

Compactación del terreno por vibroflotación para la central térmica de «Los Barrios», en Algeciras (*)

Jesús Llorca Aquesolo

Ingeniero de Caminos C. y P. M.I.S.I. (Muscú)
Consultor de Cimentaciones Especiales, S. A.

Arturo Canalda Contreras

Ingeniero E.S.I.M.
Director de Anclajes, S. A.

Se describe la obra de mejora del suelo de cimentación del Grupo I de la Central Térmica de «Los Barrios», en Algeciras, actualmente en construcción, mediante la técnica de vibroflotación.

Entendemos que este método de habilitación de suelos para la construcción, ampliamente utilizado en el mundo desde hace cerca de cuarenta años, no ha encontrado aún la debida aplicación en nuestro país. La obra de la Central Térmica de «Los Barrios» presenta un buen ejemplo de las grandes posibilidades de este método, y puede servir para la divulgación del mismo.

1. INTRODUCCION

La Central Térmica de «Los Barrios», de SEVILLANA DE ELECTRICIDAD, S. A., se inscribe dentro del P.E.N., en el Grupo de Centrales Térmicas de Carbón, y constará de dos grupos, el primero de los cuales, con una potencia nominal de 550 MW, está actualmente en construcción y se prevé entrará en funcionamiento en el año 1985.

El emplazamiento de esta central se ha elegido en la desembocadura del río Guadarranque, en la bahía de Algeciras, sobre formaciones recientes que rellenaron el antiguo estuario de ese río, constituidas por suelos de muy malas propiedades geotécnicas e importante espesor.

El suelo de la zona en su estado natural, como se verá más adelante, no reúne las condiciones geotécnicas mínimas necesarias para la realización, no sólo de una obra de la categoría de una central térmica, sino, probablemente, de ninguna otra construcción de una cierta importancia, por lo que el tratamiento de mejora del terreno para hacer posible esa construcción resultaba prácticamente imprescindible.

La razón fundamental que se esgrimió para ese tratamiento fue, sin embargo, la posible licuefacción

del suelo. Algeciras se encuentra situada en una zona sísmica, con un grado de intensidad VI en la escala macroscópica internacional M.S.K., lo que, unido a un suelo predominantemente arenoso, a su baja densidad, grado de saturación, etcétera, hacía presumiblemente posible esa licuefacción.

La compactación del terreno por vibroflotación ejecutada en Los Barrios presenta un caso —en cierto modo singular— en la práctica nacional de habilitación de suelos para la construcción, por la complejidad técnica del problema planteado, por el importante volumen de obra realizado y, finalmente, por el corto plazo de tiempo en que se ha llevado a cabo dicha obra.

En efecto, hace cerca de cuarenta años que se viene practicando en el mundo la vibroflotación (V.F.) como método de mejora de suelos, y, durante ese tiempo, en nuestro país no se ha hecho, probablemente, más de media docena de obras, en la mayor parte de las cuales se hizo una compactación de rellenos de material seleccionado, por lo que, en cierto modo, han constituido casos óptimos. Entre éstos podemos citar obras en los puertos de Barcelona, Cartagena y Las Palmas de Gran Canaria.

En Los Barrios se han presentado depósitos naturales, que han presentado serias dificultades técnicas para la obra, debidas, principalmente, a la diversidad de los tipos de terreno encontrados. Asimismo, el importante volumen de casi 700.000 m³

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de mayo de 1982.

