

Densificación de rellenos blandos por medio de Compactación Dinámica.

Acondicionamiento de un área de rellenos marginales en la periferia de la ciudad de Zaragoza.

C. Fantin

Responsable Dpto Técnico

T. Perez

Directora

Departamento de tratamiento de suelos MENARD, FREYSSINET S.A

ABSTRACT

El método de mejora de suelos por medio de Compactación Dinámica permite la densificación de los suelos tanto granulares como cohesivos mediante la ejecución de impactos con una masa dejándola caer desde una altura predeterminada.

El presente artículo describe la actuación reciente por medio de Compactación Dinámica de Alta Energía (600 tonxm) en un vertedero de rellenos blandos procedentes de excavaciones de materiales inadecuados de las obras circundantes. Dichos vertederos presentaban espesores que alcanzaban los 40 m.

El objetivo del tratamiento que se describe consistió en la compactación y alta densificación de una costra de unos 8 metros de espesor con el fin de reducir los asientos absolutos y diferenciales de las futuras estructuras e instalaciones, así como obtener la capacidad portante requerida en el proyecto de construcción para la concepción de las estructuras por medio de cimentaciones superficiales.

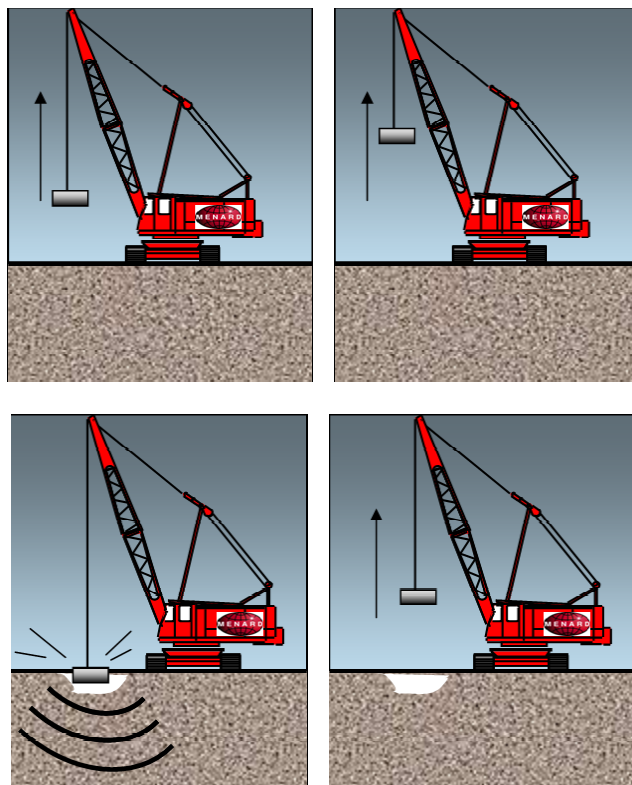
Keywords: tratamiento terreno, compactación dinámica

1 PRESENTACIÓN DE LA COMPACTACIÓN DINÁMICA

Esta técnica fue inventada y desarrollada por Louis Menard en 1969.

El procedimiento puede emplearse tanto en suelos granulares como cohesivos, requiriéndose para su uso en suelos poco permeables saturados de agua el empleo de varias fases de compactación con un intervalo de tiempo entre ellas que permita la disipación de las presiones intersticiales que se originan. La densificación de los suelos se consigue mediante la ejecución de impactos llevados a cabo con pesos de 8 a 30 toneladas que se dejan caer desde 15 a 40 metros.

Los impactos de cada fase se disponen según una malla que se va densificando hasta alcanzar las características del suelo deseadas.



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.

El impacto del peso que cae conlleva las ventajas siguientes:

- Inmediata densificación de los suelos más granulares.
- Disipación de las presiones intersticiales debida 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.

2 TRATAMIENTO DE RELLENOS BLANDOS: PLATAFORMA LOGÍSTICA DE ZARAGOZA (P.L.A.Z.A.)

2.1. Presentación del proyecto

P.L.A.Z.A. (Plataforma logística - Zaragoza) es, actualmente, la zona logística en funcionamiento más grande de Europa. Su extensión total es superior a 1,0 millón de m², extendiéndose permanentemente a medida que aumenta su éxito y explotación. Se encuentra en las afueras de la ciudad de Zaragoza, dirección Madrid y su construcción comenzó en 2003 continuando a día de hoy al mismo tiempo que se van abriendo zonas a la explotación.

