

Análisis experimental de la compactación dinámica profunda en suelos arenosos

LUIS TISSERA BRACAMONTE (*)

RESUMEN La compactación dinámica profunda (C.D.P.), es una Técnica usual para el tratamiento de terrenos de mala calidad geotécnica, como lo son los rellenos o los suelos granulares flojos.

El análisis de la C.D.P. se ha desarrollado experimentalmente, en un modelo reducido de laboratorio, con el auxilio de la instrumentación electrónica de transductores de tensión y osciloscopio. El objeto de la investigación a escala reducida, fue medir y apreciar el efecto evolutivo de los impulsos en la estructura de un suelo arenoso, simulando la consecuencia de los impactos de alta energía a escala natural, que proporciona una maza en caída libre de peso $W=10-20$ T y altura $h=10-12$ m.

La arena tratada, responde a dos tipos de modelos matemáticos, de suelo rigidizable e histerético, que tienen un comportamiento mecánico asociado y complementario.

Entre las principales conclusiones, se destaca el conocimiento de la interacción entre el impacto de maza y el suelo compactado, con la incidencia de los parámetros geotécnicos: grado de saturación y densidad inicial, como así el diámetro de maza y energía de caída.

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF DEEP DYNAMIC COMPACTION IN SANDY SOILS

ABSTRACT Deep dynamic compaction (D.D.C.) is an habitual technique for dealing with terrain of poor geotechnical quality, such as backfills or loose granular soils.

Analysis of the D.D.C. has been effected experimentally, in a reduced laboratory model, with the aid of electronic instruments, including voltage transducers and an oscilloscope. The purpose of this small-scale investigation was to measure and observe the evolutionary effect of the impulses on the structure of a sandy soil, simulating the consequence of full-scale high energy impacts from a free-falling hammer-head, with a weight $W=10-20$ T, from a height of 10-12 m.

The sand in question corresponds to two kinds of mathematical models, of hysteretic soil susceptible to rigidification, which possess an associated and complementary mechanical behaviour.

Amongst the principal conclusions, most noteworthy is the discovery of the interaction between the impact of the hammer on the compacted soil and the incidence of the geotechnical parameters: degree of saturation and initial density, as well as the diameter of the hammer-head and the free-fall energy.

Palabras clave: Compactación; Tratamiento; Rellenos; Granulares; Tratamiento.

1. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS

El equipo experimental a escala reducida, figura 1.a, utilizado en los ensayos de laboratorio, se ha proyectado con similitud geométrica y cinemática, con los equipos de grúas de obras habituales en los trabajos de C.D.P. como se muestra en las figuras 1.a y 1.b.

El equipo de ensayo a escala reducida, utilizado en la experimentación, se compone de: molde de arena, maza, células de carga en el interior del molde regulador de tensión, osciloscopio y plóter. En la figura 2 se presenta el esquema del ensayo de C.D.

Estos ensayos han mostrado el cambio de arena "floja" inicial, con ondas de amplitud reducida, a impulsos agudos con valores picos y convergentes de amplitud, debida a la rigidez alcanzada durante la C.D. que le confiere al final del proceso un alto grado de "densidad". El fenómeno descrito de variación de impulsos, se muestra en la figura 3.

2. PROCESO DE INTERACCIÓN

La interacción entre la maza de C.D. y la arena tratada, se refleja en la deformación del semiespacio tratado, que deja en la superficie de contacto maza-suelo, una depresión en forma de cráter.

Se efectuaron ensayos combinando las variables de maza (peso W , y diámetro d), con una misma altura de caída $h=1,0$ m, utilizando material de arena semisaturada y seca, obteniendo como resultado las curvas de penetración " ΔH " vs n° de impactos " N " figura 4.

De la figura 4, y de los ensayos realizados se deduce lo siguiente:

- La arena seca necesita un mayor n° de impactos N , para alcanzar igual profundidad de cráter ΔH , que un suelo semisaturado (comparación curvas 1 y 2).

La causa puede ser el efecto de la humedad concentrada en las partículas de arena fina y/o limo, haciendo un efecto lubricante entre partículas de arena gruesa, que

(*) Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe Dpto. de Estudios Geotécnicos. SGS, Tecnos.



FIGURA 1a. Molde y dispositivo de ensayo.