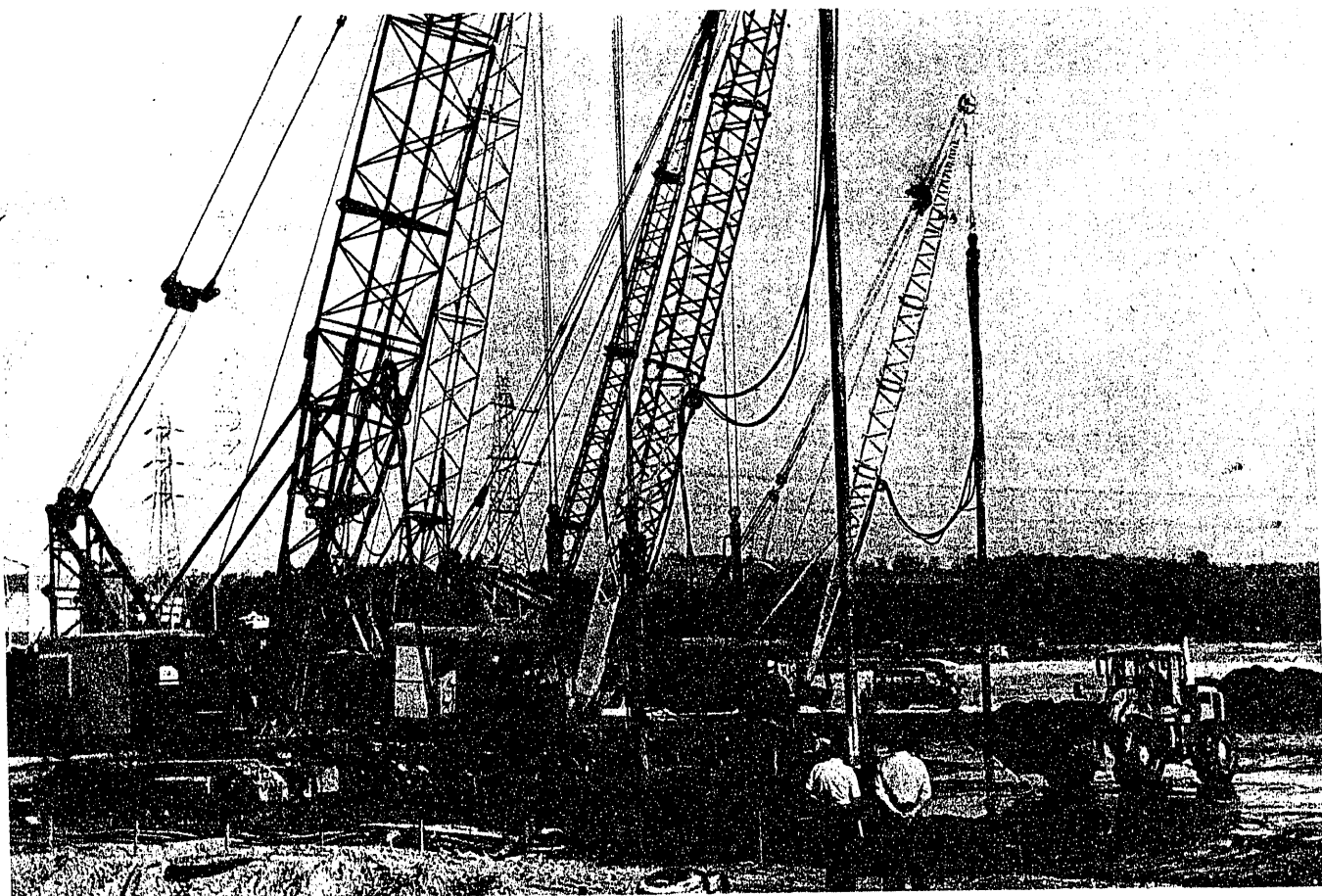


Fig. 1. Vista general de la obra. Cinco equipos de vibroflotación actuando en un mismo frente.

de suelo se ha compactado en un plazo de tiempo algo superior a los cinco meses.

Consideramos que esta obra constituye un buen ejemplo del desarrollo que, en general, han experimentado las técnicas de mejora de suelos, y, en particular, las de compactación por vibroflotación, y de la capacidad de empresas nacionales para resolver problemas de esa índole. El tratamiento de mejora del terreno realizado en Los Barrios se ha llevado enteramente a cabo por técnicos y especialistas nacionales de CIMENTACIONES ESPECIALES, S. A., y ANCLAJES, S. A., en colaboración con DRAGADOS Y CONSTRUCCIONES, S. A.

Consideramos que la experiencia de esta obra puede ser de interés para los técnicos y especialistas en la materia; lo que nos ha animado a preparar este artículo.

2. INFORMACION GEOTECNICA DE LA ZONA

La zona de emplazamiento de la central, salvo en una estrecha franja litoral formada por arenas de dunas, estaba ocupada por esteros y fangales, con una superficie prácticamente a nivel de mar, o ligeramente elevada sobre éste, por lo que, en buena parte, era inundable.

El Estudio Geotécnico previo a la obra consistió en una campaña de sondeos de reconocimiento, con realización de ensayos preferentemente standard (S.P.T.). En muy pocos casos se obtuvieron muestras inalteradas.

De este estudio se dedujo que, dentro de la zona y las profundidades que debían ser sometidas al tratamiento de mejora, el suelo es predominantemente arenoso, con un contenido de finos (tamiz 200) inferior, por lo general, al 10%, y con algunas zonas aisladas de hasta el 25%. Por lo que respecta a la densidad natural del terreno, expresada en térmi-

os de resistencia a la penetración de la cuchara andard (S.P.T.), arrojaba valores muy desiguales, comprendidos entre 6 y 25, con una media de unos 3.

En la descripción anterior del terreno se excluye la capa superficial de fangos, con un contenido de finos del 57% y superior, y de consistencia simicquida. Evidentemente, había que extraer estos fangos y sustituirlos por otro material, cualquiera que fuese el método de compactación.

De toda esta información se deducía que el terreno reunía unas buenas condiciones para la compactación.

Durante las pruebas de vibroflotación y ejecución de la propia obra, sin embargo, se llegó a la conclusión de que el terreno no era precisamente el antes descrito, pues se detectó una alternancia de capas con granulometría muy variable de unas a otras y, presumiblemente, con un contenido de finos en algunas de ellas bastante superior al ya citado.

Con anterioridad a la obra se hizo una campaña suplementaria de reconocimiento del terreno, esta vez mediante ensayos de penetración dinámica y estática, de la que se podían deducir unas densidades del terreno natural notablemente más bajas que las antes expuestas. Así, por ejemplo, los valores medios de resistencia del penetrómetro dinámico BORROS fueron, por lo general, inferiores a 10 golpes por 20 cm., y los de resistencia a la penetración de la punta del cono estático holandés estaban comprendidos, en la mayoría de los casos, entre 10 y 20 Kg/cm². Pero, como es lógico, de este reconocimiento adicional nada se pudo definir referente a la composición granulométrica del terreno, que es, en definitiva, el dato más importante para el éxito de la compactación.

Esta diferencia de los resultados del reconocimiento del terreno es debida, en nuestra opinión, a lo siguiente:

En primer lugar, al reducido alcance del reconocimiento del terreno anterior a la obra.

En segundo lugar, a las dificultades de una correcta ejecución del ensayo S.P.T. en los suelos aquí encontrados y, en particular, con los diámetros de perforación utilizados. Consideramos como probable que esos ensayos se hayan podido hacer, al menos en parte, sobre suelo sedimentado en el fondo de la perforación, posiblemente lavado. En este caso los valores de resistencia a la penetración «N» reflejarán una densidad del terreno mayor de la que realmente tiene y los ensayos granulométricos mostrarán un suelo aparentemente más arenoso que el efectivo.

Esto es lo que realmente observamos. Además, sinceramente, no encontramos otra explicación a los valores de «N», superiores —supuestamente— a los reales.