La zona afectada por los rellenos blandos tratados presenta una superficie total de unos 130.000 m². Su origen proviene de la utilización como vertedero de dichas parcelas, tras excavación de materiales inadecuados durante los 3 últimos años. La naturaleza de estos rellenos varía entre limos, arenas, arcillas y yesos, no existiendo en ninguna zona restos de demolición o materia orgánica.

En un inicio, las malas características mecánicas de los rellenos hicieron descartar su uso industrial, contemplando únicamente acondicionarlo como aparcamiento de vehículos pesados.

No obstante, el éxito de dicha plataforma logística, llevó al equipo técnico de ésta a reflexionar sobre posibles soluciones, consultando a Freyssinet- Menard sobre los posibles tratamientos compatibles tan-

to técnica como económicamente con el contexto de la plataforma, y que pudieran permitir concebir la construcción de naves industriales con la garantía y seguridad de un comportamiento correcto sobre cimentaciones superficiales en un relleno de espesor tan fuerte.

De ese modo se concibió el tratamiento de los rellenos por medio de Compactación Dinámica de Alta Energía, permitiendo proyectar la construcción de viales y parcelas para futuras naves industriales, así como zonas de aparcamiento.

Foto aérea del complejo P.L.A.Z.A.



2.2. Condiciones Geotécnicas

El vertido de los rellenos blandos que nos atañen proviene de excavaciones repetidas de materiales muy heterogéneos de relieves margo-yesíferos y de fondos de valle. Dichos rellenos están constituidos por elementos de tamaño variable de roca de yeso con finos limo-arcillosos y limos yesíferos. Este depósito puede alcanzar espesores de hasta 35-40 metros en algunas parcelas.

EMPLAZAMIENTO	S-10	S-10	S-10	S-10	S-11	S-11	S-11	S-11	S-12	S-12	S-12
TIPO DE MUESTRA	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38	38
PROFUNDIDAD (m)	3-3,6	6,6-7,2	9,9-6	15-15,6	3-3,6	6,6-7,2	9,9-6	15-15,6	3-3,6	6,1-6,7	9,1-9,7
GRANULOMETRÍA	% arena # 0,075 mm	58,9	100,0	89,0	100,0	46,7	79,5	87,0	78,4	34,0	60,1
	% arena # 0,425 mm	54,2	99,9	84,1	100,0	41,8	71,6	83,3	71,6	31,3	55,9
	% arena # 0,850 mm	47,6	99,8	78,4	99,5	37,8	65,1	78,6	65,1	29,6	54,0
% arena # 2,000 mm	38,7	95,4	69,5	87,8	35,3	49,5	61,6	51,3	27,7	52,0	
GRANULOMETRÍA	% LIMOS (0,075 mm)										
SEDIMENTACIÓN	% ARCILLAS (0,002 mm)										
ÍNDICES DE	Límite	36,3	25,2	44,5	25,1	63,2	36,9	27,4	40,1	58,6	51,6
	Plasticidad	23,0	20,9	27,0	21,0	38,9	20,0	20,0	30,7	36,4	33,2
	Índ. de plasticidad	12,8	4,3	16,9	4,1	24,3	11,4	6,9	13,4	20,2	18,4
CLASIFICACIÓN U.S.C.S.	GC	ML-CL	ML	ML-CL	GM	SM	ML-CL	ML	GM	MH	GM
HUMEDAD NATURAL (%)	16,4	12,3	15,3	12,7	8,0	12,6	14,1	17,8	12,4	11,6	17,4
DENSIDAD	Aparente (gr/cm ³)	1,91	1,80	1,95	1,93	1,88	2,04	2,03	1,84	1,94	1,83
	Seca (gr/cm ³)	1,61	1,60	1,69	1,41	1,74	1,81	1,78	1,58	1,74	1,56
CORTE DIRECTO (kN)	σ _v										
	σ ₁				17,74				37,52		
	σ ₃				0,00				0,00		
	τ (residual)										
EDÓMETRO	Ind. porosa e _{sw}										
	Ind. porosa e _{sp}										
VOLAPRO	Ind. de expansión (e _{sw})		0,65					0,69			
	Ind. de contracción (e _{sw})		0,64					0,67			

Resultados de los ensayos de laboratorio ejecutados sobre muestras inalteradas

El aspecto de los rellenos refleja un comportamiento macroestructural granular con un ángulo de rozamiento alto. Aun existiendo una fracción fina, la reacción de los rellenos es principalmente granular ante un tratamiento por medio de Compactación Dinámica.



