

Recuperación y tratamiento mediante Compactación Dinámica de rellenos antrópicos

Desarrollos urbanísticos en los cinturones de las ciudades. Caso práctico del sector APD21 en la ciudad de Alicante

En este artículo se expone la recuperación y tratamiento por medio de la técnica de *Compactación Dinámica* de rellenos antrópicos como terrenos de cimentación de los futuros viales y redes, describiendo los resultados y el procedimiento de ejecución llevado a cabo en el caso de la recuperación de un espacio como suelo industrial en el alfoz de la ciudad de Alicante; donde se acumulan importantes extensiones de rellenos antrópicos sin clasificar, de naturaleza totalmente heterogénea y muy cambiante de unas zonas a otras, con espesores muy variables con zonas puntuales de hasta 16 m.

La compactación dinámica es probablemente la técnica de mejora del terreno más antigua que existe; pero el verdadero reconocimiento como método ingenieril de mejora de suelos, se relaciona con el ingeniero francés *Louis Menard* a principios de los años 70 del siglo pasado.

Desde entonces y hasta la actualidad se ha ido convirtiendo en una técnica que se utiliza en un amplio campo que va desde mejoras en terrenos con problemas de licuefacción hasta recuperación de zonas y espacios en las grandes ciudades donde existen importantes extensiones de escombreras y vertederos de residuos inertes.

La compactación dinámica se comenzó a emplear en rellenos y suelos granulares naturales. Actualmente, con la experiencia acumulada por la empresa **Menard** con más de 30 Mm² tratados a lo largo de todo el mundo, se puede ampliar el campo de aplicación de la técnica a un mayor número de terrenos, habiendo demostrado su eficacia en terrenos sensiblemente arcillosos.

Donde la compactación dinámica prácticamente no tiene competencia en cuanto al grado de mejora que se alcanza con relación a otras técnicas, es en la compactación de rellenos urbanos e industriales, así como pedraplenes; es decir, terrenos con un comportamiento muy heterogéneo y con existencia de macrohuecos.

En los últimos años, se han llevado a cabo en España numerosas obras de esta naturaleza que han permitido comprobar que se trata de un método de mejora con garantías de resultados, y que permite posteriormente albergar cualquier tipo de desarrollo urbanístico, así como la cimentación superficial de determinadas instalaciones y edificaciones.

Fundamentos de la técnica

El principio de funcionamiento es bastante básico, y consiste en compactar el terreno mediante el golpeo de una masa que impacta en

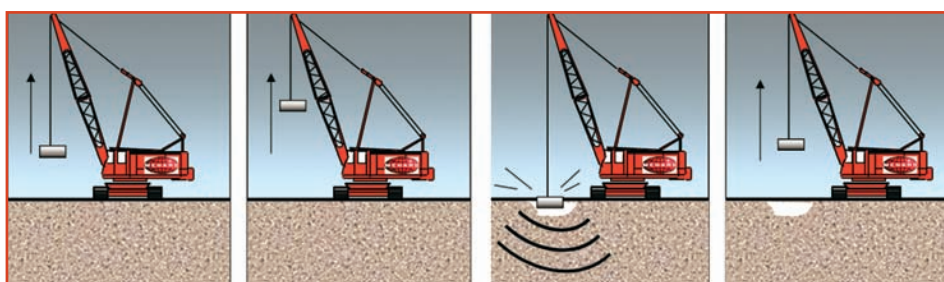
Palabras clave: ACONDICIONAMIENTO, ANTRÓPICO, COMPACTACIÓN DINÁMICA, GOLPEO, MASA, RELLENO, TERRENO.

 **Teresa PÉREZ RODRÍGUEZ,**
ICCP. Directora (*)
Juan C. MONTEJANO, Geólogo.
Dpto. Técnico (*)
José A. ESPINOSA, ICCP. Jefe Explotación (*)
(*) MENARD ESPAÑA

el terreno dejándola caer desde una determinada altura. El método se puede asimilar al ensayo Proctor en laboratorio, con la diferencia de que se aplica en obra y que la energía de compactación es considerablemente mayor.

En los comienzos de la aplicación de la compactación dinámica la energía de compactación se distribuía uniformemente por toda la superficie. Con el tiempo se llegó a la conclusión de que se obtenían mejores resultados concentrando esta energía en determinados puntos y mediante varias fases de golpeo.

El dimensionamiento de esta técnica consiste en definir el número óptimo de golpes por punto, separación entre ellos, número de pasadas y tiempos de espera entre fases de golpeo para la disipación de las presiones intersticiales que se generen. En la **Fig. 1** se muestra el proceso de ejecución de la compactación dinámica.



[Figura 1] .- Esquema del proceso de ejecución de la compactación dinámica.



[Fig. 2] .- Compactación dinámica en las Cocheras del metro ligero en Madrid.

No existen criterios comúnmente reconocidos para evaluar todos estos parámetros, y resulta muy difícil saber de antemano la energía necesaria a aplicar para obtener un determinado grado de mejora, ya que depende de un gran número de factores que condicionan la efectividad del tratamiento.

Por ello, en la práctica, cuando se va a acometer una obra con esta técnica, independientemente de su magnitud, es imprescindible llevar a cabo tramos de prueba que permitan establecer el procedimiento de mejora a seguir en función de la respuesta del terreno a los impactos a los que se somete al terreno.

La compactación dinámica, como se ha indicado anteriormente, depende de numerosas variables que condicionan su capacidad de

mejora. A título orientativo, se suele fijar el umbral de compactación a resistencias en la penetración del cono estático de 10 a 12 Mpa, que permiten conseguir cargas admisibles de hasta 3 kp/cm².

En terrenos naturales predominantemente granulares, los asentamientos superficiales inducidos tras un tratamiento de compactación varían generalmente del 3 al 10% del espesor del terreno sometido a tratamiento, sin embargo se alcanzan valores del 5 al 15% en el caso de rellenos antrópicos urbanos e industriales.

A partir de esta técnica de mejora, desde un punto de vista geotécnico, se producen los siguientes efectos:

- Inmediata densificación de los suelos más granulares, por la propia recolocación de las partículas.
- Disipación de las presiones intersticiales debido a la formación de una verdadera red de drenaje, favorecida por el grado de licuefacción del terreno y por el hecho de que la permeabilidad del terreno crece con el aumento de dicho grado de licuefacción.
- Incremento progresivo de la resistencia al corte del terreno en paralelo a la disipación de las presiones intersticiales.

La creación de este terreno densificado permite que se pueda cimentar superficialmente y con seguridad edificaciones e instalaciones industriales, ya que se producen los siguientes efectos:

- Reducción de los asentamientos absolutos y diferenciales. Homogenización en el comportamiento.
- Aumento de la capacidad portante, con valores admisibles para instalaciones y edificaciones con cargas moderadas.
- Control de posibles asentamientos por fenómenos de colapso, inducción de los asentamientos por existencia de macrohuecos.
- Mejora del terreno frente al riesgo de licuefacción.

