una aglomeración de más de 20 millones de personas.

Con una extensión de 12.826.Ha, la Plataforma Logística de Zaragoza (PLAZA) es unos de los recintos logísticos de mayores dimensiones del continente europeo. La logística representa el 80% del espacio dedicado a las áreas de actividad. También tiene integrado un centro de negocios, parque empresarial y centro comercial.

Durante los años 2004 a 2006, se desarrollaron las obras de explanación y urbanización del área logística, dejando una zona de unas 17 Ha para el acopio de todos los sobrantes de tierras de las obras de urbanización. Dicha extensión se reservó para un uso no industrial o logístico, planteándose en ella la realización de un gran aparcamiento de vehículos pesados.



Figura 1. Fotografías aéreas parcela de actuación

Posteriormente, una vez comenzada la venta de parcelas, en el año 2007, se planteó la posibilidad de llevar a cabo un cambio en el uso de dicha zona, dejándola preparada para la venta de solares para la instalación de naves industriales. La adecuación de dichos rellenos exigía por tanto acondicionarlo para las futuras cimentaciones a instalar, siendo preciso mejorar el terreno hasta alcanzar los siguiente requisitos de venta:

- Capacidad portante mínima en cualquier punto del terreno tratado de $2,0 \text{ Kg/cm}^2$,
- Garantía de asientos máximos absolutos en cimentaciones individuales con dicha capacidad portante de 2,50 cm.
- Homogeneización de los rellenos para garantizar distorsiones máximas angulares tolerables.



Figura 2. Fotografías aéreas extensión y potencia

El vertedero está constituido por los materiales excavados de la propia obra de urbanización, tratándose así de rellenos con presencia de abundantes elementos groseros, fundamentalmente bloques de yesos envueltos por una matriz de arenas y limos de naturaleza yesífera y/o margosa.



Figura 3. Aspecto del relleno

Debido a la extensión de la zona a tratar y tipología de edificación a proyectar se consideró que la opción más ventajosa era la compactación dinámica tradicional, con el objetivo de densificar los 8m superiores de los rellenos permitiendo así la cimentación superficial de las

futuras edificaciones industriales según la profundidad de afección de los bulbos de tensión de las mismas.

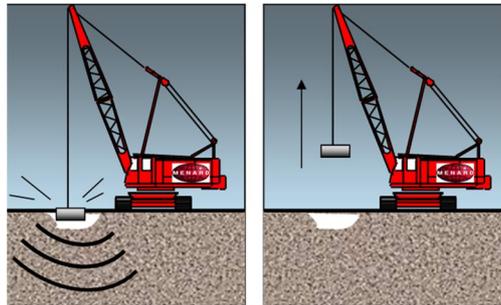


Figura 4. Esquema de trabajo de la compactación dinámica

Las principales características de la compactación dinámica de un terreno son la malla de impactos, la energía de compactación, el número de fases y la demora entre fases sucesivas. Dichas características vienen determinadas por las propiedades del terreno a tratar, tales como el espesor, la naturaleza y la permeabilidad.

Con el fin de cuantificar la mejora conseguida tras la compactación de los rellenos, se llevó a cabo una campaña de ensayos de penetración dinámica tipo Borros así como sondeos hasta 15 m de profundidad con ensayos SPT y presiométricos en su seno cada 2,0 m.

En los gráficos de la figura 5 se muestra el incremento en el golpeo N_{20} antes y después del tratamiento y los valores del módulo presiométrico “ E_m ” en dicho espesor, identificando claramente la “panza” de densificación clásica de un tratamiento de este tipo.