Aspecto de uno de los taludes ejecutado en los rellenos a tratar

2.3. Objetivos del tratamiento

Según indicado en anteriores apartados, el tratamiento llevado a cabo ha tenido como objetivo la compactación y alta densificación de una costra de 8,0-10,0 m de rellenos en las zonas de cubetas profundas (> 30,0 m) y de todo el espesor blando en la zona de cubetas de profundidad inferior a 10,0 m.

La creación de una “costra” densificada en toda la parcela permite:

- el control y la reducción de los asentamientos absolutos y diferenciales a corto y largo plazo,
- la obtención de la capacidad portante requerida en la zona de edificaciones,
- el control de posibles asentamientos por fenómenos de colapso bajo aportes puntuales de agua.

La cuantificación de la mejora se ha desarrollado de la siguiente forma:

- Obtención de una capacidad portante de 2,0 kg/cm² para la cimentación de las futuras naves industriales
- Estimación de los asentamientos máximos absolutos y diferenciales en las futuras naves según valores máximos según normativa de 2,5 cm y 1/500 respectivamente.
- Anulación potencial de colapso medido en pruebas de colapsabilidad en laboratorio.

- Control de los asentamientos diferidos en profundidad según el criterio de autoportancia(*)

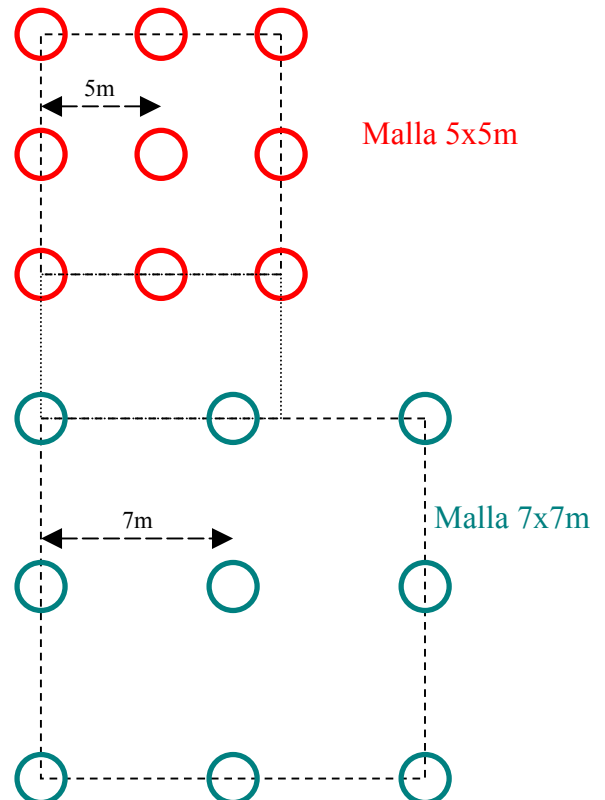
(*) La autoportancia representa el potencial de “consolidación” en terrenos no saturados sobre el nivel freático”. El umbral de autoportancia de un suelo corresponde al nivel de características que un suelo tiene que alcanzar para no asentarse su propio peso a largo plazo.

2.4. Ejecución de la Compactación Dinámica: Presentación de la parcela AS9sub1 de mayor espesor de rellenos.

2.4.1. Zona de Ensayos

El área a tratar se dividió en “lotes” o subparcelas según el espesor de rellenos y las posibles variaciones de la naturaleza de éstos.

En todas y cada una de estas diferentes áreas a tratar se llevó a cabo un “área de ensayos” con el fin de observar “in situ” el comportamiento de los rellenos y así concreta el tipo de malla y el número de golpes óptimo que requerían estos.