Situación y antecedentes de la actuación

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.

Dicha actuación representa la urbanización del último reducto de suelo industrial libre en la ciudad de Alicante. El proyecto de urbanización de los más de 338.000 m² de suelo industrial se sitúa junto a *Mercalicante* y se extiende hasta la avenida del Puerto y el camino viejo de Elche. Lo presentó al Ayuntamiento la empresa *Mercacombustible, S.L* y, la construcción y acondicionamiento, lo ha llevado a cabo, entre los años 2010 y 2012, la *UTE*

Mercacombustible. El proyecto de urbanización, de 176.000 m², contempla la construcción de viales e instalaciones así como de edificaciones abiertas con una altura máxima de cuatro plantas o 16 m e inmuebles para servicios.

La problemática geotécnica de dicha zona está directamente relacionada con los terrenos y rellenos que conforman el *Barranco de las Ovejas* y la zona de *Mercalicante*, áreas con las que linda el sector *APD21* (Fig. 3).

En dicha zona se detectaron, desde fase de proyecto, rellenos antrópicos sueltos hasta profundidades de 14,0-16,0 m. Este hecho llevó a contemplar desde el inicio, 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.

En este marco se sitúa el tratamiento por medio de *Compactación Dinámica* que se describe en el presente artículo.

Descripción de la obra

La obra del acondicionamiento urbanístico *ADP21*, al situarse en el alfoz de la ciudad, ha servido durante varias décadas como zona de vertido de rellenos de explanaciones y obras diversas.

La campaña geotécnica que se llevó a cabo en fase de proyecto en el año 2003 identificó, en las zonas de los futuros viales y naves, espesores de rellenos que alcanzaban valores de 14,0-16,0 m.

La campaña de campo consistió en sondeos con extracción de muestras y ensayos *SPT* en su seno así como penetrómetros di-

námicos tipo *DSPH* (Fig. 4).

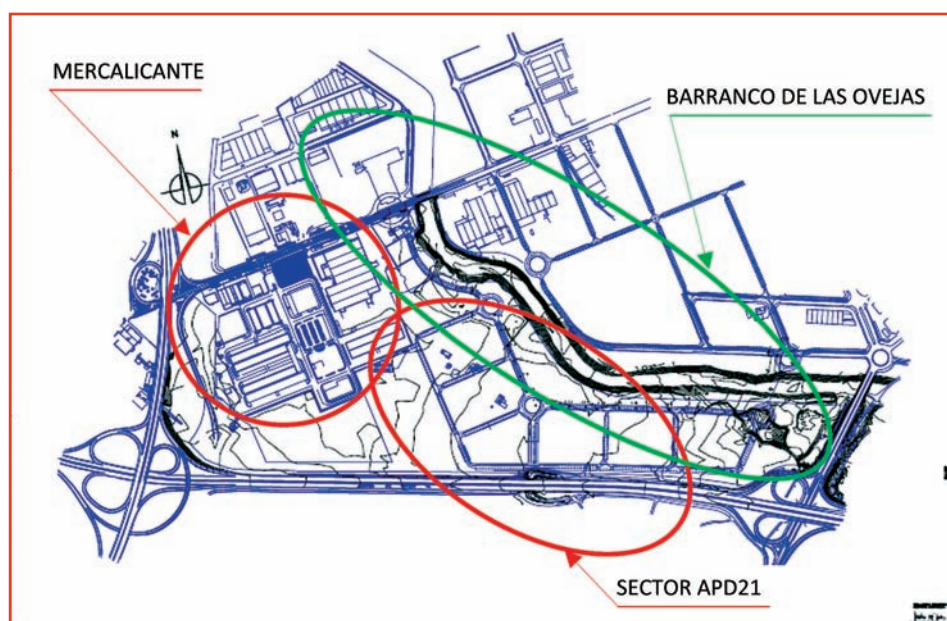
El espesor de dichos rellenos así como su compacidad resultaron heterogéneos, con numerosas zonas de rellenos muy flojos. No se identificó el nivel freático en ninguno de los ensayos ejecutados.

Con el fin de identificar las zonas que requerían un tratamiento de los terrenos de cimentación, se zonificaron los viales según los espesores de rellenos blandos (Fig. 5), zonificación que fue la base del tratamiento que a continuación se describe.

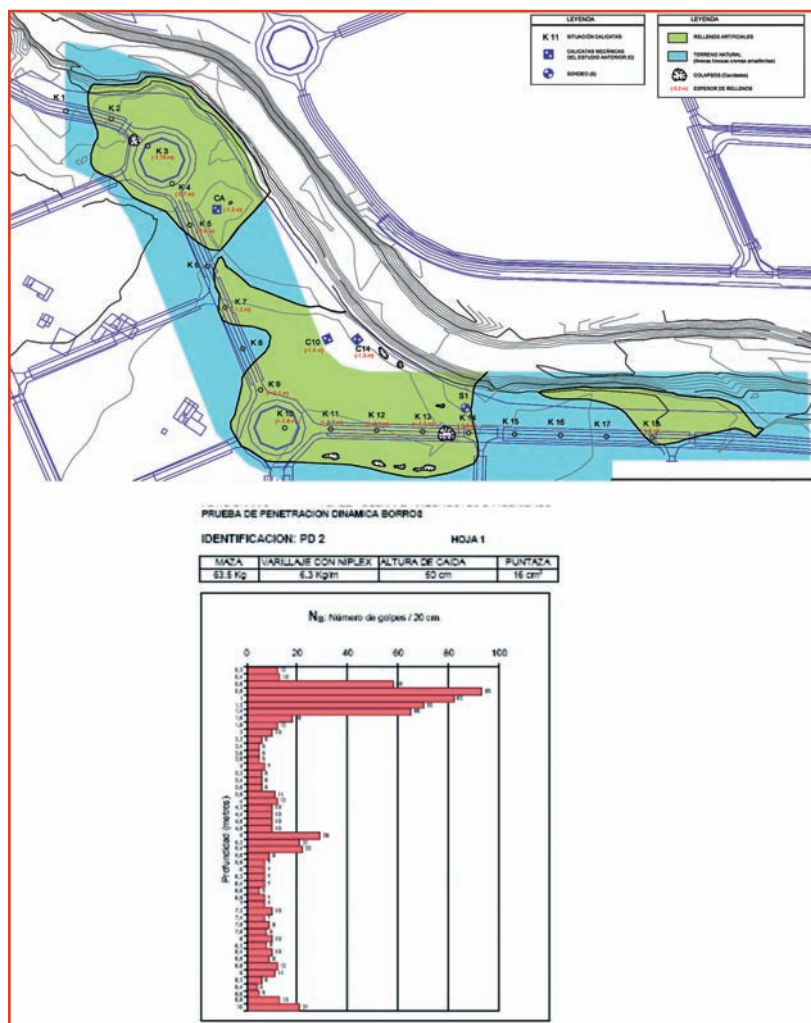
La heterogeneidad tanto en el espesor como en la compacidad y naturaleza de los rellenos, así como el carácter predominantemente granular, condujo a la elección de la *Compactación Dinámica* como el tratamiento más adecuado para el acondicionamiento de los terrenos de cimentación tanto de viales como de zonas de jardines.

