

Un caso de mejora de terreno por compactación dinámica para cimentación superficial

LUIS TISSERA BRACAMONTE (*)

RESUMEN. En la investigación geotécnica para la construcción de 56 naves industriales, en el polígono industrial de Villalonquejar (Burgos), se ha detectado un potente espesor de relleno heterogéneo compuesto básicamente de suelo arcilloso poco compacto. La solución propuesta para la cimentación consistió en una mejora del relleno arcilloso, en un espesor compatible con la dimensión de zapata y que garantice con una seguridad adecuada la tensión de trabajo $\sigma_{ad} = 1,5 \text{ kg/cm}^2$.

La metodología de tratamiento del terreno fue la sustitución parcial de relleno por grava y la compactación dinámica puntual, en cada uno de los 800 emplazamientos de zapatas proyectados. Se presenta seguidamente la descripción del tratamiento y la mejora conseguida con el mismo.

A CASE OF GROUND IMPROVEMENT BY DYNAMIC COMPACTION FOR SURFACE FOUNDATIONS

ABSTRACT. During geotechnical research for the construction of 56 industrial buildings on the industrial estate at Villalonquejar (Burgos), a powerful thickener of heterogeneous filler has been detected, consisting basically of slightly compacted clayey soil. The solution proposed for the foundations, consists of an improvement of the clayey soil to a density compatible with the shoe, and which guarantees the working stress $\sigma_{ad} = 1,5 \text{ kg/cm}^2$, with a sufficient safety margin.

The ground treatment methodology consisted of partial replacement of the filler with gravel and point dynamic compaction, in each one of the 800 shoe sites planned. A description is provided of the treatment and improvements obtained.

1. DESCRIPCIÓN DE LA OBRA

La parcela investigada se sitúa en la manzana «N» de polígono industrial de Villalonquejar (Burgos) y tiene una extensión aproximada de $150 \times 500 \text{ m}$.

De acuerdo con la información recibida, las 56 naves industriales proyectadas (actualmente en ejecución) constarán de una estructura resistente con un total de 800 pilares de hormigón y una modulación entre ejes de $18 \times 6,66 \text{ m}$ y $20 \times 6,66 \text{ m}$.

Las naves se construyen adosadas en bloques, siguiendo con la cota inferior de solera la pendiente topográfica del terreno.

2. CARACTERÍSTICAS DEL TERRENO

Los trabajos de campo realizados en el reconocimiento previo han consistido en: 12 calicatas y 12 ensayos de

penetración dinámica continua (tipo borro), distribuidos como lo indica la figura 1.

Hasta 4 m máxima profundidad de las catas aparecieron las siguientes capas:

- Cobertura vegetal de 0,60 m de espesor.
- Seguidamente aparece una capa semisaturada de arcilla margosa de plasticidad media-alta, color verdoso. Los valores de límites de Atterberg han dado límites líquidos variables entre $30\% < W_L < 68\%$, e índice de plasticidad $15\% < I_p < 32\%$.

El relleno está formado por vertidos de arcilla margosa con incrustaciones y costras decimétricas intercaladas de yeso cristalizado, en ocasiones en estado sacaroso color blanquecino.

La heterogeneidad en la composición de materiales observada en los cortes litológicos de las catas, y los bajos golpes de penetración con valores de N (n.º de golpes para penetrar 20 cm) en algunos casos ≤ 5 golpes y con una dispersión en general entre $5 < N < 10$, reflejan un claro relleno de baja compacidad hasta la profundidad de 4 m.

(*) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe del Departamento de Estudios Geotécnicos de TECNOS, Garantía de Calidad, S. A.