FIGURA 1b. La C.D.P. a escala natural. (Puerto de El Ferrol, abril de 1994). Gentileza de ENDESA.

favorece inicialmente una fácil penetración, hasta converger rápidamente al asiento estabilizado ΔH_e .

- El suelo seco necesita un mayor n° de golpes porque es más resistente a la acción exterior.
- Cuando aumenta el diámetro de maza d , y se mantiene el mismo peso W (curvas 2 y 3), disminuye así la presión de contacto y el cráter estabilizado se obtiene para una menor depresión ΔH .

2.1. ANÁLISIS DE LA DEFORMACIÓN

Al final del proceso de C.D. cuando el suelo alcanza su máxima rigidización compatible con la energía aplicada, la de-

formación total " ϵ ", se puede expresar como la suma algebraica, de la deformación reversible e irreversible:

$$\epsilon = \sigma \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{\pi} \right) = \epsilon_1 + \epsilon_2 \quad [1]$$

Siendo:

σ = Tensión de contacto.

E = Módulo de deformación elástica.

π = Módulo de deformación plástica.

En la deformación de suelos con cargas cíclicas, el equilibrio estable entre fuerzas externas e internas, se consi-

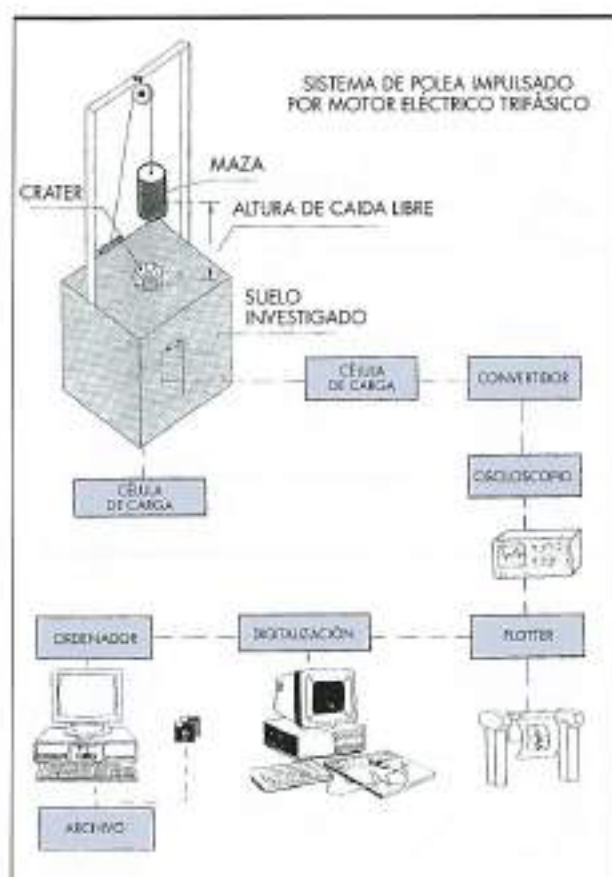


FIGURA 2. Esquema de ensayo experimental de C.D.P.

que como resultado de la múltiple aplicación de cargas. Ante cargas repetidas el suelo se consolida, y se produce una progresiva disminución de la deformación plástica,

por esto, el módulo de deformación de un ciclo a otro aumenta.

Por analogía a la ley de Newton, entre la tensión y la velocidad de deformación, se puede establecer la siguiente relación:

$$\sigma = \eta \frac{d\varepsilon}{dt} \quad [2]$$

Siendo:

η = Coeficiente de resistencia viscosa.

ε = Deformación específica irreversible del suelo.

La variación del coeficiente de viscosidad en el tiempo, se expresa por la siguiente ley:

$$\eta = \eta_0 (1 + \chi t) \quad [3]$$

Siendo:

η_0 = Coeficiente inicial de resistencia viscosa.

χ = Constante del suelo.

t = Tiempo hasta consolidar.