Así, desde la fase de proyecto, se recomendó dicho tratamiento basado en la aplicación de una energía que se detalla en los siguientes apartados.

Se describe en este artículo el desarrollo de la obra, detallando la energía finalmente aplicada requerida por los rellenos, así como la adaptación del tratamiento a las diversas desviaciones en los espesores, compacidades y naturaleza de los rellenos que se atravesaron. Por otro lado, se demuestra que la Compactación Dinámica es una técnica predominantemente empírica de difícil predicción en cuanto a su diseño. La obra que nos atañe es un fiel reflejo de un proceso de tratamiento vivo y flexible que permite adaptarse en tiempo real a las necesidades del terreno en función de su respuesta.



■ [Figura 3] .- Ubicación del sector APD21.



[Figura 4] .- Campaña geotécnica en fase de proyecto y gráfica de uno de los penetrómetros ejecutados

Objetivos del tratamiento

Desde la fase de proyecto se planteó un tratamiento de *Compactación Dinámica* basado en dos tipos de intensidad:

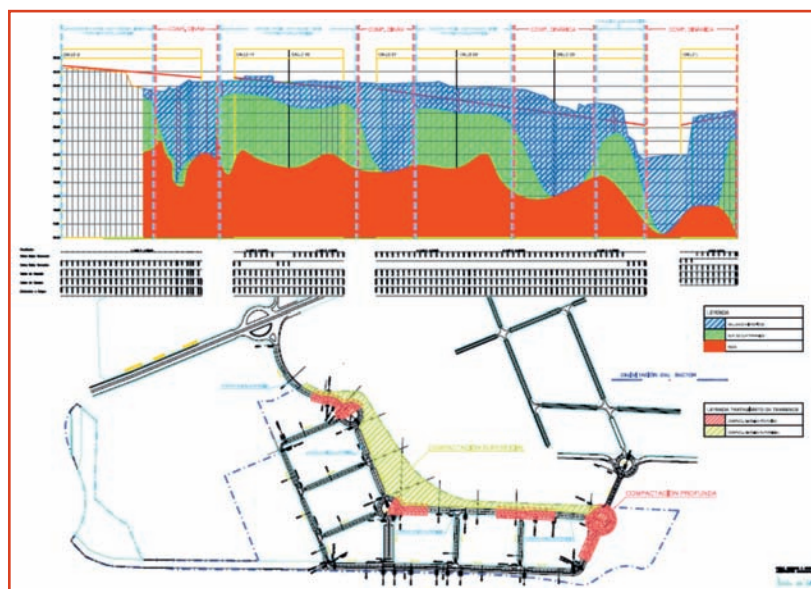
- *Compactación dinámica superficial* en zonas de rellenos con espesores inferiores a 5 m. La aplicación de dicha energía se realizaría mediante un equipo de compactación ligera tipo *R.I.C. (Rapid Impact Compactor)*. Energía unitaria de 60 a 70 t/m.
- *Compactación dinámica profunda* en zonas de rellenos donde los espesores oscilan entre 5-16m, aplicando para ello una energía unitaria de compactación comprendida entre 75 y 300 t/m² (*Tabla I*). Esta energía de compactación se aplicaría en tres pasadas sucesivas con una maza de 15 t. La última pasada se ejecutaría con el *RIC (Rapid Impact Compaction)*.

Basándose en dicha energía, el proyecto planteó la mejora a alcanzar según un incremento del golpeo del *SPT* en un valor de 10 respecto al golpeo inicial antes del tratamiento.

Menard España, basándose en la campaña geotécnica del proyecto y en las recomendaciones del mismo, planteó desde el inicio, basada en su experiencia, diversas cuestiones de desarrollo de la obra a tener en cuenta con el fin de trasladar a la misma, desde el arranque, los medios adecuados. En particular se plantearon las siguientes cuestiones:

- Para las zonas con espesores de rellenos blandos inferiores a 5,0 m donde se planteaba un tratamiento de compactación dinámica superficial por medio de equipos *RIC*, *Menard España* planteó el uso de equipos clásicos de compactación dinámica profunda con la aplicación de una energía unitaria de 200-250 t/m y una energía específica media de 150 t/m².
- Para las zonas con espesores de rellenos blandos entre 5,0 y 12,0 m, *Menard España* planteó el uso de equipos clásicos de compactación dinámica profunda con la aplicación de una energía unitaria de 400-500 t/m y una energía específica media de 250 t/m².

[Figura 5] .- Sectorización según espesor rellenos antrópicos flojos.



Tanda	W (ton)	H(m)	Lado de la malla (m)	Nº de Golpes	Energía Específica (m-ton/m2)
1	15	20	8	8	37,5
2	15	16	4	8	120
3	15	5	2	5	93,75
Energía específica total					251,25 ton x m / m2

[TABLA I] .- Energías de tratamiento previstas en fase de proyecto.

Dicho tratamiento permitiría, según experiencias en obras similares, garantizar los siguientes resultados del tratamiento:

- Zonas de *Compactación Dinámica Superficial* (rellenos de espesor inferior a 5,0 m):
 - o Homogeneización de los parámetros mecánicos de todo el espesor tratado con la consecuente reducción de los asentamientos diferidos y diferenciales.



- * Compactación Dinámica
- * Columnas de Grava
- * Sustitución Dinámica
- * Anclajes
- * Compaction Grouting

- * Columnas de Modulo Controlado
- * Menard Vacuum
- * Micropilotes
- * Soil Mixing
- * Drenes Verticales