La disposición geométrica de la zona de ensayos se desarrolló según dos mallas diferentes, correspondiente a una energía específica distinta:

- Energía unitaria : 520 tonxm
- Malla de 5x5m con una fase de golpeo
- Energía específica = 332 – 416 tonxm/m²
- 12 a 20 golpes por huella

- Energía unitaria : 520 tonxm
- Malla de 7x7m con dos fases de golpeo
- Energía específica = 255-361 tonxm/m²
- 12 a 14 golpes por huella

Los controles llevados a cabo en esta zona de ensayos fueron:

- Control asintótico de huella.
- Control concavidad-convexidad terreno entre huellas.
- Control asiento global inducido.

Y como ensayos geotécnicos de control:

- 3 ensayos penetrométricos (1 en la zona de malla 5x5m y 2 en la zona de malla 7x7m)
- 1 sondeo con ensayos presiométricos en su seno cada 2m hasta 20m de profundidad y cada 4m hasta el final del sondeo.

Los trabajos y controles llevados a cabo en la zona de ensayos representan el análisis de una zona muy localizada dentro de los rellenos. Este hecho permite el análisis de la metodología de trabajo y de la efectividad del tratamiento para unas ciertas condiciones de los rellenos. El tratamiento de toda la plataforma conlleva siempre un seguimiento detallado y una adaptación de la energía y metodología a cada una de las condiciones que se detecten en el avance.

2.4.2. Tratamiento llevado a cabo

La ejecución de la zona de ensayos de la parcela AS9sub₁ permitió definir el tratamiento óptimo. Dicho tratamiento consistió en aplicar una malla principal cuadrada de 7m de lado con una segunda malla intercalada en el centro de la anterior, correspondiente a una densidad de 1 huella cada 24,5 m², una energía unitaria de 520 txm y dos fases definidas con la metodología siguiente:

- 1ª fase: pre-excavaciones de 3 metros en cada una de las huellas + 14 golpes + 5 golpes de “cierre”
- 2ª fase: 10 golpes + 3 golpes de “cierre”

La energía específica aplicada con esta metodología de golpeo fue de entre 276 y 403 tonxm².

La metodología descrita, con fase de pre-excavación, es fruto de la optimización de la profun-

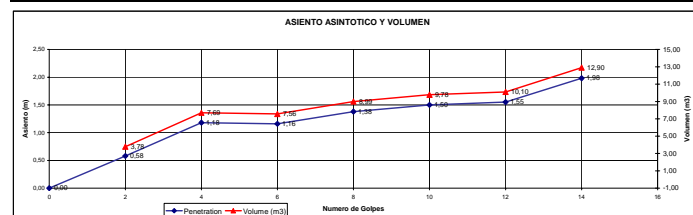
dididad de alcance del tratamiento y del volumen de desplazamiento del relleno con el consecuente incremento óptimo de la compacidad y densidad del relleno tratado.

2.4.3. Control durante el tratamiento. Asientos asintóticos en huella

Como indicado en anteriores apartados, durante la evolución del tratamiento, y antes de cualquier ensayo de control, se lleva a cabo un seguimiento exhaustivo de la evolución de los rellenos. Dicho seguimiento consiste principalmente en la medición de los asientos asintóticos en huellas y de la concavidad y convexidad del terreno circundante, traduciendo dicho asiento en volumen compactado y profundidad alcanzada.

Se presenta a continuación un ejemplo de gráfica de estas medidas para una huella:

numero de golpes	Diámetro de la huella	Niveles de referencia (m)				Media	Asiento asintótico (m)	Asientos acumulados (m)	Volumen (m ³)	Volumen %
		1	2	3	4					
0	2	3,320				3,320	0,00			
2	3,8	3,900				3,900	0,58	0,58	3,78	
4	3,8	4,500				4,500	0,60	1,18	7,69	103%
6	3,8	4,480				4,480	-0,02	1,16	7,56	-2%
8	3,8	4,700				4,700	0,22	1,38	8,99	19%
10	3,8	4,820				4,820	0,12	1,50	9,78	9%
12	3,8	4,870				4,870	0,05	1,55	10,10	3%
14	3,8	5,300				5,300	0,43	1,98	12,90	28%



Con un diámetro de 3,8 m y un asiento acumulado medido de 1,98 m, el volumen de la huella calculado es de 12,90 m³.

Considerando por tanto un volumen de 12,90m³, y una densidad media de una huella/24,5m², el asiento medio inducido obtenido es de 52 cm en un espesor blando de 10,0 m.