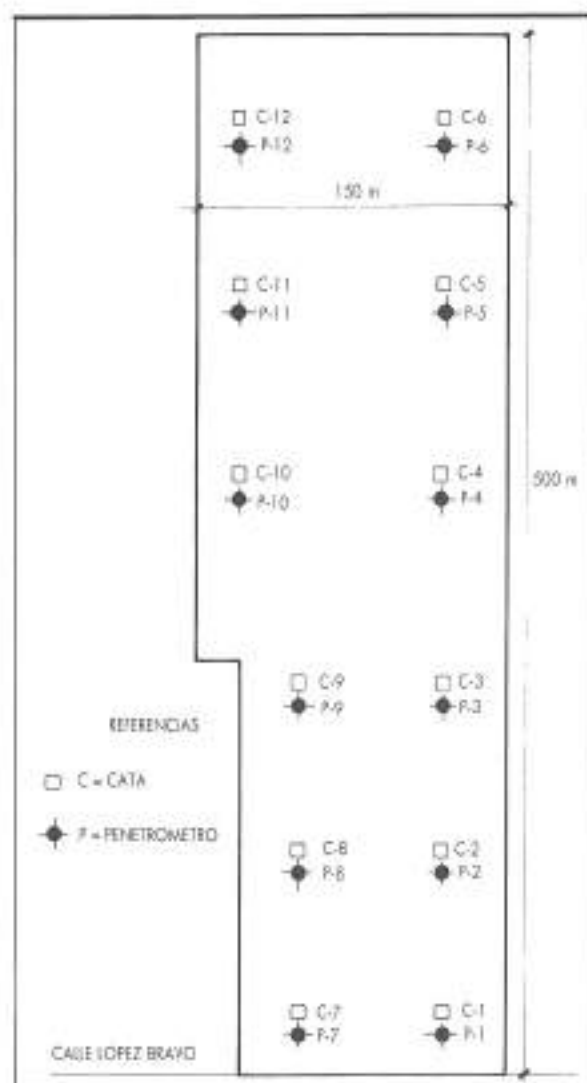


FIGURA 1. Situación de los trabajos de campo en estudio geotécnico previo a la obra.

El relleno artificial abarca casi la totalidad de la parcela reconocida, hasta una profundidad incluso superior a 4 m, respecto a la superficie topográfica actual, como lo demuestran los diagramas de penetración, donde se observan valores de $N \leq 10$ golpes hasta profundidades entre 5 y 11 m (figura 2).

En síntesis, el subsuelo en los niveles reconocidos posee mala calidad geotécnica, y una capacidad portante reducida y limitada como apoyo de cimentación, siendo necesario una mejora del terreno para apoyar con la cimentación en los niveles superficiales investigados.

Finalmente, no apareció agua en ninguna calicata.

3. PROCEDIMIENTO DE MEJORA DEL TERRENO

Dada la deficiente calidad geotécnica del terreno, es ne-

cesario una mejora de la capacidad portante compatible con el tipo de estructura a construir.

Teniendo en cuenta que las estructuras de naves suman 800 pilares que transmitirán al subsuelo cargas ligeras ($Q_{max} \leq 30$ tn), se considera adecuada una mejora del terreno mediante una consolidación dinámica.

El objeto de apisonar el terreno es alcanzar una mejora en la condición de capacidad portante hasta una profundidad del orden de 4-5 m respecto a la cota de apoyo de cimentación, que permita soportar y absorber la presión inducida por el bulbo de presiones respectivo.

Conociendo el espesor a mejorar o compactar bajo la cota final de apoyo ($H \approx 4$ m), se deberá definir la energía mecánica a utilizar, seleccionando las variables, peso del apisonador (M , en toneladas) y la altura de caída (h , en metros), pudiendo seguirse la siguiente relación aproximada.

$$H = \sqrt{M \times h}$$

La experiencia ha demostrado que las profundidades efectivamente compactadas suelen ser menores y debe de afectarse al término de la raíz cuadrada por un coeficiente de minoración o eficacia « α ». Por tanto, se deberá mayorar « M » o « h » para alcanzar la profundidad « H » mejorada del terreno tratado.

En cada punto de emplazamiento de zapata se efectuó un pozo de grava compactada con una sección algo superior al diámetro de la pesa empleada, con una profundidad inicial de 1,5 m previendo que la energía por apisonado generaría un descenso de la superficie del terreno, pudiendo alcanzar 100 cm o más en las zonas de consistencia blanda.

La grúa empleada fue de tipo normal y el peso empleado fue una masa única de forma cilíndrica.