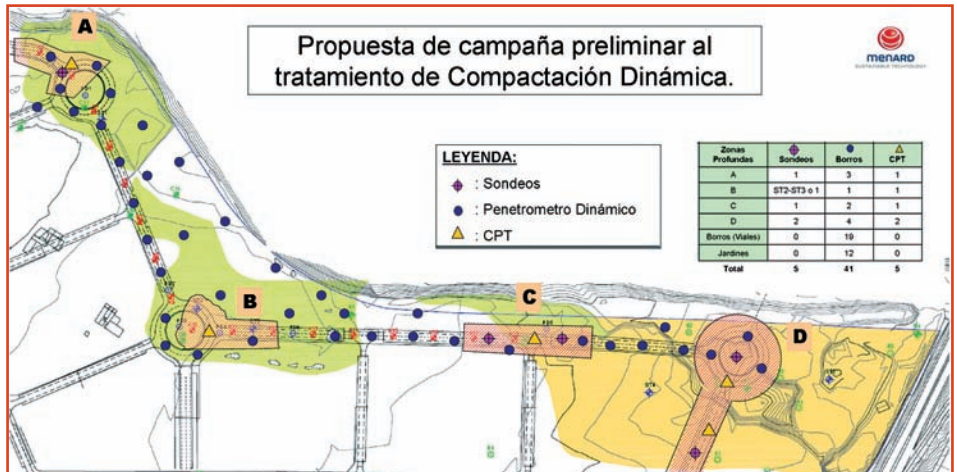
- **Obtención de valores superiores a $N_{30}=15$ en el espesor tratado** según un análisis cualitativo de la mejora producida por medio del análisis del golpeo de *DPSH* según valores medios* en el seno de los rellenos.
- **Zonas de Compactación Dinámica Profunda** (rellenos de espesor entre 5,0 y 12,0 m):
 - Homogeneización de los parámetros mecánicos de TODO el espesor tratado con la consecuente reducción de los asentos diferidos y diferenciales.
 - **Obtención de valores superiores a $N_{30}=15$ en los primeros 8,0-9,0 m y superior a $N_{30}=10$ entre 9,0 y 12,0 m en el espesor tratado** según un análisis cualitativo de la mejora producida por medio del análisis del golpeo de los ensayos de penetración de control a ejecutar tipo *DPSH* según valores medios* en el seno de los rellenos.
 - **Creación de una costra compacta en los primeros 8,0-9,0 m que permita la reducción y control de los asentos diferenciales.** La deformabilidad de dicha costra sería analizada por medio de un análisis cuantitativo basado en ensayos penetrométricos y/o tipo *CPTU* y/o presiométricos en el seno de los rellenos, así como basándonos en correlaciones obtenidas en obras ejecutadas de características similares.

Con el fin de poder llevar a cabo correctamente el análisis de la efectividad del tratamiento, *Menard España* ejecutó una campaña de ensayos complementarios previos al arranque de los trabajos (**Fig. 6**). Dicha campaña complementaria tuvo como objetivo la zonificación mas detallada de las zonas a tratar así como la obtención de datos de deformabilidad y golpeo en los rellenos como datos de partida para el análisis del tratamiento.

Finalmente la campaña preliminar consistió en sondeos de extracción con ensayos presiométricos en su seno y ensayos penetrométricos tipo *DPSH*.

Los datos que se obtuvieron de esta campaña de reconocimiento confirmaron la identificación de rellenos blandos de espesores muy variables a lo largo de todos los viales y zonas de jardines.

(*) Como valor medio se entienda la media horizontal (aritmética) de los valores de golpeo de los *DPSH* ejecutados, agrupados según zonas de diferente naturaleza. (Los resultados de dichos ensayos se correlacionaron con el valor de *SPT* (criterio de control del tratamiento indicado en proyecto) por medio de un incremento de éste en un 20% respecto al valor N_{20}).



■ [Figura 6].- Campaña complementaria ensayos previos propuesta por Menard.

Tramo de pruebas. Dimensionado de la solución

Acorde a la metodología de trabajo que sigue *Menard España* en todas sus obras de Compactación Dinámica, se definió, en el arranque de los trabajos, la ejecución de varias zonas de ensayos, según zonas de tratamiento superficial o profundo, con el fin de acotar la energía a aplicar y la efectividad del tratamiento.

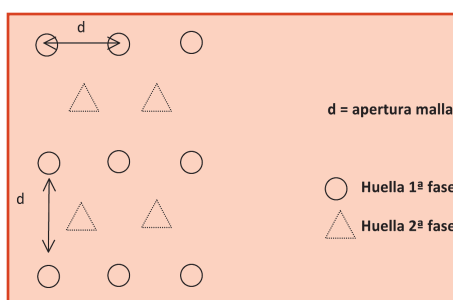
Partiendo por tanto del análisis de los datos de la campaña geotécnica complementaria, se decidió ejecutar mallas en diversas zonas de amplitud 4 x 4m y 5 x 5m con una única fase de golpeo y 7 x 7m con dos fases intercaladas. Dichas zonas de ensayos se dispusieron en un área preparada para ello, donde se replantearon 9 huellas por malla (**Figs. 7 y 8**).

En dichas zonas de ensayos se llevaron a cabo los siguientes controles:

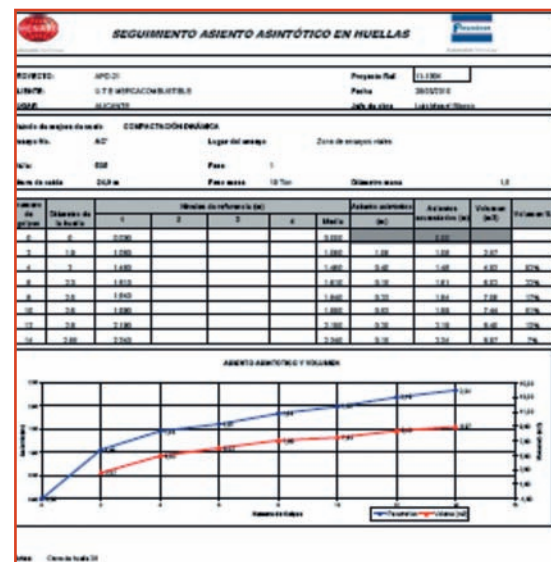
- Control asintótico del asiento en huella con el fin de acotar el golpeo óptimo a aplicar según el espesor. Se adjunta en la siguiente figura una ficha de control de dicho asiento (**Fig. 9**).
- Control asiento circundante a la huella /concavidad/convexidad) con el fin de concretar la apertura de malla (**Fig. 10**).
- Control de la profundidad, diámetro y volumen de cada huella (**Fig. 10**).
- Ensayos de control mediante penetrometros dinámicos tipo *DPSH*. o Ensa-



■ [Figura 8].- Vista aérea zona de ensayos.



■ [Figura 7].- Esquema zona de ensayos.



■ [Figura 9].- Gráfica de control asintótico de asentos en huella

yos de control de tipo presiométrico en el seno de dos sondeos de extracción.

De ese modo, con la ejecución de las zonas de ensayos descritas, se observaron los siguientes fenómenos:



[Figura 10].-
Huellas en
zona de
ensayos.



[Figura 11].-
Control
topográfico
en zona de
ensayos.



[Figura 12].-
Vista
general de
la obra.