Reemplazando términos y desarrollando la expresión (1), se obtiene la deformación total ε del suelo sin consolidar, después de una aplicación instantánea de carga. La deformación posterior en el transcurso del tiempo t , se puede calcular por la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \sigma \left[\frac{1}{E} + \frac{1}{\pi} + \frac{1}{\eta_0} \ln(1 + \chi t) \right] \quad [4]$$

2.2. DEFORMACIÓN PLÁSTICA CON CICLOS SUCEIVOS

Para la determinación de deformación irreversible acumulada bajo cargas repetidas, se ha deducido una ley logarítmica con el n° de impactos para estimar la deformación resultante,

$$\varepsilon = \varepsilon_{01} (K \log n + 1) \quad [5]$$

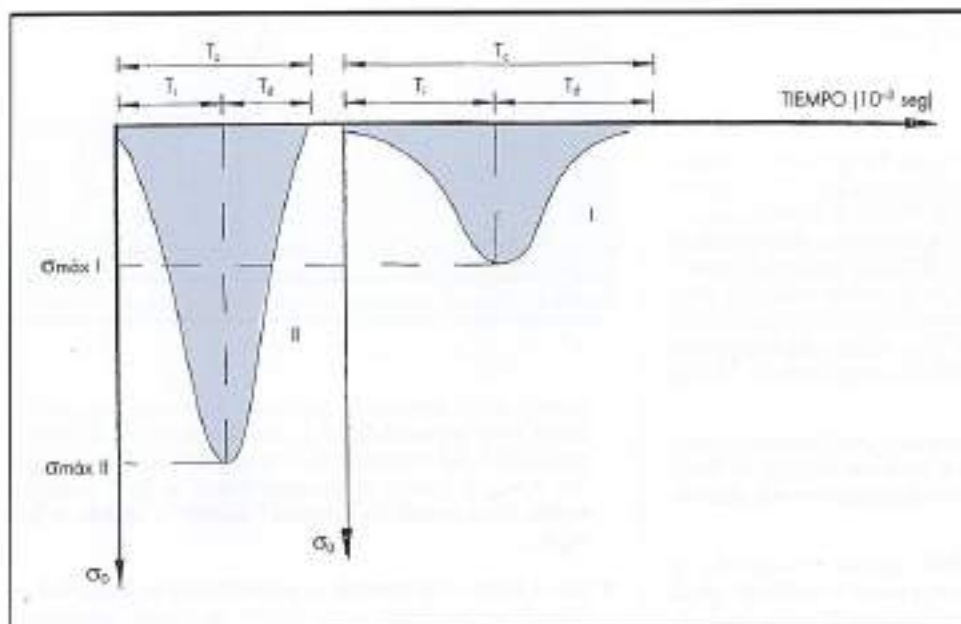
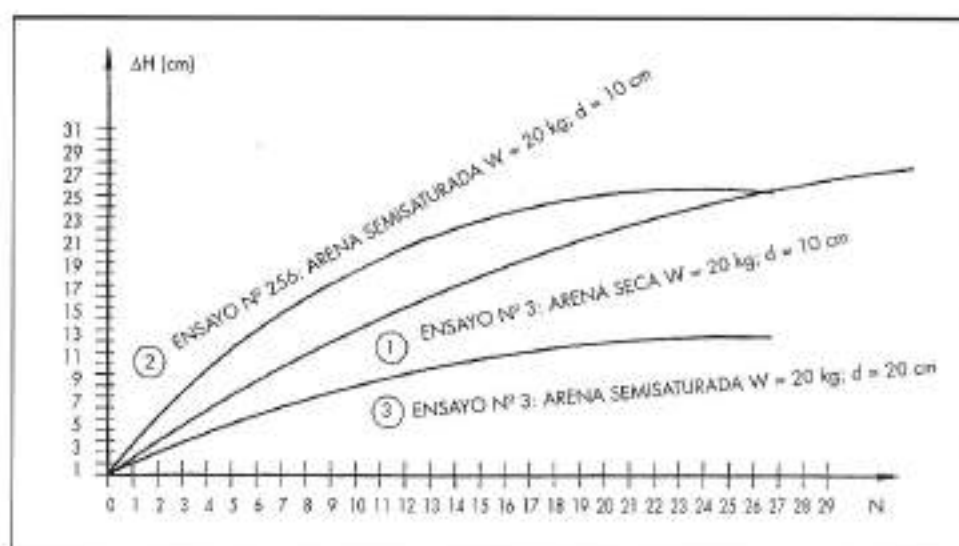


FIGURA 3. Impulsos correspondientes a dos grados de densidad relativa (D_r) diferentes en un mismo punto. La onda II es mayor en amplitud a la onda I, y tiene la oscilación menor tiempo de duración.

FIGURA 4. Curvas de penetración ΔH vs n° de impactos "N".