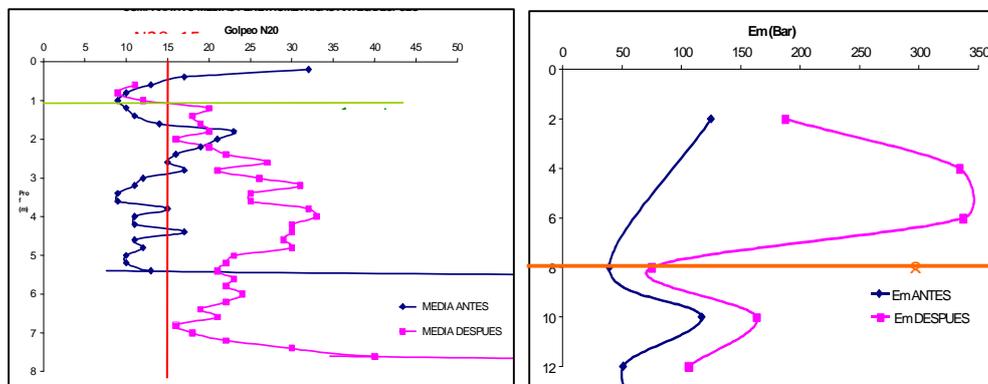


Figura 5. Gráficas resultados ensayos de control tipo DPSH y presiométricos con medias de valores medios obtenidos antes y después del tratamiento

A partir de estos resultados se garantizó una capacidad portante de $2,0 \text{ Kg/cm}^2$ en cualquier punto de la superficie tratada.

3.2. Caso nº2: Urbanización sector APD21, ciudad de Alicante

La actuación se enmarca dentro del proyecto de urbanización del Plan de Reforma Interior del sector APD21, situado en las inmediaciones del Puerto de Alicante. Con una superficie de 338.000 m^2 situado junto a Mercalicante extendiéndose hasta la avenida del Puerto y el camino viejo de Elche. Las obras de compactación se llevaron a cabo en 2012 y la construcción de viales e instalaciones del 2012 a 2014.

La problemática geotécnica de dicha zona está directamente relacionada con los rellenos vertidos históricamente por la ciudad a lo largo de las márgenes del Barranco de las Ovejas, debido a su heterogeneidad y previsible riesgo de colapso de los mismos. Se muestra en la Figura 6 algunas fotografías aéreas donde se observa el proceso de extracción de áridos de la zona y su posterior relleno.



Figura 6. Histórico de la explotación y posterior relleno de la zona afectada

Este hecho llevó a estudiar desde la fase de proyecto, soluciones de tratamiento del terreno que solventasen posibles problemas de asentamientos futuros, tanto diferidos por efecto de las cargas transmitidas por los viales, instalaciones y redes a construir, como por el efecto de posibles subidas de la lámina de agua por inundaciones en la zona que provocasen el colapso de los rellenos flojos.