2.4.4. Control de la mejora mediante ensayos penetrométricos

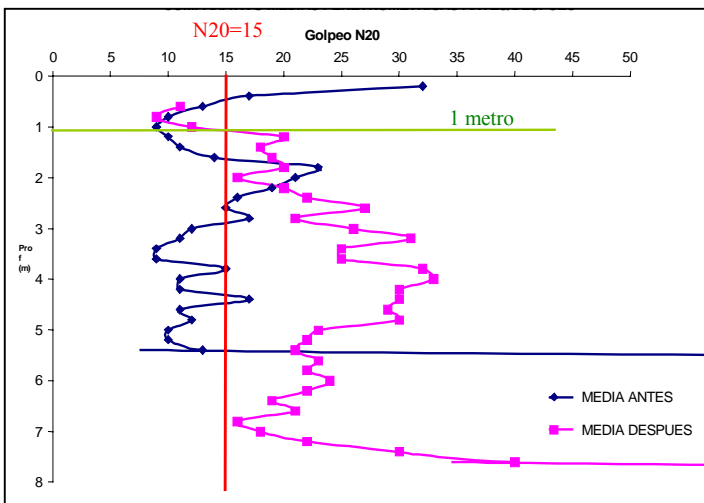
Con el fin de cuantificar la mejora conseguida tras la compactación de los rellenos se ha llevado a cabo una campaña de ensayos de penetración dinámica tipo Borros ejecutados tanto antes como después del tratamiento y distribuidos regularmente a lo largo de la parcela.

El control por medio de este tipo de ensayos tiene como objetivo, únicamente, la cuantificación del incremento de golpeo y la comprobación del espesor mejorado, no utilizando en ningún momento dichos

ensayos para la cuantificación de la deformabilidad de los rellenos tras el tratamiento ni de su capacidad portante. Estos parámetros se obtuvieron por medio de los ensayos presiométricos de control que se describen en el siguiente apartado.

El análisis de los datos se lleva a cabo de un modo estadístico, por medio de medias aritméticas en horizontal por franjas de 20 cm y armónicas en vertical en franjas de 1,0 m

El siguiente gráfico refleja un estudio comparativo de las medias aritméticas de dichos ensayos, tanto antes como después del tratamiento, en el que se ha tenido en cuenta el asiento medio global inducido medido en la parcela (50cm de media).



Comparativo resultados penrométricos antes/después del tratamiento

La media armónica vertical en los rellenos blandos hasta 3,0 m era de $N_{20}=14$ antes del tratamiento y de $N_{20}=17$ después del mismo, con la consiguiente mejora en un 24,5%.

La media armónica vertical en los rellenos blandos entre 3,0 y 5,0 m era de $N_{20}=12$ antes del tratamiento y de $N_{20}=20$ después del mismo, con la consiguiente mejora en un 67%.

Las medias armónicas por capas de 1,0 m estaban comprendidas entre $N_{20}=10$ y $N_{20}=15$ antes de tratamiento y pasaron a ser todas $N_{20}>15$ exceptuando el primer metro descomprimido por el propio proceso de compactación (creación de cráteres y relleno de los mismos con el terreno circundante). Por debajo de dicho metro se han eliminado todas las capas mas blandas con golpes inferiores a 15.

La desviación típica del conjunto de datos ha pasado de tener un valor de $N_{20}=8$ antes del tratamiento a tener un valor de $N_{20}=6$, constatando el efecto de

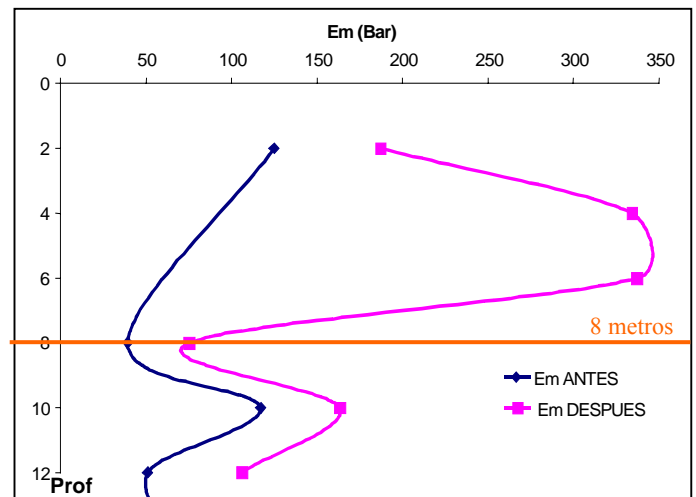
homogeneización en los rellenos tras el tratamiento por medio de Compactación Dinámica.