- 1) Arena seca:
 $W = 20$ kg;
 $d = 10$ cm.
- 2) Arena semisaturada:
 $W = 20$ kg;
 $d = 10$ cm.
- 3) Arena semisaturada:
 $W = 20$ kg;
 $d = 20$ cm.



Donde:

ϵ_{v1} = Deformación irreversible para la 1ª carga.

K = Coeficiente de acumulación de la deformación irreversible.

n = N° de impactos

La fórmula anterior resultó bastante aproximada para $n < 20-30$.

Para arena seca el valor del coeficiente de deformación obtenido fue $K = 3,6$, y para arena semisaturada $K = 2,8$.

3. PRESIÓN INDUCIDA

El amortiguamiento del flujo de la presión vertical de compresión inducida σ_v , en el semiespacio de un suelo arenoso en condición seca y semisaturada, responde en el eje de la columna tratada del ensayo experimental, a una curva parabólica. Como se aprecia en la figura 5, la variación del coeficiente de amortiguamiento de presión " I_u " en arena seca, es más brusca y se produce en una menor profundidad, que en arena semisaturada.

4. CONCLUSIÓN

- La instrumentación electrónica ha hecho posible visualizar y analizar el proceso de rigidización histórica en el semiespacio suelo, que provoca la C.D.P., mediante una serie de impactos en el modelo experimental, que simula la grúa de obra, de alta energía. En cada punto del semiespacio tratado, la amplitud de los impulsos inducidos crece hasta converger, según lo hacen los parámetros geotécnicos de la densidad aparente " ρ_s " y ángulo de rozamiento interno " ϕ ", consecuencia del acomodamiento de las partículas.
- Cuando la arena alcanza la máxima densificación, compatible con la energía de impacto aplicada, la onda de la oscilación transmitida tiende a su estabilización, con una amplitud pico convergente.
- Si la humedad natural del suelo tratado es inferior a la óptima, $w \% < w_{op} \%$ del ensayo proctor modificado, se da la condición propicia de semisaturada para la C.D.,

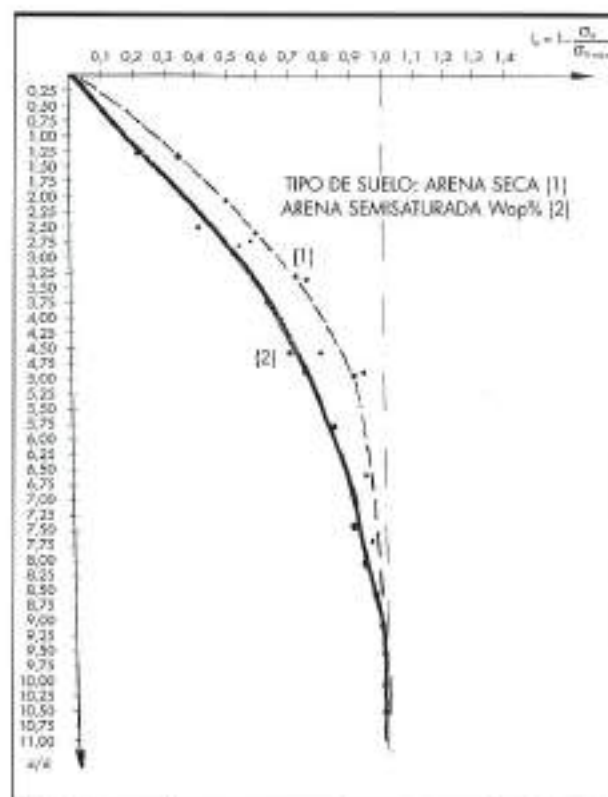


FIGURA 5. Curvas de amortiguamiento de presión I_u vs profundidad z/d .

puesto que el proceso de expulsión de la fase gaseosa depende de la permeabilidad al aire K_a , y esta se reduce en un 60-80% del volumen de vacíos, cuando la humedad $w \% \approx w_{op} \%$, e incluso la permeabilidad se hace prácticamente nula cuando la humedad supera la óptima $w \% > w_{op} \%$.

- En el suelo semisaturado al concentrarse la humedad en las partículas finas, éstas hacen de efecto lubricante,

favoreciendo así el desplazamiento de la arena, con la consecuente reducción del índice de huecos. Por lo dicho, el contenido óptimo de limo/arcilla, está entre 10-12 %, y si el contenido aumenta > 25%, el terreno se humedece en menor medida y ofrecerá una mayor resistencia a la C.D.