- Efectividad en la zona de compactación dinámica superficial según la aplicación de una malla de apertura 4,0 x 4,0 m en una única fase.
- En zonas de tratamiento superficial, obtención de valores $N_{30} > 15$ en todo el espesor tratado de 5,0 m.
- Efectividad en la zona de compactación dinámica profunda según la aplicación de una malla de apertura 5,0 x 5,0 m en una única fase.
- En zonas de tratamiento profundo, la creación de una costra consistente con valores $N_{30} > 15$ en todo momento hasta 8-9,0 metros de profundidad y valores $N_{30} > 10$ en todo momento hasta 12,0 metros de profundidad.
- Obtención de resultados no interpretables en los ensayos presiométricos realizados. La heterogeneidad de los rellenos, así como de los restos de construcción y bolos en su seno, impidieron la deformación homogénea de la sonda del ensayo.
- Descompresión del primer metro debido a la metodología de trabajo. Éste deberá ser tratado compactando a continuación el fondo por medio de medios mecánicos.
- El alcance correcto de los objetivos prefijados.

En función de estas zonas de ensayos y de los fenómenos observados en ellas, se definió

el procedimiento de ejecución para el resto de la superficie:

a) Zona de compactación profunda

- Malla única de apertura 5 m. Densidad por tanto de 1 huella/25,0 m².
- Energía unitaria: 485 txm.
- La energía específica media dada con dicha metodología sería de 330 txm/m².
- De 12 a 26 golpes por huella según la zona con aporte de material granular de la plataforma (2-3 cazos) y 2-3 golpes de cierre final de menor energía.

b) Zona de compactación superficial:

- Malla única de apertura 4 m. Densidad por tanto de 1 huella/16,0 m².
- Energía unitaria: 225 txm.
- La energía específica media dada con dicha metodología sería de 183 txm/m².
- De 14 a 19 golpes por huella según la zona a tratar con aporte de material granular.

Dicha metodología fue sufriendo variaciones según el avance de la obra, en función de las peculiaridades y respuesta del terreno de las zonas atravesadas.

Desarrollo de la obra

El conjunto de la obra (Fig. 12) se desarrolló, por tanto, según las pautas establecidas en las zonas de pruebas indicadas anteriormente.

Se zonificó el área a tratar según el código alfabético asignado a los viales por la UTE.

En el cuadro de la **Tabla II** y **Figs. 13 a 15**, se exponen las energías unitarias y específicas aplicadas, concluyendo con un cuadro comparativo (**Tabla III**) entre las energías finalmente aplicadas y las previstas en el proyecto. Se observa un considerable incremento de la energía unitaria y específica que fue necesario aplicar para alcanzar los objetivos prefijados y densificar el conjunto de los rellenos que se destacaron como muy flojos.

Algunas de las desviaciones respecto a proyecto que se detectaron, y que conllevaron la modificación de la metodología inicialmente prefijada, así como el incremento de energía aplicada, fueron como ejemplo los siguientes:

- En ciertos viales con compactación dinámica profunda, tras una serie de ensayos tras la primera fase de tratamiento, se pudo constatar que los rellenos eran mas flojos que lo previsto, lo que obligó al cierre de la malla pasando a una apertura de 4x4 m en lugar de los 5x5 m iniciales, así como a pre-excavar en cada huella según una magnitud de 2-3m con el fin de aumentar la energía transmitida al terreno.
- En algunas zonas de tratamiento con compactación dinámica profunda se detectaron materiales plásticos en superficie (3-4 m) que provocaban un efecto vento-

Zona	TIPO DE COMPACTACIÓN	Golpeo medio	Masa (ton)	Altura (m)
Calle Ñ	PROFUNDA	16	19,5	24
Calle Ñ	SUPERFICIAL	14	19,5	12
Calles H1 y H2	PROFUNDA	16	19,5	24
Calle N	PROFUNDA(4x4)	18	19,5	24
Calle N	SUPERFICIAL	15	19,5	12
Calle G2	PROFUNDA	20	19,5	24
Calle G2	SUPERFICIAL	12	19,5	12
Calle D1	PROFUNDA FASE 1	19	19,5	24
Calle D1	PROFUNDA FASE 2	19	19,5	24
Calle R	SUPERFICIAL FASE 1	14	19,5	12
Calle R	PROFUNDA FASE 2	19	19,5	24
Calle R	PROFUNDA FASE 3	19	19,5	24
Calle L	PROFUNDA	15	19,5	24
Calles D3 y K	PROFUNDA FASE 1	15	19,5	24
Calles D3 y K	PROFUNDA FASE 2	19	19,5	24

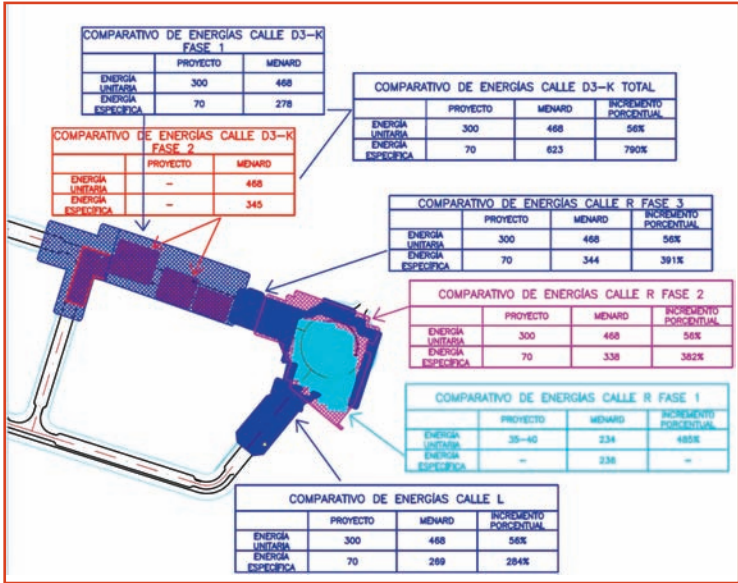
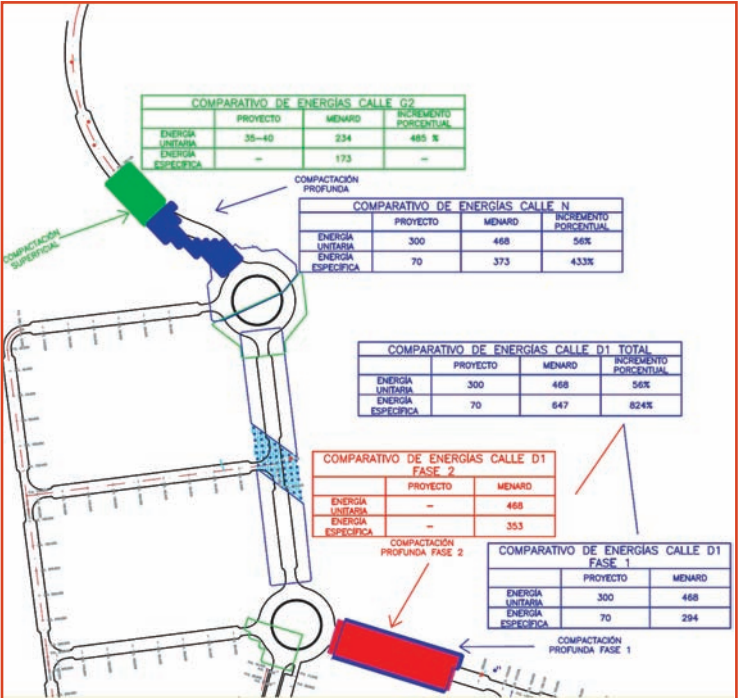
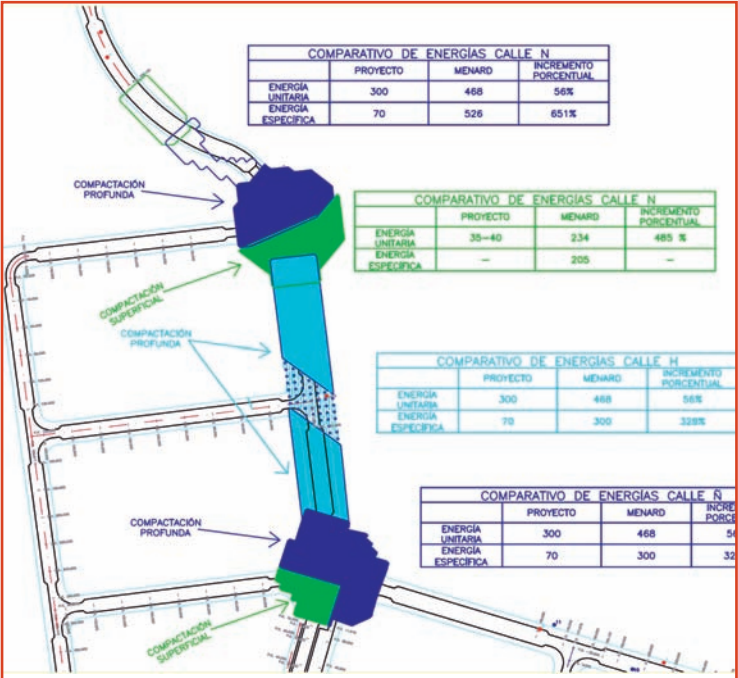
[TABLA II] .- energía unitaria aplicada por zonas.