3. PLANTEAMIENTO DE LA MEJORA DEL TERRENO Y CRITERIOS Y METODOS DE CONTROL

La superficie que ocupa el grupo I de la central, de aproximadamente 42.000 m², se dividió en dos zonas, en función de la importancia de los equipos e instalaciones de cada una de ellas, de la carga que se transmitirá al terreno y de los asientos admisibles.

En la primera de esas zonas se incluyeron los principales equipos e instalaciones de la central (tolvas y calderas, turbinas, precipitadores, chime-neas, etcétera). Para la misma se exigió una compactación del terreno hasta profundidades mínimas de 18 a 20 m. En esta zona se consideró necesario, además de la compactación, hacer cimentaciones profundas mediante pilotes.

En la segunda zona, correspondiente a piscinas de agua bruta, parque de transformación, talleres y oficinas, etcétera, la compactación del terreno se debía extender a 12 m. de profundidad. Las cimentaciones serán superficiales.

Finalmente se modificaron esas profundidades, dejándolas en 16,5 m. en el primer caso y en 13,50 m. en el segundo, medidas desde la plataforma de trabajo situada a la cota + 1,50.

Unificando criterios en la compactación del terreno para ambas zonas, se estableció que a resistencia media mínima a la penetración del cono estático debía ser de 100 Kg/cm² o, siguiendo la relación $q_c = 4 N$, que N en el ensayo S.P.T. fuera igual a 25. Anticipándonos a lo que más adelante se comentará al respecto, diremos que esa relación dista mucho de ser correcta para las condiciones concretas de la obra de referencia.

Parece evidente que de todos los ensayos ideados para medir la densidad de los suelos a través de la resistencia a la penetración de distintos aparatos, el penetrómetro estático ofrece los resultantes más fiables y significativos. En particular, este aparato puede considerarse como el óptimo para el reconocimiento de suelos como los hallados en la zona de emplazamiento de la central en cuestión, pero en su estado natural. Después del tratamiento de mejora, y dada la densidad exigida, el reconocimiento del suelo con ese penetrómetro encontró serias dificultades; en muchos casos se llegó a agotar su capaci-

dad sin alcanzar la profundidad a la que se extendió el tratamiento.

Por ello, y sin descartar el uso del penetrómetro estático, hacía falta otro sistema de control de la compactación que permitiese, en primer lugar, alcanzar las profundidades de la compactación establecidas, y, en segundo, realizar un reconocimiento rápido y ajustado a la dinámica de la obra. Hay que tener en cuenta que con el tratamiento se ha cubierto una superficie de hasta unos 700 m² diarios. El penetrómetro elegido para este fin fue el dinámico DIN pesado, que, a pesar de ser poco conocido en el país, era el aparato que se había utilizado en otras obras de vibroflotación realizadas en España y en el extranjero, de las que teníamos referencia.

Sus características principales son las siguientes:

- Altura de caída: 50 cm.
- Peso maza: 50 Kg.
- Sección punta $\varnothing$: 15 cm².

El problema que se planteó al elegir este penetrómetro consistió en hallar la correlación entre los valores de resistencia a la penetración, medidos con penetrómetros estático y dinámico, para las condiciones concretas de esta obra.

El ensayo de penetración standard (S.P.T.) se descartó, ya que, además de ofrecer resultados puntuales en vez de continuos, como todos los demás aparatos, resultaba excesivamente lento para seguir la marcha de la obra.

Se acordó llevar a efecto el control de la compactación con la siguiente densidad de ensayos, como mínimo:

- Estáticos: 1 por cada 1.000 m².
- Dinámicos: 1 por cada 150 m².

Se exigió, asimismo, que los perfiles de resistencia a la penetración se analizaran de manera que, en cualquier intervalo de 3 m., el valor medio de los ensayos realizados en los centros de los triángulos definidos por la malla de vibroflotación, en el punto medio de uno de los lados y en un vértice, alcanzase el mínimo exigido de $q_c = 100 \text{ Kg/cm}^2$. No obstante, vistos los primeros resultados logrados, francamente positivos, el control se limitó a la ejecución de penetraciones únicamente en el centro de los triángulos.

Otra serie de controles, además de los ensayos de penetración estáticos y dinámicos, se realizan durante la propia vibroflotación y se comentan en el apartado 6: EJECUCION DE LA OBRA.

4. PRUEBAS Y PARAMETROS PRINCIPALES DE LA VIBROFLOTACION

Entre los parámetros fundamentales de los que depende el resultado de una compactación por vibroflotación en unas condiciones concretas, y establecidos previamente los criterios de compactación, cabe destacar, en un principio, el tipo de equipo de vibroflotación, el régimen de vibroflotación, la calidad del material de aportación y la densidad de puntos de vibroflotación.

El equipo disponible para esta obra era de parámetros fijos. El régimen de vibroflotación y el material de aportación se seleccionan durante las pruebas de compactación y son valores más o menos fijos. Por todo ello, en la propia obra sólo se puede modificar, prácticamente, la densidad de puntos de vibroflotación en función de los resultados que se vayan obteniendo.

Con anterioridad a la obra se definieron, con carácter orientativo, las parámetros básicos de la vibroflotación, con el fin de determinar el costo aproximado del tratamiento y hacer la correspondiente programación de la obra. De acuerdo con nuestra experiencia, en esa primera estimación la superficie se cubrió uniformemente con una malla de puntos de V.F. distribuidos en los vértices de triángulos equiláteros, con una densidad de un punto por cada 4,5 m².

No obstante, era evidente que, sólo con pruebas de compactación llevadas a cabo en la propia obra y con el equipo correspondiente se podían precisar esos parámetros.

Con este fin se realizaron diversas pruebas, de las que:

1. Se eligió el régimen óptimo de vibroflotación (particularidades de la perforación, caudal necesario de agua, tiempos, etcétera).