2.4.5. Control mediante Sondeos Presiométricos

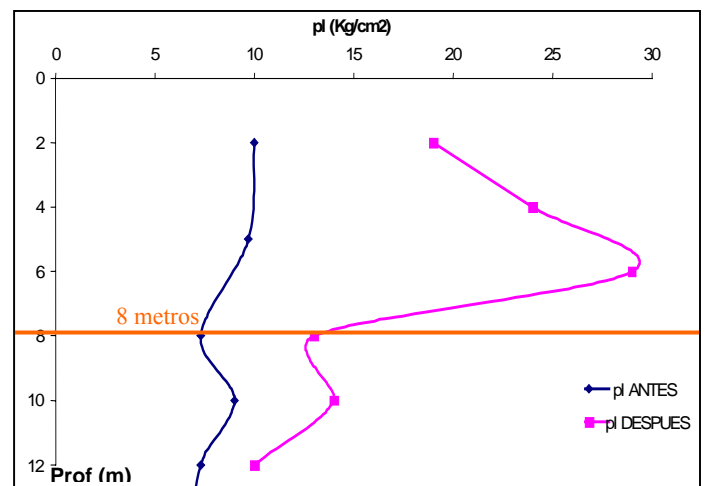
Con el fin de cuantificar de forma más exhaustiva la mejora producida y controlar los asientos diferidos determinando el criterio de autoportancia, se llevaron a cabo sondeos con ensayos presiométricos en su seno, tanto antes del tratamiento como después en el mismo punto de ubicación. Dichos sondeos alcanzaron el fondo de la cubeta de rellenos hasta reconocer el terreno natural llevándose a cabo ensayos presiométricos cada 2m en los primeros 20m y cada 4m hasta el final del sondeo.

El análisis de dichos datos se lleva cabo, de forma análoga a los ensayos penrométricos, de un modo estadístico.

Se presentan a continuación en gráficos los resultados obtenidos, los cuales reflejan claramente la creación de una "costra" densificada en todos los rellenos de espesor mínimo 8,0 m.



$Em = fct (prof)$



$Pl = fct (prof)$

En términos de Módulo presiométrico E_m (Kg/cm^2) se observa que entre 0 y 10,0 m la media armónica ha pasado de un valor de $121,0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ antes del tratamiento a un valor de $162,0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ tras de la compactación dinámica, lo que supone un incremento del 34% del valor de E_m en los primeros 10,0 m.

En términos de presión límite p_l (Kg/cm^2) se observa que entre 0 y 10,0 m la media armónica ha pasado de un valor de $9,0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ a un valor de $18,0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ lo que supone un incremento del 100% del valor de p_l en los primeros 10,0 m.

2.4.6. Determinación del criterio de Autoportancia

La Presión Límite obtenida a diversas profundidades en los ensayos presiométricos ejecutados permite, según la experiencia, llevar a cabo una correlación con el criterio de Autoportancia.

El umbral de Autoportancia de un suelo corresponde al nivel de características que un suelo tiene que alcanzar para no asentar bajo su propio peso a largo plazo. Se adjunta a continuación un resumen de las presiones límites umbral de Autoportancia en función de la naturaleza de los materiales para una franja de suelo comprendida entre 0 y 10m.

Tipo de suelo	p_l de Autoportancia (Kg/cm^2)
Arcillas	2,5 – 3
Limos	4
Arena	6
Grava	8

Valores de p_l /autoportancia según Louis Menard

Los rellenos tratados, según los ensayos de laboratorio llevados a cabo, consisten en rellenos con un comportamiento granular y una fracción fina limo-arcillosa. Con esa naturaleza, se podría definir la p_l de Autoportancia según un valor de $6,0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ como media del conjunto. No obstante, debido a posibles lentejones más granulares que puedan existir, se consideró, de forma conservadora, el valor de p_l de $8,0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ como el valor límite inferior requerido para garantizar la ausencia de asentamientos a largo plazo.