TIPO DE COMPACTACIÓN	Energía unitaria de proyecto(txm)	Energía unitaria MENARD (txm)	INCREMENTO PORCENTUAL ENERGÍA UNITARIA RESPECTO PROYECTO %	Energía específica media de proyecto (txm/m2)	Energía específica media MENARD (txm/m2)	INCREMENTO PORCENTUAL ENERGÍA ESPECÍFICA RESPECTO PROYECTO %
PROFUNDA	300	468	+56%	70	300	+328%
SUPERFICIAL	RIC = 35-40	234	+485%	-	205	-
PROFUNDA	300	468	+56%	70	300	+328%
PROFUNDA(4x4)	300	468	+56%	70	526	+651%
SUPERFICIAL	RIC = 35-40	234	+485%	-	219	-
PROFUNDA	300	468	+56%	70	373	+433%
SUPERFICIAL	RIC = 35-40	234	+485%	-	173	-
Profunda fase 1	300	392	+30%	70	294	+320%
Profunda fase 2	0	468	-	-	353	-
PROFUNDA TOTAL	300	468	+56%	70	647	+824%
SUPERFICIAL fase1	RIC = 35-40	234	+485%	-	236	-
PROFUNDA fase 2	300	468	+56%	70	338	+382%
PROFUNDA Fase 3	300	468	+56%	70	344	+391%
PROFUNDA	300	468	+56%	70	269	+284%
Profunda fase 1	300	468	+56%	70	278	+297%
Profunda fase 2	0	468	-	-	345	-
PROFUNDA TOTAL	300	468	+56%	70	623	+790%

[TABLA III] .- Energía unitaria y específica aplicadas.

[Figura 13].- Esquema energías aplicadas calles N, H1, H2 y N.

[Figura 14].- Esquema energías aplicadas calles G2, y D1.



[Figura 15] .- Esquema energías aplicadas calles R, L, D3 y K.

sa en la masa. Este efecto obligó, en primera instancia, a elevar la masa a una altura menor de 18-20 m (4 m menos de los previstos) rellenando al mismo tiempo las huellas con material granular de la plataforma. Una vez terminada y controlada esta zona se comprobó que la energía no había conseguido traspasar una capa dura presente a unos 5-6 m de profundidad. Se decidió por tanto proceder a una segunda fase de la misma amplitud que la anterior (5x5 m), e intercalada con la primera fase con pre-excavación en cada huella de 2-3 m, para reducir el espesor de los lentejones plásticos, y golpeo a 24-25 m de altura de caída. La unión de ambas fases consiguió los resultados esperados de mejora del terreno.

- En otras zonas, el fenómeno detectado consistió en la existencia de capas intermedias de residuos de construcción con grandes bolos que amortiguaban la energía, a unos 5-7 m de profundidad. En estos casos se golpeó en una segunda fase, de la misma amplitud que la anterior (5x5 m), e intercalada con la primera fase con una pre-excavación en huella de 2-3 m. Tras esta 2ª fase se confirmó la mejora, obteniendo los parámetros previstos tras el tratamiento.

Estas anomalías se detectaron en aproximadamente el 50% de la superficie tratada.

Control y seguimiento durante y tras el tratamiento

Para el control del tratamiento, *Menard* ejecutó cerca de 100 ensayos penetrométricos tipo *DPSH* y 5 ensayos *CPT*.

Los resultados están basados en la campaña geotécnica de control ejecutada por *Menard*. Dichos resultados fueron confirmados *a posteriori* en su totalidad por la campaña de control por parte de la UTE llevada a cabo por la empresa *ITC*.

El análisis de la efectividad del tratamiento se llevó a cabo por dos métodos:

- En primera instancia se estableció una comparativa cualitativa entre los ensayos penetrométricos previos y posteriores al tratamiento.
- Y, en segunda instancia, se correlacionaron los ensayos obtenidos, basándonos para ello en obras anteriormente ejecutadas, para obtener la deformabilidad equivalente de los rellenos tratados y estimar los posibles asentos futuros tanto en fase de explotación como por una saturación del terreno debido a una subida del nivel freático.