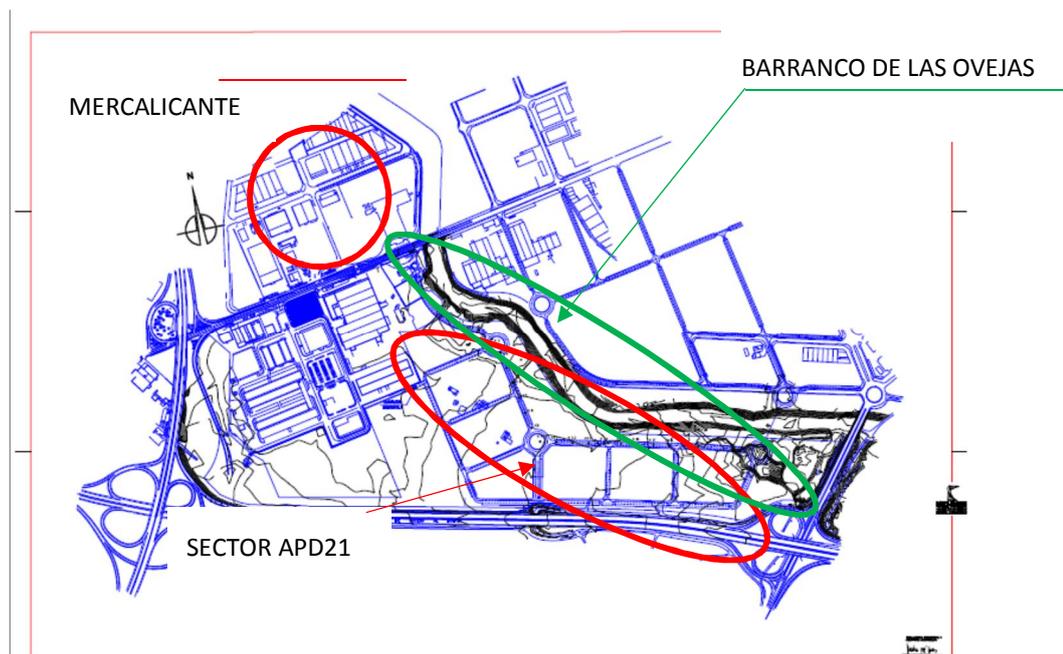


Figura 7. Ubicación del sector APD21

A lo largo de toda la zona se llevó a cabo una importante campaña de reconocimientos con el objetivo de establecer el espesor de estos rellenos y su naturaleza.

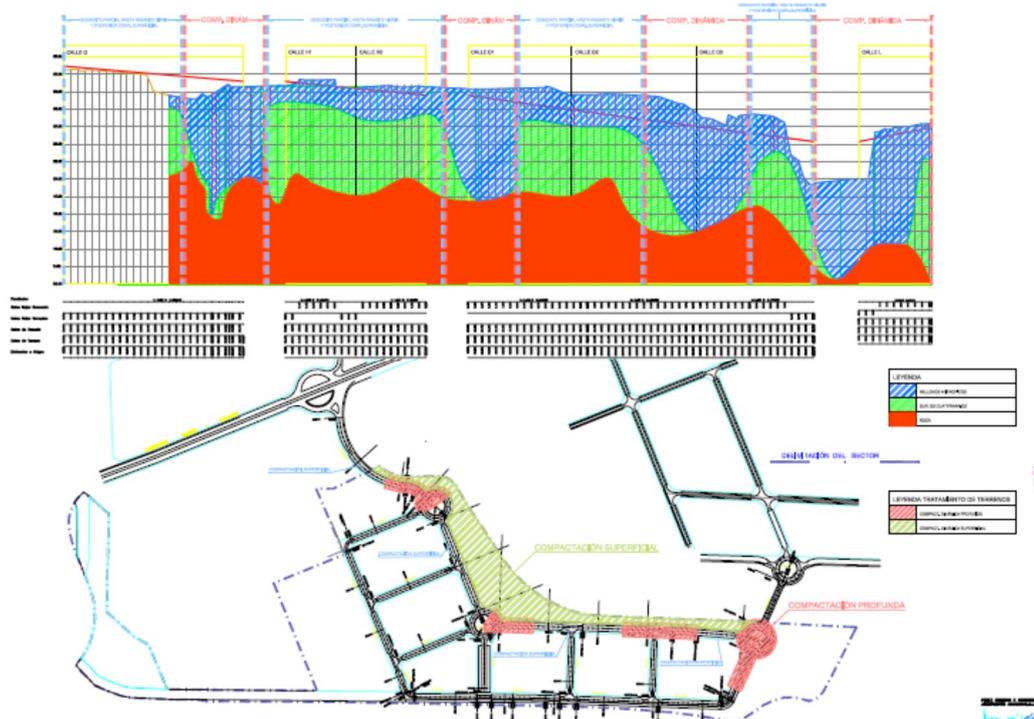


Figura 8. Sectorización según espesor rellenos antrópicos flojos

La heterogeneidad tanto en el espesor como en la compacidad y naturaleza de los rellenos, así como el carácter predominantemente granular, condujo a la elección de la compactación dinámica como el tratamiento más adecuado para el acondicionamiento de los terrenos de cimentación tanto de viales como de zonas de jardines. Los objetivos que prefijaba el proyecto para el tratamiento eran los siguientes:

- Obtener una deformabilidad de los rellenos tras el tratamiento, basada en los golpes obtenidos de N_{30} , que permitiera garantizar un asiento absoluto en los rellenos en fase de explotación inferior a 1,50-2,0 cm.
- Garantizar una influencia despreciable en la integridad de los viales en el caso de alteración de la lámina de inundación que pudiera reducir significativamente la compacidad de los rellenos a gran profundidad.
- Así, el objetivo en términos de golpeo mínimo medio a obtener de N_{30} (SPT) se prefijaron en $N_{30} = 15$ en los primeros 8 m y $N_{30} = 10$ hasta 10-12 m.