Los resultados de p_l obtenidos en los primeros 10,0 m antes del tratamiento reflejan valores de p_l comprendidos entre $7,30$ y $10,0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$, sin embargo, tras el tratamiento, los resultados obtenidos de p_l en los primeros 10,0 m reflejan en todo momento valores comprendidos entre $11,89$ y $26,2 \text{ Kg}/\text{cm}^2$, claramente superiores a $8,0 \text{ Kg}/\text{cm}^2$.

2.4.7. Determinación de la Capacidad Portante

El objetivo del tratamiento llevado a cabo, en lo que concierne a la capacidad portante, ha consistido en obtener $Q_p > 2,0 \text{ kg}/\text{cm}^2$ para las futuras cimentaciones superficiales de las naves industriales proyectadas en la zona.

El cálculo de la capacidad portante de una cimentación superficial, basado en la presión límite corresponde a la siguiente expresión, según el DTU 13.2:

$$Q_p < q_0 + K_p/F(p_{le}-p_o)$$

Siendo:

- q_0 = presión total vertical del terreno a la profundidad de la base de la cimentación.
- K_p = factor de portancia presiométrica
- P_o = presión horizontal del terreno a la profundidad de la base de la cimentación.
- P_{le} = presión límite equivalente, media geométrica de los ensayos realizados en una franja de terreno de espesor $-1,5B$ a $+1,5B$ (B = ancho de la zapata) respecto a la base de la cimentación, considerando siempre $p_{le} < 1,5 p_l$ más pequeña medida en dicha profundidad.
- F = factor de seguridad = 3.

Considerando la eliminación del primer metro de material descomprimido debido al proceso de compactación, los resultados de los ensayos presiométricos después del tratamiento permiten deducir el corte de terreno siguiente:

Profundidad (m)	p_l (kg/cm^2)	E_m (kg/cm^2)
2	19,9	187,4
4	24,0	334,5
6	29,7	337,6
8	13,3	75,8
10	14,9	163,9

Considerando de forma conservadora el coeficiente reológico $\alpha=1$ para los rellenos antrópicos, se obtiene $E_m=E_y$.

Se ha considerado el valor de q_0 como 0 de forma conservadora. Asimismo, debido a la naturaleza tan heterogénea del relleno se ha calculado la capacidad portante con un rango de K_p comprendido entre 0,90 y 1,4. La profundidad equivalente D_e se ha tomado como $1,10D$ siendo D el empotramiento de la zapata ($D=1,0$ m).

Se obtiene de ese modo, en todos los rellenos tratados, un valor de capacidad portante $Q_p \geq 2 \text{ kg}/\text{cm}^2$

acorde a los requisitos de las cimentaciones de las futuras naves

2.4.8. Determinación de los Asientos Diferidos

Considerando una cimentación de geometría definida, se pueden determinar los asientos diferidos utilizando el cálculo del método presiométrico proveniente del Fascículo 62 -V, según la expresión siguiente:

$$\begin{aligned} S_{\text{total}} \text{ (a 10 años)} &= S_D + S_C \\ \text{Con } S_D &= 2(q - \sigma_v) B_o (\lambda_D B / B_o)^a / 9 E_D \\ \text{Y } S_C &= (q - \sigma_v) \lambda_c B a / 9 E_c \end{aligned}$$

Siendo S_D el asiento deviatórico y S_C el asiento esférico.

Se considera una zapata de 2,0 metros de largo por 2,0 metros de ancho y 1,0 metros de empotramiento mínimo respecto a la cota del terreno, tras su preparación eliminando 1,0 descomprimidos.

Se han considerado naves con cargas por pilar máximas de 50,0 toneladas, según documentación suministrada por el proyectista.

Con dicha disposición se obtiene un asiento a largo plazo máximo de 8mm (a 10 años), pudiendo garantizar por tanto un asiento diferido claramente inferior al prefijado por la normativa.

3 CONCLUSIONES

Actualmente, y con un claro incremento con el tiempo, 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.

El suelo cada día es más escaso, y el uso de zonas con terrenos de cimentación problemáticos provenientes de antiguas explotaciones y construcción de infraestructuras en la zona, es cada día más común.

En este contexto, los diversos tratamientos del terreno, entre los que se encuentra la Compactación Dinámica, 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 de los controles geotécnicos y su interpretación, permiten la aplicación de estos tratamientos con la garantía del comportamiento a largo plazo de los terrenos tratados.