Se aplicó el siguiente procedimiento y pautas de compactación dinámica:

- Excavación del pozo en cada punto de apoyo hasta una profundidad del orden de 1,5 m (figura 5a).
- Relleno del pozo con material granular, tamaño grava y limpio de finos, formando un colchón de 0,30 m de espesor (figura 5b).
- Realización de la compactación dinámica hasta estabilizar el asiento y obtener un rechazo especificado. Se introdujo material granular cada vez para compensar el descenso experimentado en la compactación (figura 5c-d-e).

4. TRABAJO DE COMPACTACION Y ENSAYOS DE CONTROL EN OBRA

El equipo mecánico de compactación dinámica utilizado por la empresa constructora fue una grúa marca Northwest, con un peso de masa de 9,7 tn, forma cilíndrica, 0,80 m de diámetro y 2,0 m de largo (figuras 3 y 4).

La compactación de los pozos se realizó observando la incidencia en la eficacia de los resultados de las distintas variables: espesor del colchón de grava, energía y

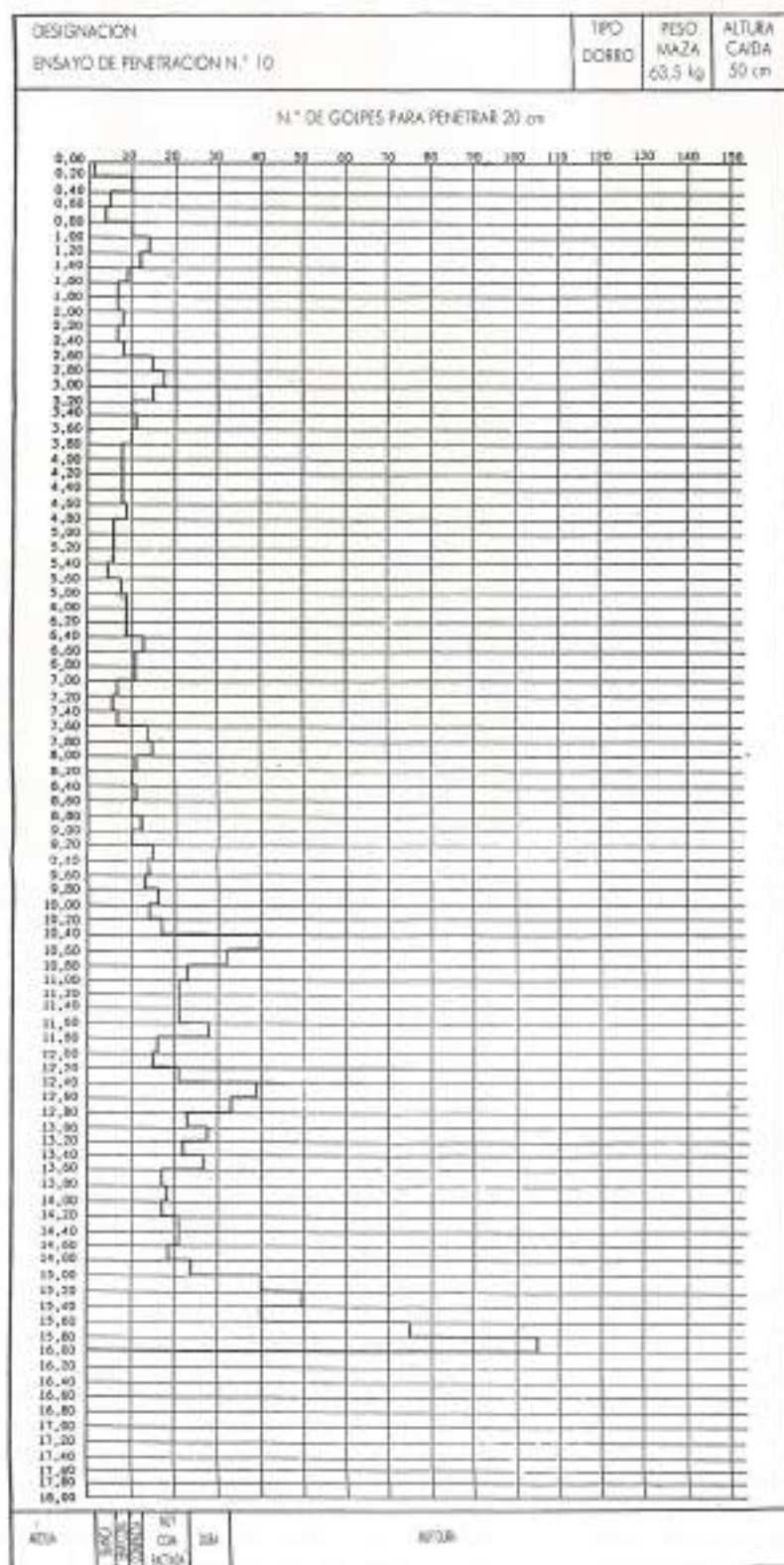


FIGURA 2. Ejemplo de diagrama de penetración continua en el estudio geotécnico.



FIGURA 3. Vista de la grúa y del trabajo de compactación dinámica.



FIGURA 4. Vista de la maza utilizada en la compactación del pozo.

número de golpes necesarios, modalidad de suministro de energía y magnitud de la misma.

La metodología de trabajo fue:

- Golpeo con masa en caída libre.
- Compactar en cada punto de zapata con 3 series o fases de golpes: 1.ª fase, 4-5 golpes con altura de caída de masa $h = 4$ m (figura 5c); 2.ª fase, 6-7 golpes con $h = 8$ m; 3.ª fase de 5 golpes de $h = 4$ m (figura 5e).