2. Se eligieron, entre cinco tipos de material de aportación ensayados, los más adecuados. Las pruebas se llevaron a la práctica con arena fina de playa, arena gruesa, grava seleccionada de 1 a 8 cm., zahorra y grava gruesa (rechazo), e iban orientadas no tanto a definir el material que, entre los indicados, ofreciera mejores resultados — la grava seleccionada se podía dar «a priori» como óptima para este fin — como a estudiar la posibilidad de utilización de otros materiales.

3. Se estableció como densidad de puntos para el comienzo de la obra uno por cada 3,0 m² en la zona de mayor profundidad de compactación y uno

COMPACTACION DEL TERRENO POR VIBROFLOTACION CENTRAL TERMICA DE "LOS BARRIOS"

por cada $3,5 \text{ m}^2$ en la de menor profundidad, dejando la posibilidad de ir abriendo o cerrando la malla en función de los resultados que se fueran obteniendo.

De estos ensayos se dedujo la posible utilización de la arena gruesa y la zahorra como materiales de aportación, descartando definitivamente para esta finalidad la arena de playa y el «rechazo».

De hecho, durante la marcha de la obra se puso de manifiesto que, a causa del importante volumen de material de aportación que se consumía, las canteras que lo suministraban no daban abasto, por lo que hubo que utilizar otros materiales, así como mezclas de los mismos.

En la obra de «Los Barrios» se utilizaron varias mallas, las cuales fueron sucediéndose en el orden siguiente:

- Malla cuadrada: 1 punto por cada $3,0 \text{ m}^2$.
- Malla triangular: 1 punto por cada $3,5 \text{ m}^2$.
- Malla triangular: 1 punto por cada $4,5 \text{ m}^2$.

Para el comienzo de la obra se eligió la malla cuadrada, dado que de haber tenido que reforzar el tratamiento de alguna zona con la intercalación de más puntos habría que haber duplicado el número de éstos, mientras que la malla triangular hubiera exigido triplicarlos.

5. EQUIPO DE VIBROFLOTACION

El equipo, la maquinaria y demás instalaciones que se precisan para una obra de vibroflotación se componen de las partes fundamentales siguientes:

- Equipo de vibroflotación propiamente dicho, formado por la unidad de vibroflotación, el grupo hidráulico y una bomba de agua.
- Maquinaria e instalaciones auxiliares: grúas, palas mecánicas y taller de reparación a pie de obra.

La unidad de vibroflotación consta de una columna circular, compuesta por el vibrador, un cuerpo antivibratorio, elementos tubulares de prolongación para obtener la longitud necesaria en cada caso, y, por último, el cabezal.

La frecuencia del vibrador puede estar, en principio, adaptada a las condiciones particulares de cada obra. Normalmente, sin embargo, se hacen vibradores con parámetros fijos, ajustados a unas condiciones medias, con el fin de evitar una excesiva variedad de equipos y las complicaciones de mantenimiento que esto trae consigo.



Fig. 2. Unidad de vibroflotación.

Los vibradores de la Casa Bauer utilizados en esta obra desarrollan 25 Ton. de fuerza centrífuga, con frecuencia de 3.500 r.p.m.

La vibración es horizontal exclusivamente, con una amplitud de 20 mm.

Los vibradores se alimentan a partir del grupo hidráulico, que se instala en la parte posterior de la grúa.

El agua que se precisa para la perforación y, en parte, para la propia vibroflotación, se suministra con bombas centrífugas de presión elevada. En Los Barrios se utilizaron bombas de 20 l/seg. de caudal y de 6 a 7 atm.

La maquinaria y las instalaciones auxiliares tienen una misión suficientemente clara, por lo que no nos detenemos en su descripción. Señalaremos únicamente la importancia que tiene para la buena marcha de la vibroflotación el taller a pie de obra. La unidad de vibroflotación, y muy especialmente su carcasa, se someten a un fuerte desgaste, el cual está en función de la abrasividad del terreno. Por ello es necesaria una reposición periódica de las carcasas con soldadura. Los propios vibradores, asimismo, precisan de frecuentes revisiones por estar sujetos a un régimen de trabajo muy duro. La importancia del taller se hizo notar aún más en Los Barrios debido a la intensidad de trabajo que tuvieron que soportar los equipos.

6. EJECUCION DE LA OBRA

La compactación del terreno por V.F. se llevó a cabo desde una plataforma de trabajo horizontal, situada a la cota + 1,50, previa sustitución de la ca-



Fig. 3. Suministro del material de aportación a las perforaciones con una pala mecánica.

pa superficial de fangos por otro material apto para ser compactado por este método. La cota final de urbanización de la Central será la + 3,0.

En base al plazo exigido por el cliente para la ejecución de la obra, así como por el rendimiento medio que presumiblemente se podía obtener, se estimó preciso realizar la misma con seis equipos de vibroflotación.

La compactación de 661.185 m³ de terreno se realizó en cinco meses y medio; durante el último mes el número de equipos se redujo a la mitad, debido principalmente a las dificultades que surgieron con el suministro de material de aportación, del que llegó a entrar en obra la importante cantidad de más de 2.000 m³/día, con una media de 1.150 m³/día. De haber trabajado con los seis equipos hasta finalizar la obra, ésta se hubiese terminado, aproximadamente, en cinco meses.

El orden de tratamiento de las distintas zonas se

definió en función de las prioridades establecidas por el cliente, empezando por la zona de tolvas y calderas, y pasando sucesivamente a turbinas, precipitaciones, chimenea, etcétera.

Siempre que fue posible se trabajó con los seis equipos en un solo frente. En algunos casos hubo que repartirlos en grupos de tres, y hasta dos equipos por grupo.