El análisis se desarrolló en todo momento agrupando zonas de comportamiento similar, partiendo de la zonificación inicial según los di-

ferentes viales tratados. Cabe destacar los siguientes comentarios sobre los resultados obtenidos:

- En toda la superficie tratada se produjo un descenso global medio de la parcela de aproximadamente 40 cm.
- En algunas zonas, como por ejemplo el *vial D1*, tal y como se ha comentado anteriormente, se ejecutó el tratamiento en dos fases debido a un mayor espesor y plasticidad de los rellenos detectados. En la **Fig. 16** se muestran los resultados de los ensayos de control ejecutados en dicha zona. Se observa como tras la primera fase de compactación, la mejora del terreno se disipa a partir de los 5-6 m por el efecto sombra de un paquete compacto y plástico a esa profundidad. Esto llevó a la ejecución de una segunda fase con pre-excavación en huellas de 2-3 m y golpeo a 24-25 m de altura de caída. Tras una nueva campaña de ensayos de control al concluir la segunda fase de tratamiento se obtuvieron los resultados satisfactorios que se muestran en dicha figura.

Se observa que, tras la segunda fase y la excavación de 3 m se obtuvo un golpeo N_{20} superior a 15 hasta -9,0 m de profundidad confirmando el tratamiento de la capa blanda intermedia entre los 6 y los 9 metros.

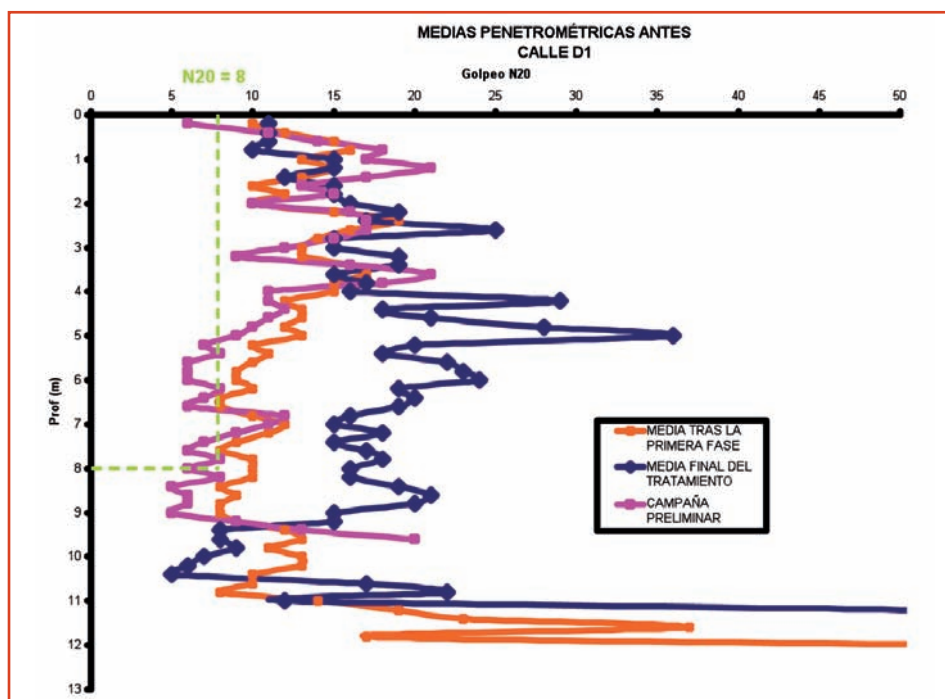
Es necesario comentar que la bajada del golpeo entre los -9,5 y los -10,5 m de profundidad proviene de la transición con el terreno natural del sustrato consis-

te en limos arcillosos húmedos. La frontera física que significa dicho cambio de naturaleza (entre los rellenos y el terreno natural), así como el estado de saturación del terreno natural provocó la aparición de los siguientes fenómenos:

- o Amortiguación de la energía, siendo muy reducido el efecto de la densificación en dicho terreno.
- o Densificación despreciable de los limos arcillosos saturados debido a su estado de humedad.

No obstante, el sustrato natural de limos arcillosos no presenta riesgo de colapso debido a su estado ya saturado y a su origen natural y no artificial (rellenos).

- En general, toda la campaña de ensayos penetrométricos ejecutados en el total de la zona tratada mostró resultados satisfactorios acordes a los objetivos prefijados.
- El análisis de deformabilidad se llevó a cabo en varias partes. Es muy difícil correlacionar el golpeo de cualquier ensayo penetrométrico con el módulo de deformabilidad de rellenos ejecutados por el hombre como los que nos conciernen. Las correlaciones existentes en la bibliografía se refieren en su mayoría a terrenos naturales sin intervención humana. Para estos casos, la mejor metodología consiste en utilizar los datos reales de asentos y comportamiento de rellenos medidos en obras ejecutadas. Así, *Menard España* aportó la experiencia en obras recientes similares con una energía similar donde, tras la eje-



[Figura 16].- Comparativo de medias penetrométricas antes/ después fase 1 /después fase 2 en la calle D1.

cucción de multitud de ensayos penetrométricos y presiométricos, y de áreas de ensayo a escala real instrumentadas, se estableció, la siguiente correlación:

$$E_y \text{ equivalente de los rellenos tratados } (kg/cm^2) = 25 * N_{20} (DPSH).$$

Todos los ensayos y mediciones ejecutadas antes/durante y después de la obra confirmaron dicha correlación.

Otra experiencia nacional de naturaleza similar, según los resultados medios obtenidos en el seno de todo el relleno tras el tratamiento, medidos respectivamente con ensayos CPTU y presiométricos se obtuvieron, a 4,0-5,0 m de profundidad, los siguientes valores:

$$q_c = 60-70 kg/cm^2$$

$$E_m = E_y = 325 kg/cm^2.$$

Considerando la correlación de Cassan de q_c (MPa) = 0,1 a 0,6 N_{30} según naturaleza granular a arcillosa, y tomando el valor medio representativo de ambas naturalezas, $q_c = 0.35 N_{30}$, se constata con este análisis que en dichos rellenos granulares, unos valores medidos con ensayos de q_c de 60 kg/cm² y E_m de 325 kg/cm² equivalen a $N_{30} = 17$, lo que significa $N_{20} = 14$, estando en el mismo orden de magnitud que las correlaciones obtenidas en tratamiento similares de rellenos antrópicos llevados a cabo por Menard en el pasado. Se procedió por tanto a utilizar la correlación:

$$E_y (kg/cm^2) = 25 * N_{20}$$

De ese modo, se llevó a cabo el análisis de los asientos futuros de los rellenos tratados con la siguiente relación matemática:

$$\Delta h (cm) = q (kg/cm^2) \cdot \frac{H(cm)}{E_{y \text{ equivalente}} (kg/cm^2)}$$

Con:

- Δh = asiento absoluto esperable en los rellenos.
- q = carga futura de tierras y explotación, la cual se consideró como 2,0 t/m² al eliminar 50 cm superficiales tras el tratamiento, disponer 100 cm máximo de paquete de vial y mezcla bituminosa y considerar una carga de tráfico de 1 t/m².
- H = espesor total de rellenos tratados.
- E_y = Módulo equivalente resultante de:

$$\frac{\sum h_i}{E_{y \text{ equivalente}}} = \sum \frac{h_i}{E_{yi}}$$

siendo:

- h_i = espesores de capas con golpeo medio similar cuya suma representa un

valor deformable mínimo entre 12,0 y 14,0 m.