La 1.ª y 2.ª fase se efectuaron hasta alcanzar el rechazo. El rechazo se consideró cuando el descenso del terreno apisonado respecto a una señal fija en el fuste del pozo era inferior a 0,5 cm por golpe.

La 3.ª fase tiene por objeto regularizar la superficie de apoyo del colchón de grava.

- Los valores indicados para cada serie de golpes fueron mínimos.
- La zapata aislada se apoyó directamente sobre el colchón de grava y el sustrato mejorado (figura 6).

5. MEJORA DEL TERRENO CONSEGUIDA

- Los ensayos de penetración continua del control efectuado reflejan valores de N (n.º de golpes cada 20 cm de espesor) en general entre 12 y 25 golpes, hasta una profundidad de 6-7 m respecto a la superficie topográfica. Se refleja así una clara mejora del terreno, dado que en la condición primitiva en el mismo punto hubo valores aislados de « N » inferiores a 10 golpes (figura 7).
- El asiento o hundimiento final de los pozos compactados fue del orden de 0,5-0,6 m.
- Para obtener las características adecuadas en la mejora, fue necesaria una energía por golpe superior a la indicada por la fórmula estimativa $H = \sqrt{M \times h}$, pudiéndose definir en nuestro caso un coeficiente $\alpha = 0,4$. La energía unitaria o por golpe de masa aplicada en cada punto ha variado entre 40 y 80 tn $\times$ m, según la fase del trabajo. Hemos comprobado que la 2.ª fase o serie de golpes con energía de 80 tn $\times$ m es la que efectivamente produce la mejora.