La necesidad de disponer de conducciones de agua para el funcionamiento de los equipos, así como la posibilidad de tener que atender varios equipos con una misma pala mecánica, hacen aconsejable la concentración de los equipos en un número reducido de grupos.

La toma de agua se hizo inicialmente en el mar, pasándola luego al río Guadarranque ante el peligro que podía correr con la llegada de los temporales de otoño.

Una obra de vibroflotación se efectúa como sigue: Se replantea la malla, normalmente triangular o cuadrada, en cuyos vértices se fijan con estacas los puntos donde se aplicará la vibroflotación.

En cada uno de esos puntos se hace una perforación bajo el efecto de la vibración, el chorro de agua a presión y el propio peso de la unidad de vibroflotación. Esta operación es muy rápida, llegando normalmente a rendimientos de 1 a 2 m/min.

Una vez alcanzada la profundidad deseada se procede a la vibroflotación propiamente dicha, en tramos sucesivos de abajo hacia arriba, y amontonando continuamente el material de aportación alrededor de la boca de la perforación, de modo que ésta pueda absorberlo sin limitaciones. Este material de aportación penetra libremente por el espacio anular que se forma entre la tubería y las paredes de la perforación.

Durante todo el proceso de vibroflotación se efectúan los controles siguientes:

- El volumen de material de aportación que toma cada perforación, que, en principio, no debe ser menor del establecido como normal con las pruebas.
- La presión en el sistema hidráulico, manteniendo el tratamiento en cada escalón hasta conseguir las presiones establecidas.

Como dato de interés de la obra de Los Barrios cabe destacar que, habiendo empezado con una malla de puntos de vibroflotación de uno por cada 3,0 m², se pasó seguidamente a 3,5 m² y finalmente a 4,5 m², sin que variase de forma apreciable el consumo de material de aportación, es decir, manteniendo la aportación media de 0,82 m³ por m.l. de perforación. Refiriendo esta cifra al volumen de suelo tratado, resulta que, por término medio y por cada metro cúbico de suelo natural, se introdujeron:

- 0,27 m³ de material de aportación con malla de 3,0 m².
- 0,23 m³ de material de aportación con malla de 3,5 m².
- 0,13 m³ de material de aportación con malla de 4,5 m².

con un valor medio referido a toda la obra de 0,21 m³, aproximadamente.

Esto tiene su explicación en el hecho de que para cada tipo de terreno el radio de influencia de cada punto de vibroflotación es un valor más o menos fijo, dependiendo de su composición granulométrica, densidad, etcétera. Mientras la distancia entre

puntos de vibroflotación sea tal que se produzca una intersección de los círculos definidos por esos radios de influencia, el consumo de material de aportación aumentará a medida que se incrementa la distancia entre puntos. De no producirse esa intersección, el consumo de material de aportación será un valor más o menos constante, independientemente de la distancia entre puntos.

7. RESULTADOS DE LA COMPACTACION

En las páginas que siguen se exponen los gráficos representativos de las resistencias a la penetración estática y dinámica de algunas zonas.

Ya indicamos anteriormente la mayor fiabilidad, por todos conocida, del ensayo de penetración estática, por lo que los resultados del mismo se han tomado como referencia básica para juzgar de la mejora del terreno conseguida.

Los resultados hablan por sí mismos. Los valores exigidos de $q_c = 100 \text{ Kg/cm}^2$ se han obtenido, en la práctica totalidad de los casos, aun cuando los puntos de control establecidos son los más desfavorables, ya que las penetraciones se han hecho únicamente en los centros de los triángulos o cuadros que forman la malla V.F.

De esos gráficos se puede deducir, aunque sea de forma indirecta, la bien acusada estratificación del corte del terreno, con capas de suelo que, presumiblemente, deben variar desde limos arenosos —y en parte arcillosos— hasta arenas limpias. Mientras en las capas de suelo fino se obtienen los 100 Kg/cm² por lo general sin excesos, en las de arena limpia se alcanzan, y aun superan, los 250 ó 300 Kg/cm². Esto es debido a que en suelos estratificados la malla de vibroflotación se define por las capas de terreno más fino o que peor se someten a la compactación. Por ello, con la misma malla que esas capas precisan para conseguir la densidad adecuada, en las restantes —más arenosas— se logran densidades superiores a las exigidas. El método de compactación del terreno por vibroflotación permite hacer un tratamiento diferenciado de cada una de esas capas hasta un cierto punto.

En los casos en que la capa o capas de suelo de granulometría más fina se encuentran en superficie se puede prever una malla más abierta para el conjunto del terreno, cerrándola posteriormente con puntos intercalados más cortos. Pero si esas capas más finas se encuentran en profundidad, la separación entre puntos de vibroflotación tiene que ser forzosamente la misma para toda la profundidad sometida al tratamiento.

Considerablemente más difícil se presenta la interpretación de los resultados de los gráficos de resistencia a la penetración dinámica y, en particular, la definición de la correlación existente entre resistencia a la penetración estática y dinámica.

Estos valores varían en amplios límites, según tipos de terreno e, incluso, profundidades. Inicialmente, de la interpretación de los resultados de las pruebas de vibroflotación que precedieron a la obra se estableció una correlación aproximada de:

$$q_c = 6 \times M \text{ para los 10 primeros metros.}$$

$$q_c = 3 \times M \text{ para la profundidad restante.}$$

siendo M el número de golpes por 20 centímetros de penetración del penetrómetro dinámico DIN y q_c la resistencia por punta del penetrómetro estático holandés.

En el transcurso de la obra se comprobó que esa correlación oscilaba en límites aún más amplios, llegando hasta 10 M en su límite superior.