Tras las primeras pruebas antes del arranque de la obra, se llevó a cabo la siguiente sectorización del tratamiento:

1. Zona de compactación profunda.

- Espesores de rellenos blandos superiores a 5 m.
- Energía unitaria: 485 txm.
- La energía específica media de **330 txm/m²**.

2. Zona de compactación superficial.

- Espesores de rellenos blandos inferior a 5 m.
- Energía unitaria: 225 txm.
- La energía específica media de **183 txm/m²**.



Figura 9. Malla aplicada y huellas obtenidas

3.3. Caso nº 3: nuevo colegio alemán en el barrio de Montecarmelo (Madrid).

En 2012 – 2013 se llevó a cabo el nuevo colegio alemán, en una parcela de 34.700 metros cuadrados situados en la avenida del Monasterio de Guadalupe (Madrid), con un presupuesto total de 56 millones de euros.

El emplazamiento se sitúa sobre una zona que ha servido de escombrera tras la urbanización del P.A.U de Montecarmelo entre los años 2000-2006, tal y como lo muestran las fotos aéreas de la figura 10.



Figura 10. Situación y proceso de vertido de la zona de actuación

Se trata de un vertedero típico del alfoz de Madrid, donde se detecta terrenos predominantemente arenosos envueltos con restos de demoliciones, vaciados, bolsas de arcillas verdes y yesos en bloques, etc. Es decir, un relleno donde se ha vertido de manera no controlada cualquier tipo de material de procedencias muy diversas y sin ningún tipo de compactación durante su vertido.

Debido a la presencia de este vertedero, en el proyecto de ejecución desarrollado por el Gobierno Alemán, se incluye una partida para la mejora del terreno del cimiento en sus cuatro metros superiores mediante RIC. Dicha partida fue sacada a licitación por la administración alemana, siendo MENARD la adjudicataria, proponiendo en su oferta una

solución mixta de compactación dinámica tradicional (CD) combinandola con la compactación dinámica rápida (RIC).



Figura 11. Método de ejecución. Combinación de compactación dinámica tradicional profunda (CD) y compactación dinámica rápida o superficial (RIC)

El motivo de la combinación de ambas técnicas de compactación se debe a la existencia de edificaciones muy próximas a una distancia menor a 20 m, e incluso existía una guardería a una distancia inferior a 5m y presencia de espesores de relleno a mejorar de hasta 9m tal y como se muestra en la figura 12.

El empleo del compactador R.I.C, permite golpear el terreno a escasa distancia de una edificación debido a su menor nivel de generación de vibraciones al terreno. En la referencia [5] se detalla los rangos de vibraciones admisibles según los diferentes códigos y normativas europeas.

Dentro del proyecto se especificaba el grado de mejora que era necesario alcanzar con el tratamiento del terreno mediante compactación dinámica, y que consistía:

- Para superficies sometidas a esfuerzos ordinados (tráfico vial, conducciones subterráneas sensibles al asentamiento, zona deportiva etc.) se consideró que la mejora del terreno debía alcanzar golpes del DPSH-A $N_{20} \geq 15$.
- En la superficie ocupada por los edificios y cimentados mediante losas de cimentación con cargas de hasta 380kN/m^2 , se debían alcanzar golpes del penetrometro DPSH-A $N_{20} \geq 20$.