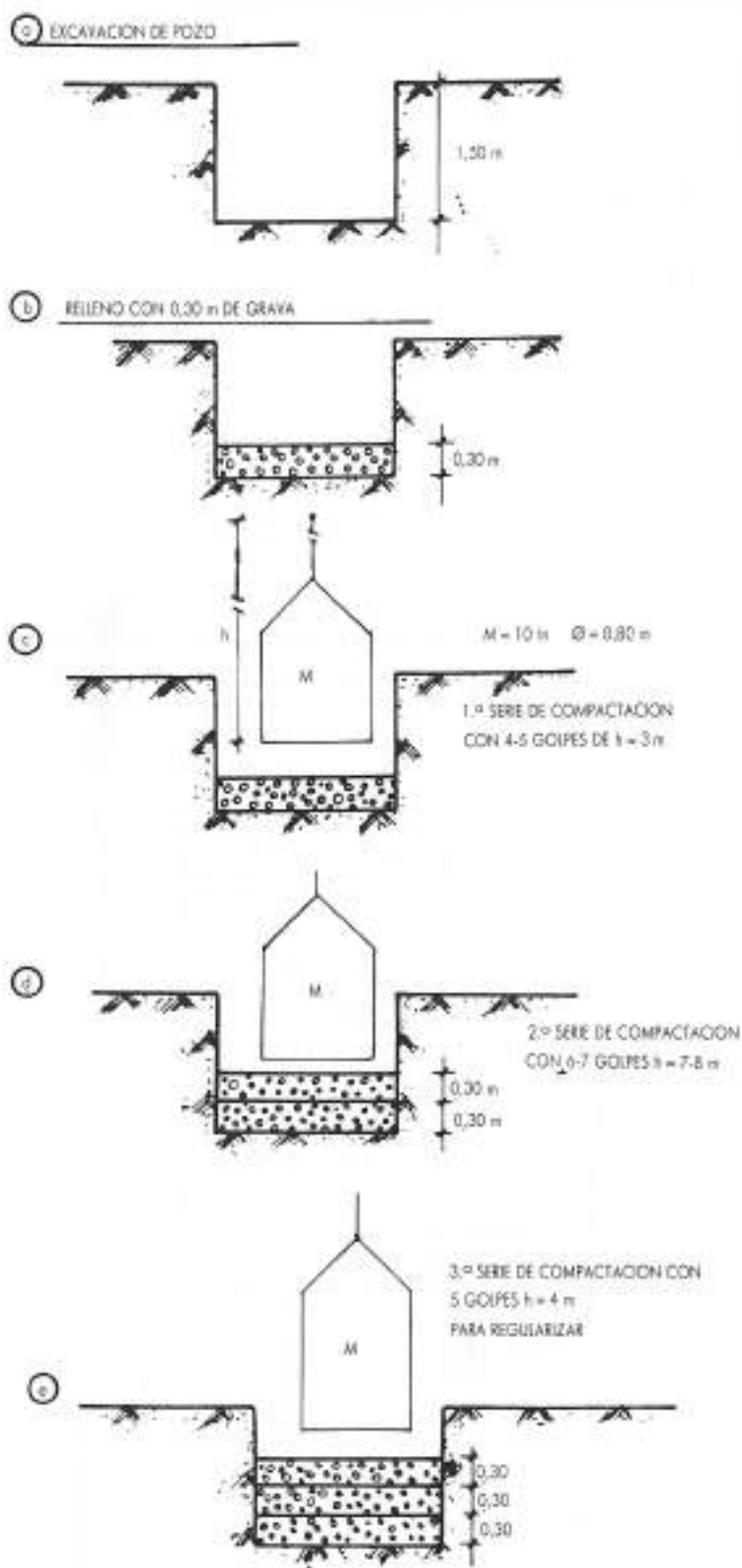


FIGURA 5 (a,b,c,d y e).
Fases de excavación y compactación
dinámica.