Entendemos que esta disparidad de resultados puede deberse a la poca representatividad de las penetraciones dinámicas a partir de una cierta pro-

fundidad, la cual, en nuestro caso, podría ser del orden de 10 metros antes indicados por la adherencia al varillaje del suelo más limoso o limo-arcilloso.

Así, en algunos de los gráficos de resistencia a la penetración se puede observar que, a ciertas profundidades, mientras los valores q_c se mantienen más o menos constantes, las resistencias dinámicas aumentan linealmente con la profundidad. Ver, por ejemplo, la figura 6.

En cualquier caso, esta correlación entre resistencias tiene una importancia relativa debida al mayor número de ensayos dinámicos que estáticos, además de que en obra, siempre que surgió alguna duda en la interpretación de los ensayos dinámicos, se hicieron estáticos paralelamente.

Para ese control de la compactación se ha hecho un total de 85 penetraciones estáticas y 275 dinámicas.

Otro dato que puede aportar una valiosa información sobre la importante mejora del terreno obtenida está en el volumen de material de aportación introducido en el suelo con la vibroflotación. En es-

ZONA: TOLVAS Y CALDERAS

CONTROL DE LA COMPACTACION

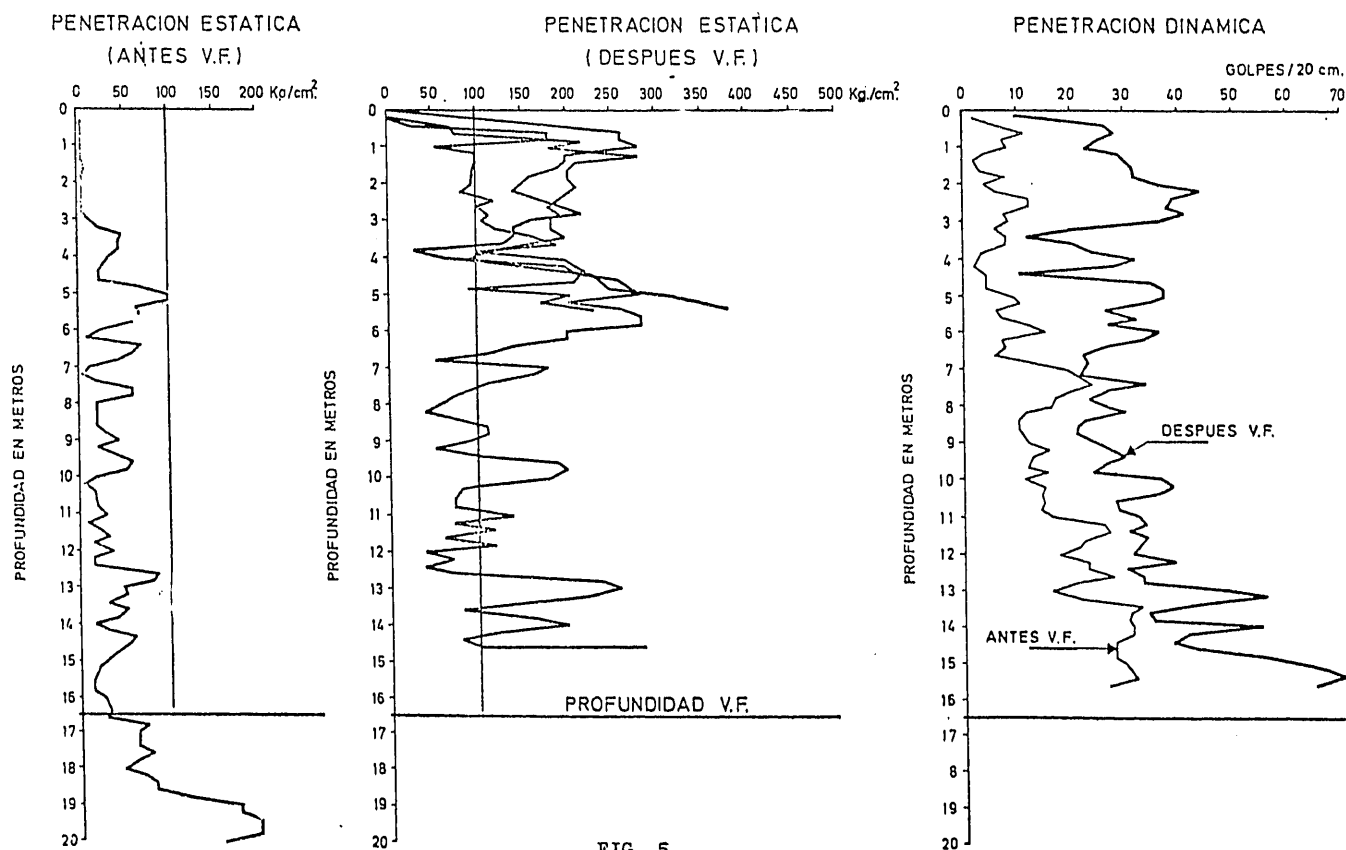


FIG. 5

ZONA : CHIMENEA

CONTROL DE LA COMPACTACION

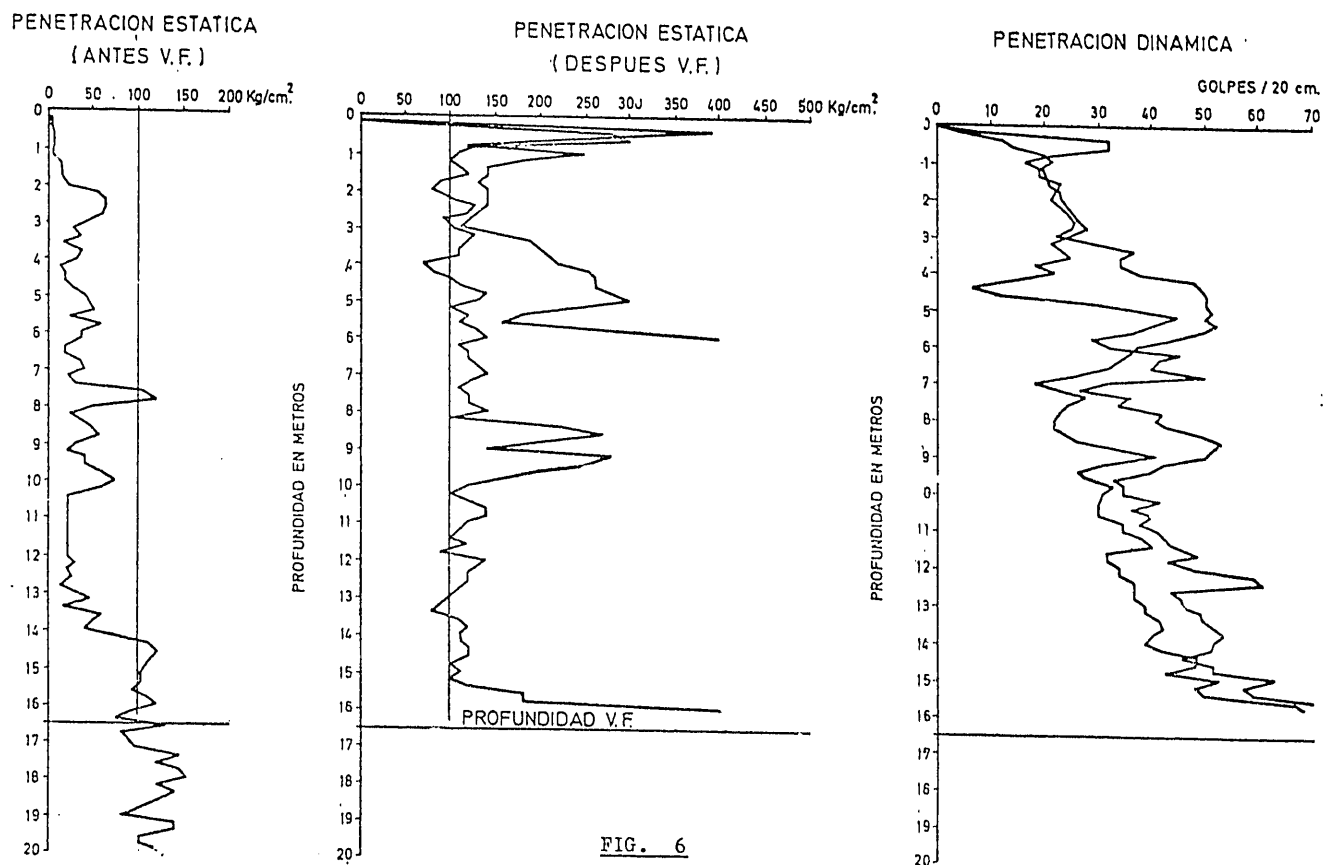


FIG. 6

ta obra, con un volumen de suelo compactado de 661.185 m³, se ha llegado a introducir en las perforaciones el importante volumen de material de aportación de 141.040 m³ o, por término medio, 0,21 m³ por cada metro cúbico de suelo natural.