- E_{yi} = módulo de deformabilidad en cada capa con N_{20} similar obtenido de la correlación: $E_y (kg/cm^2) = 25 * N_{20}$

Como N_{20} equivalente se consideró el golpeo armónico equivalente con un máximo de 15 hasta 8,0 m de profundidad y 10 hasta 12,0 m de profundidad. Este hecho aportó un criterio conservador al haber obtenido golpes armónicos en dichas franjas claramente superiores a los valores de 15 y 10 respectivamente.

El análisis de asientos futuros arrojó en todo momento valores inferiores a 1,50 cm.

De igual modo, se procedió a analizar los posibles asientos por colapso ante futuras subidas de la lámina de agua.

Para ello, se consideraron las siguientes hipótesis:

- o Al igual que la caracterización de la deformabilidad de rellenos antrópicos, no es evidente establecer criterios de colapso en este tipo de terrenos. El grueso de la bibliografía sobre este fenómeno está basada en terrenos granulares naturales. Así, el análisis se llevó a cabo basándonos, tanto en experiencias y conclusiones en obras similares del pasado como en la correlación entre el valor N_{spt} y el ensayo CBR de la Norma de firmas de la red de carreteras de Andalucía (Tabla IV). En dicha Norma se admite un material con CBR = 5 como uso para material de coronación de carreteras, con CBR = 3 como uso como núcleo y con CBR = 2 como no utilizable. Esta aceptación nos lleva por tanto a concluir que un material

que presente un valor $N_{spt} > 12$ se puede considerar como apto y no colapsable.

- o En el caso de valores N_{30} comprendido entre 10 y 12, se ha tomado como hipótesis, **de un modo conservador** y basado en experiencias en obras similares con resultados satisfactorios, que tras una inundación el módulo de deformabilidad equivalente de dicho estrato pueda reducirse a la mitad.
- o En los estratos con $N_{30} < 10$, se ha tomado igualmente como hipótesis que el módulo de deformabilidad equivalente de dicho estrato se divide por 10 en el caso de una inundación a dicha profundidad.

Con ello se calcularon los asientos máximos esperable en el caso de inundaciones no superando en ningún momento los 2,50 cm.

Resumen y conclusiones

- La Compactación Dinámica es una técnica de tratamiento del terreno eminentemente empírica y difícil de acotar en fase de proyecto. Debido a ello, es recomendable siempre realizar una zona de ensayos al comienzo de la actuación con el fin de acotar los parámetros del tratamiento. Asimismo, es imprescindible un correcto seguimiento de los trabajos con el fin de adaptarlo a los requerimientos del terreno.
- En la obra descrita en el presente artículo, las conclusiones que se extrajeron fueron las siguientes:
 - o La **energía unitaria** finalmente utilizada estuvo comprendida según las (compactación superficial o profunda) entre 234 t/m y 468 t/m.
 - o La **energía específica** finalmente utilizada estuvo comprendida entre 173 t/m/m² y 647 t/m/m².
 - o Los **resultados** obtenidos en los ensayos de control alcanzaron claramente, en toda la zona tratada, los objetivos de golpeo definidos: media de N_{30} (SPT) de 15 en los primeros 8 m y media de N_{30} (SPT) de 10 hasta 10-12 m.
 - o La **deformabilidad** de los rellenos tras el tratamiento, basada en los golpes obtenidos, permite garantizar un asiento absoluto en los rellenos en fase de explotación inferior a 1,50-2,0 cm.
 - o Asimismo, el golpeo medio N_{30} superior a 15 en los primeros 8,0 m garantiza la ausencia de riesgo de **colapso** en dicho espesor. En el espesor comprendido entre 8,0 y 12,0 m, el golpeo medio N_{30} de 10-15 obtenido garantiza una **influencia despreciable en la integridad de los viales en el caso de inundación que reduzca significati-**

CBR	N _{SPT}	
	MATERIAL GRANULAR	MATERIAL COHESIVO
0,2	< 5	< 2
2	10	5
3	12	7
5	15	10
10	20	15
20	25	17
30	30	20

[TABLA IV] .- Norma de firmas de la red de carreteras de Andalucía. Correlación CBR-Nspt.

Cimentación

cativamente la compacidad de éstos.

- o Las desviaciones detectadas en la cuantía de energía aplicar no significaron desviación alguna ni en coste ni en plazos.

Agradecimientos

Menard España agradece la colaboración en todo momento de las ingenierías involucradas en las fases previas de ante-proyecto y proyecto así como a *Mercacombustible S.L.*, a la *UTE Mercacombustible* (Cívica Construcción, Enrique Ortiz e Hijos y *Lubasa*) y a la empresa de control *ITC* por sus aportaciones y por el trabajo conjunto.

Bibliografía

- ANA BIELZA FELIÚ. *Manual de Técnicas de Mejora del Terreno*. Ed.: Carlos López Jimeno.

- URIEL&ASOCIADOS. *Informe sobre la revisión del informe 2º de Menard. Estimación del módulo de deformación de los rellenos tras el tratamiento de Compactación Dinámica. Cimentación de Edificios anexos al hotel Vela. Puerto de Barcelona. Ute Nova Bocana.*
- MARCELO J.DEVINCENZI (IGEOTEST, S.L.) Y TERESA PÉREZ RODRÍGUEZ (FREYSSINET, S.A.). *Densificación de un relleno granular por medio de Compactación Dinámica: Ejecución y Control. Planta de regasificación de GNL en el Puerto de Barcelona.*
- MENARD ESPAÑA. *Informe final del Tratamiento de Rellenos por medio de Compactación Dinámica en las Calles H1, H2, Ñ, G2, D1, R, L, D3 y K. Proyecto de Urbanización Mercacombustibles, S.L.*
- MENARD ESPAÑA. *Informe final de Validación de Tratamiento por medio de Compactación Dinámica de los rellenos bajo las estructuras del Hotel Vela. Puerto de Barcelona.*

- MENARD ESPAÑA. *Tratamiento de suelos bajo la planta de regasificación de GNL en Barcelona. Análisis final del tratamiento llevado a cabo*
- JUNTA DE ANDALUCÍA. *Instrucción para el diseño de firmes de la red de carreteras de Andalucía. Consejería de Obras Públicas y Transporte. Nº registro: SAOP/GIASA-47-2007*



MENARD ESPAÑA, S.A.

Villa de Marín, 15 - 2ºA

28029 Madrid

☎: 913 239 524

E-m: comercial@menard.es

Web: www.menard.es