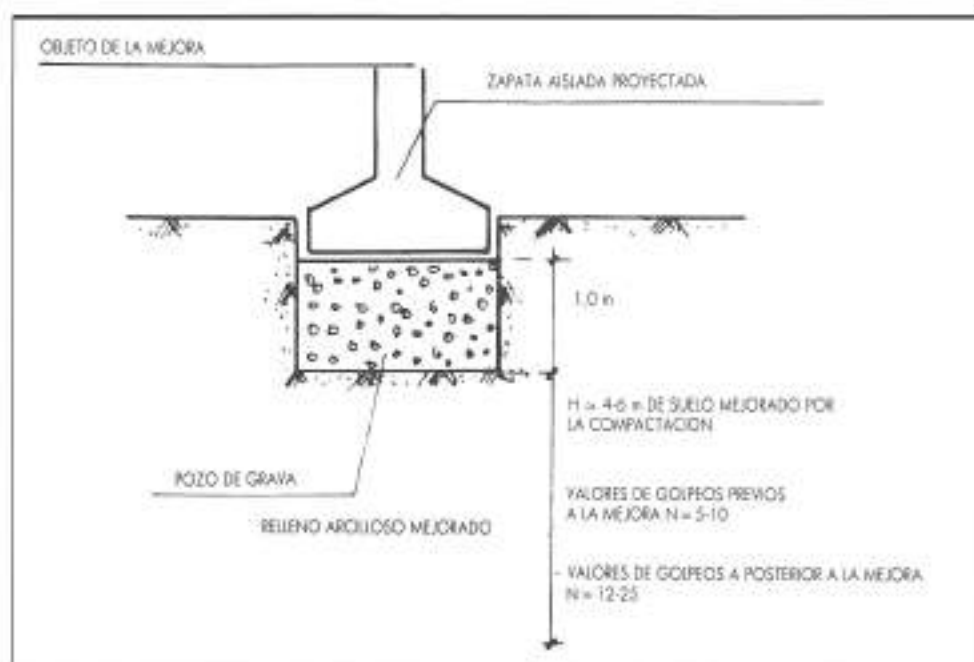


FIGURA 6. Zapata aislada apoyada sobre un cojín de grava.

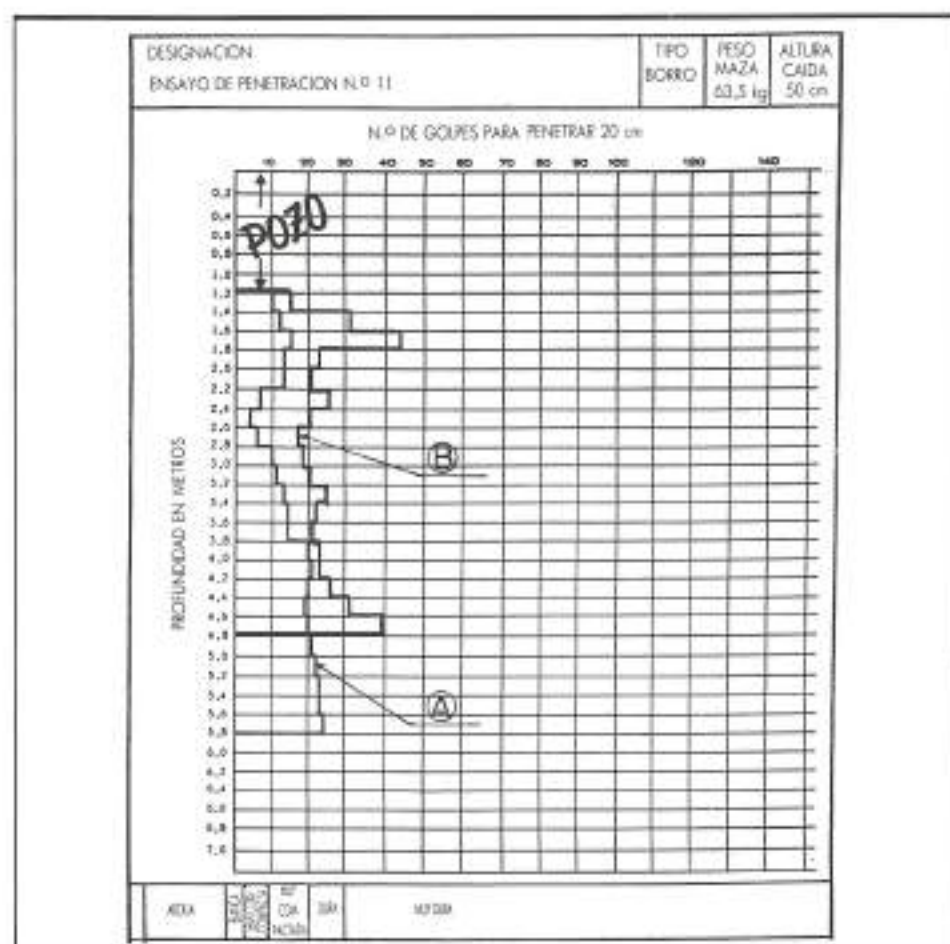


FIGURA 7. Ejemplo de diagrama de penetración continuo antes de la compactación del pozo (a) y a posterior (b).



FIGURA 8. Ensayo de penetración en el propio pozo.