El mismo nombre de este método de compactación de suelos —«vibroflotación»— hace principalmente alusión al reajuste de partículas, debido al efecto de la vibración y, consecuentemente, a su acomodación en una estructura más compacta. Sin embargo, sólo por este concepto de aportación de nuevo material al terreno se puede aumentar considerablemente la densidad del mismo, como se deduce del siguiente cálculo elemental: Si admitimos como parámetros representativos del suelo natural antes de su compactación una porosidad del 50%, índice de poros $e = 1,0$, y un peso específico de las partículas $\gamma_s = 2,67 \text{ tn/m}^3$ su peso específico será de $\gamma = 1,33 \text{ tn/m}^3$. Estos datos pueden caracterizar al terreno como una arena limosa o limo-arenosa suelta.

Después de introducir 0,21 m³ de material de aportación con $\gamma_d = 1,65 \text{ tn/m}^3$ por cada metro cúbico

de suelo natural, la densidad media seca del mismo llegará a alcanzar un valor de $\gamma_d = 1,68 \text{ tn/m}^3$, formando prácticamente un nuevo terreno con una densidad de media a elevada.

El efecto conjunto de la vibración y la aportación de material han hecho este método de compactación particularmente eficaz.

8. CONCLUSIONES

El tratamiento de mejora del terreno por vibroflotación realizado en la Central Térmica de Los Barrios presenta un indudable interés por el problema técnico resuelto.

Con esta mejora del terreno se ha hecho posible la construcción de la Central Térmica en una zona en la que, en condiciones naturales, probablemente no hubiera sido viable la construcción de ninguna obra de cierta importancia. Las cimentaciones profundas no hubieran podido, por sí solas, ofrecer soluciones más o menos aceptables, dado el gran espesor de las formaciones recientes.