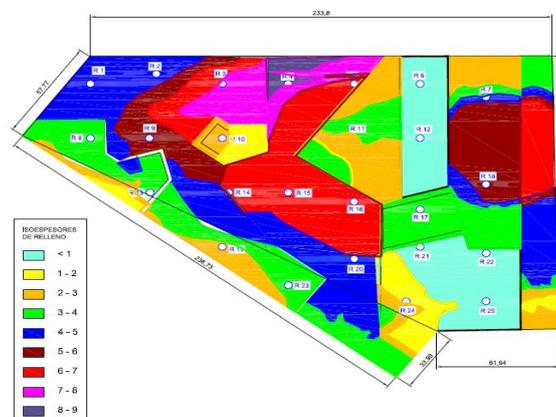


Figura 12. Plano de isoespesores "teóricos" de rellenos flojos

Durante las fases iniciales de calibrado se realizaron pruebas para controlar las vibraciones que podían llegar a las edificaciones próximas, con el objetivo de establecer la metodología más idónea. Se instalaron acelerómetros en todas las viviendas susceptibles a las vibraciones, para controlar a tiempo real durante todo el proceso de ejecución, que las velocidades de partículas se mantuvieran por debajo de los valores prefijados.



Figura 13. Auscultación de vibración edificios próximos

Se obtuvieron para el RIC, una frecuencia de propagación de las ondas de 20 a 30 Hz, con medidas de velocidades de partículas máximas de 2,4 a 2,7 mm/sg a la largo de las viviendas de la calle (muy por debajo del límite marcado según la norma DIN alemana de 5mm/sg, como posible umbral de daños ligeros). Tan solo, en el caso de la guardería, cuando el RIC se situaba a una distancia de menos de 5m, los sensores del muro de hormigón del cerramiento obtenían velocidades de 10 a 15 mm/sg. Para minimizar el riesgo, se llevó a cabo junto al muro de cerramiento una zanja superficial para evitar producir ningún tipo de daño en dicho muro.



Figura 14. Vista panorámica de la edificación durante la fase de construcción

4. CONCLUSIONES

Actualmente, y con un claro incremento con el tiempo, el suelo cada día es más escaso, y es necesario actuar en zonas donde la ingeniería se topa muy a menudo con la problemática de reutilización y acondicionamiento de zonas de rellenos marginales en la periferia de las ciudades y en zonas ganadas al mar.

En este contexto, las diferentes técnicas de compactación del terreno (compactación dinámica, sustitución dinámica y RIC), muestran claramente su aplicación ideal, adaptándose en todo momento a las exigencias económicas, técnicas y temporales de los proyectos.

La evolución de dichas técnicas, así como los controles geotécnicos y su interpretación, permiten aplicar estos tratamientos con garantía a largo plazo, pudiendo sobre ellos cimentar superficialmente de una manera segura ciertas edificaciones con cargas moderadas.

El mayor número de obras llevadas a cabo por Menard España en la península han consistido en la recuperación de espacios ocupados por vertederos incontrolados y escombreras para desarrollos urbanísticos. Estos rellenos son siempre muy heterogéneos y erráticos siendo necesario un seguimiento continuo del comportamiento del terreno para optimizar el procedimiento de compactación.

La compactación dinámica es la técnica por excelencia para mejorar este tipo de terrenos donde la mayor problemática geotécnica es la heterogeneidad.

La existencia de edificaciones próximas no es una limitación y simplemente se requiere de un control e instrumentación, pudiendo, tal y como se ha mostrado en este artículo, ejecutarse de manera viable en entornos urbanos.

5. AGRADECIMIENTOS

MENARD ESPAÑA agradece la colaboración en todo momento de las ingenierías involucradas en las fases previas de anteproyecto y proyecto de cada una de las obras, así como a las empresas constructoras de las mismas.

6. REFERENCIAS

- [1] ANA BIELZA FELÍU. Manual de Técnicas de Mejora del Terreno. Ed.: Carlos López Jimeno.
- [2] BRE, Spcifying Dynamic Compaction, Ed. Bre publications, 2003.
- [3] ISSMEG-TC211 International Symposium on Ground Improvement IS-GI, Brussels, 31&1 June, 2012. Sección 1- Vibro and Impact Compaction.
- [4] 9º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica "Cimentaciones y excavaciones profundas", Sevilla de 17 a 19 de Octubre 2012. "Aplicaciones recientes de la técnica de compactación/sustitución dinámica en el campo de las cimentaciones industriales"
- [5] 10º Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica "Reconocimiento, tratamiento y mejora del Terreno" A Coruña 19 a 21 de Octubre de 2016. "Aplicación de las técnicas de compactación dinámica en entornos urbanos".