- Incrementado en la 2.^a fase el número de golpes $N > «6-7»$ de mucha energía ($h = 8$ m), se ha verificado que no mejora la compacidad del terreno, e incluso es desfavorable, apreciándose hundimientos de pozos de hasta 1,5 m que generaron una macrofracturación y ruptura de la estructura interna del subsuelo afectado por la energía dinámica.
- Al finalizar los trabajos de mejora del terreno en la obra, el tiempo medio de compactación por pozo varió entre 30 y 40 minutos, coincidiendo con lo previsto en la estimación inicial.
- Durante la fase y avance de tratamiento del terreno en la parcela, se pudo comenzar igualmente con la ejecución de la obra de construcción (figura 9).

6. CONCLUSIONES

Comparando y analizando los resultados obtenidos en los ensayos de penetración continua, antes y después del apisonado en los pozos controlados, se dedujo lo siguiente:

- a) El espesor de relleno arcilloso mejorado alcanzó una profundidad « H » predominantemente de 4 m.
- b) Dados los valores de golpes « N » en los diagramas de penetración, se aprecian 2 niveles de mejora diferenciada.

En el nivel 1.^o, con un espesor de 2 m, los valores de N en general dieron entre 5 y 10 golpes previo a la comparación, pasando a N entre 15 y 25 golpes por efecto del apisonado.

A continuación, el 2.^o nivel de 2 m de espesor, presenta inicialmente valores de N entre 5 y 10 golpes, y posteriormente con la mejora fueron de N entre 12 y 20 golpes.



FIGURA 9. Vista de la obra de estructura y compactación de pozos.

- c) Por lo dicho, la condición original del relleno arcilloso presenta una consistencia blanda a moderadamente firme, y que posterior a la compactación se clasificaría de moderadamente firme a muy firme, con un valor medio de $N = 18$ golpes.

Si bien es cierto que los métodos de mejora por apisonado del terreno tienen aplicación eficaz en suelos arenosos, pueden utilizarse también en casos de arcillas semisaturadas con resultados satisfactorios, cuando los espesores requeridos por la mejora tratada sean relativamente reducidos, como lo es el caso descrito.

Finalmente, con el tratamiento del terreno realizado adecuadamente en los 800 puntos de emplazamiento de zapatas aisladas, y teniendo en cuenta el buen rendimiento del trabajo, se considera haber cumplimentado los objetivos técnico-económicos en la cimentación de la obra.

AGRADECIMIENTOS

Departamento de Inmuebles de la Caja de Ahorros Municipal de Burgos, entidad propietaria de la obra.
Centro de estudios y Proyectos Cinsa-EP, S. A., delegación de Castilla y León, empresa con la cual el autor realizó el presente estudio, en el mes de agosto de 1990.

BIBLIOGRAFÍA

1. ABELEY, Y. M., y ASKALONOV, V. V. (1957). «The Stabilization of Foundations for Structures on Loess Soils», Proceedings 4th International Conference on Soil Mechanics on Foundation Engineering (Londres), vol. 1, pp. 269-283.
2. CHARLES, J. A.; BURFORD, D., y WATTS, K. S. (1981). «Field Studies of the Effectiveness of Dynamic Consolidations», Proc. X Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Estocolmo.
3. FARACO, C. (1975). «Mejora del terreno de cimentación: precatra, compactación, vibración». III Jornadas Nacionales de Cimentaciones.
4. FARACO, C. (1976). «Mejora de las características del terreno: Vibroflotación, Terraprobe y Consolidación dinámica». Curso de Ingeniería Geotécnica. ETS de Ingenieros de Caminos de Madrid.
5. FARACO, C. (1980). «Mejora del terreno de cimentación». Capítulo 4. Geotécnica y cimientos III. Ed. Rueda, Madrid.