ZONA: PISCINAS

CONTROL DE LA COMPACTACION

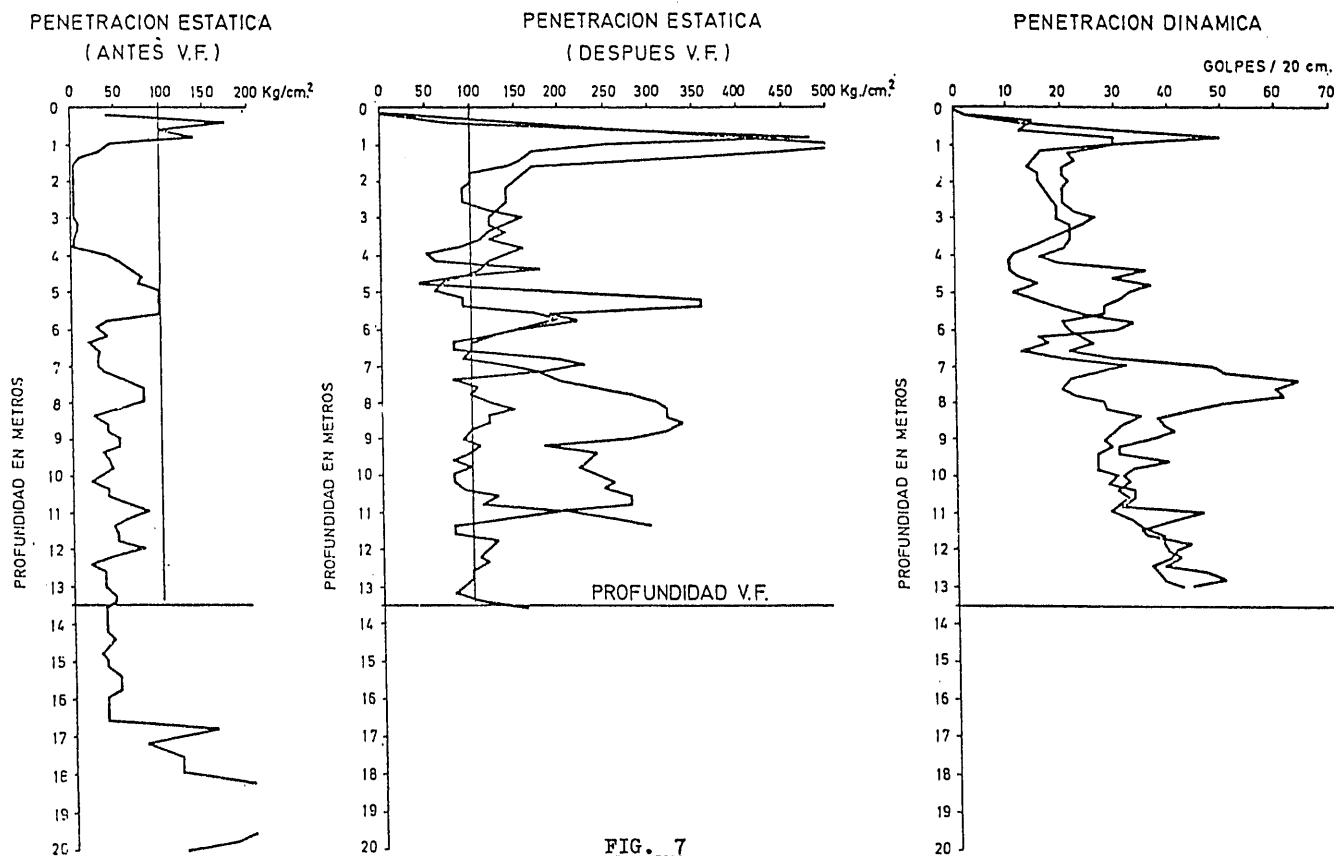


FIG. 7

En el caso concreto de la Central Térmica de Los Barrios, consideramos que la elección del método de vibroflotación para la mejora del terreno ha sido un gran acierto, por las razones fundamentales siguientes:

- Constituye, probablemente, el único método de compactación profunda de suelos que, por sí mismo, no tiene limitaciones prácticas de profundidad. Estas son impuestas por la capacidad de la grúa.
- Permite efectuar una compactación uniforme en profundidad, e, incluso, en suelos estratificados hacer un tratamiento diferenciado de las distintas capas del terreno.
- Ofrece, conjuntamente con la compactación por vibración del suelo, una considerable mejora del mismo por la aportación de material, normalmente de mejor calidad que el propio suelo natural.

Del caso de la Central Térmica que nos ocupa no

debe deducirse, sin embargo, que la vibroflotación es únicamente aplicable a grandes obras.

El campo de la vibroflotación es muy amplio; citemos que, entre otros casos, es aplicable:

- Para hacer viables, en general, cimentaciones superficiales en vez de profundas. En particular en los casos de aguas subálveas fuertemente agresivas, en los que, aun utilizando medidas especiales en las cimentaciones profundas, no se puede garantizar el normal funcionamiento de las mismas.
- Para el apoyo directo de grandes superficies cargadas, tales como tanques de combustible, soleras de naves, zonas de almacenamiento a cielo abierto, etcétera.
- Para el empotramiento de cimientos que deban absorber tracciones, etcétera.

Finalmente; resumimos los parámetros principales de la obra de la Central Térmica de Los Barrios.

COMPACTACION DEL TERRENO POR VIBROFLOTACION CENTRAL TERMICA DE "LOS BARRIOS"

DATOS

Superficie y profundidad del tratamiento:

• De 13,5 m	14.610 m ²
• De 16,5 m	26.535 m ²
TOTAL:	41.145 m ²

Volumen de suelo compactado 661.185 m³

Número de puntos de vibroflotación:

• 3.491 puntos de 13,50 m	47.128 m.l.
• 7.600 puntos de 16,50 m	125.400 m.l.
TOTAL:	172.528 m.l.

Volumen material de aportación introducido en el terreno 141.040 m³

Volumen medio de material de aportación:

• Por m.l. de perforación	0,82 m ³
• Por m ³ de suelo natural.	0,21 m ³

lo que equivale a haber hecho 11.091 columnas de grava de aproximadamente un metro de diámetro medio. Sin aportación de material, esto equivaldría a haber comprimido 3,4 m. la zona de 16,5 m. de profundidad de tratamiento y 2,75 m. la zona de 13,5 m.

TIEMPO DE EJECUCIÓN DE LA OBRA. ~ 5 MESES