6. FAROCO, C. (1980). «Deep compaction field test in Puerto de la Luz», X Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Estocolmo, 3, 659-662.
7. GREENWOOD, D. A., y KIRSCH, K. (1983). «Specialist ground treatment by vibratory and dynamic methods», State of the Art Piling and ground treatment for foundations. Londres.
8. HANSBO, S. «Techno-Economic Trend of Soil Improvement Methods in Foundations Engineering», X Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Estocolmo, 1333-1343.
9. JEESBERGER, H. L., y BEINE, R. A. (1981). «Heavy tamping: theoretical and practical aspects», X Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Estocolmo, vol. 3, 695-699.
10. LUKAS, R. G. (1980). «Densification of loose deposits by puddings», Journal of Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 106 GT4, April, 435-446.
11. MENARD, L. (1970). «Une méthode économique de fondation sur terrains de remblais gaseux sur les mer. Communication a Oceanexpo. Burdeos.
12. MERNARD, L. (1974). «Deux procédés de consolidation: la vibration, le Pilonnage intensif», Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, septembre.
13. MENARD, L., y BROISE, Y. (1975). «Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation», Simposio on Ground Treatment by Deep Compaction. Londres.
14. MITCHELL, J. K., y KATTI, R. K. (1981). «Soil improvements», State of the Art Report. X Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng. Estocolmo, 261-326.
15. RAMASWAMY, S. D.; AZIZ, M. A.; SUBRAHMANYAM, R. V., y KHADER, M. H. A. (1979). «Treatment of peaty clay by high energy impacts», Journal of Geotech. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng., 105, GT8, August, 957-968.
16. SCHLOSSER, F., y JURAN, I. (1979). «General report Design parameters for artificially improved soils», VII European-Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Brighton, pp. 197-225.
17. SCOTT, R. A., y PEARCE, R. W. (1976). «Soil Compaction by impact. Ground treatment by deep compactions», Inst. Civ. Eng., London, 19-30.
18. THOMSON, G. G., y HERBERT, A. (1978). «Compaction of clay fills in situ by dynamic consolidations», Proc. Conf. on Clay Fills, Inst. Civ. Eng., London, November, 197-204.
19. WEST, J. M. (1975). «The role of ground improvement in foundation engineering», Simposio on Ground Treatment by Deep Compaction. Londres.

La calidad de una obra sólo está en las manos de quien tiene capacidad para asegurarla

*En FCC lo sabemos
por mentalidad y por experiencia.*

En Fomento de Construcciones y Contratas, S.A. somos conscientes que el aseguramiento de la calidad de nuestras obras requiere una rigurosa metodología de aplicación de sistemas, tanto del proceso como del producto. Un programa que debe ser diseñado, controlado permanentemente, auditado en todas sus fases y mantenido al día por un importante equipo de rigurosos profesionales especialistas.

Hace ya tiempo que en FCC hemos establecido programas de aseguramiento de la calidad en cada fase de la obra, basados en el autocontrol y en la auditoría, lo que nos exige una innovación y especialización constantes.

 **FOMENTO DE
CONSTRUCCIONES Y CONTRATAS, S.A.**

Responde a los compromisos de calidad más exigentes

MAXIMO INTERES

La utilización de Aditivos para Hormigón es una necesidad de Máximo Interés para la construcción de Obras Públicas y Edificaciones.

SEGURIDAD

Utilizando Aditivos BETTOR Vd. tendrá la seguridad de proporcionarle al hormigón las propiedades necesarias para cumplir las especificaciones más exigentes.

ALTA RENTABILIDAD

El uso de Aditivos racionaliza y optimiza los procesos de Fabricación y Puesta en Obra del Hormigón consiguiendo así una Alta Rentabilidad al reducirse notablemente los costes.

SOLIDEZ

Aditivos de máxima calidad como la gama LUBRICON, MELCRET, MELMENT... le otorgan al hormigón la Solidez y Resistencia necesaria para conseguir una mayor durabilidad.

MAYOR LIQUIDEZ

Los Fluidificantes y Plastificantes de BETTOR confieren al hormigón la fluidez precisa para facilitar y reducir los tiempos de su puesta en obra, mejorando a la vez sus propiedades.

LA MEJOR INVERSION PARA SU HORMIGON

Sólo una empresa como BETTOR, con su experiencia y completa gama de Aditivos para Hormigón puede ofrecerle una inversión tan rentable. Acójase a las ventajas de esta oferta única. La mejor inversión para su hormigón

BETTOR

Su marca de calidad

LOS ADITIVOS QUE BATEN RECORDS

Basters, 13-15 - 08184 PALAU DE
PLEGAMANS (Barcelona)
Tel. (93) 864 88 01 - Fax (93) 864 84 63