- La deformación específica del 1º impacto ϵ_1 , marca la pauta de la deformación final ϵ_m , y el nº de impactos necesarios, hasta obtener el rechazo. En arena seca, se necesita un mayor nº de golpes, para estabilizar su asiento.
- La presión inducida al semiespacio, varía en relación con la magnitud de la presión de contacto σ_v , disminuyendo con la profundidad "z". A igualdad de energía potencial, la presión disminuye con el aumento del diámetro de maza "d". Se ha comprobado que el amortiguamiento de la presión I_{av} , es más intensa en arena seca, por la mayor resistencia a cargas exteriores.
- La densidad de la arena tratada también varía con la profundidad, desde un máximo en superficie, hasta un mínimo a una profundidad z, en donde la presión inducida es insuficiente para densificar el terreno.
- Mientras menor sea la densidad inicial del suelo tratado, mayor será el nº de golpes necesarios hasta alcanzar la estabilización en la deformación ϵ_m .
- En síntesis, la investigación basada en los ensayos experimentales nos demuestra el comportamiento evolutivo de los impulsos inducidos en la estructura suelo consecuencia de la presión de impactos sucesivos, con una apreciación cualitativa y cuantitativa del fenómeno de interacción maza-suelo, que genera una mejora en los parámetros resistentes de capacidad de carga.
- Finalmente, en los trabajos de obras de C.D.P., los ensayos previos de prueba dirigidos e interpretados por un técnico especializado, permitirán definir y afirmar los parámetros del tratamiento, para cada obra en concreto, con el objeto de realizar una mejora eficaz del terreno, mediante el empleo de un consumo mínimo de energía.

AGRADECIMIENTOS

- Al cuerpo de profesores del Dpto. de Ing. y Morfología del Terreno de la Escuela de Caminos de Madrid, por el asesoramiento recibido en esta investigación y a otros tantos compañeros que me apoyaron; en particular a Eduardo Quiles Aparisi y Julián Rojo López, directores de mi Tesis Doctoral "Compactación dinámica profunda en Arena. Análisis y aplicación al tratamiento del terreno" (diciembre 1996).
- A todos mis compañeros de la empresa SGS Tecnos, S.A. (centro de trabajo al que pertenezco), y en especial a los que me aportaron su valiosa colaboración.

BIBLIOGRAFÍA

- CHOW Y. K.; Member, ASCE, YOUNG D. M. M. YOUNG K. Y. Member, ASCE, and LEE S.L., Fellow, ASCE, "DYNAMIC COMPACTION ANALYSIS", Republic of Singapore (1992). Journal of Geotech, vol. 118 N° 8 (1992).
- FARACO C. "Compactación en profundidad mediante vibroflotación", Revista de Obras Públicas (1974).
- FARACO C. "Ensayos de Compactación a escala Natural en el Puerto de la Luz", Boletín del Lab. de Carr. y Geot. N° 148 (1981).
- FOURNIER A.; RAULT G. "Mesure en profondeur du déplacement vertical d'un sol sous l'action de charges dynamiques". Bull. Liaison labo. P. et Ch. 80 - nov.-dec 1975 - Inf. 1737.
- JIMÉNEZ SALAS J. A. "Conceptos básicos de la Compactación", Boletín del Lab. de Carr. y Geot. N° 141 (1980).
- LEONARDS G.; CUTTER W. and HOLTZ R. "Dynamic Compaction of Granular Soils", School of Civ. Eng., Purdue Univ. Lafayette, Ind. Journal of Geotec. Eng. vol. 106 N° GT1 (1980).
- LÓPEZ RUIZ A. "Primeras obras de Mejora del suelo Mediante compactación dinámica profunda en España" y "Mención del Congreso de Helsinki (1983), VIII ECSMFE.
- LO WEY KWANG; OOI LEE PENG and seng-LIP LEE. "UNIFIED APPROACH TO GROUND IMPROVEMENT BY HEAVY TAMPING". Dep. of Civ. Eng. nat. univ. of Singapore. Journal of Geotech Eng. vol. 116 N° 3 (1990).
- MAYNE P. ASCE; JONES J. "Ground Response to dynamic compaction", Journal of Geotec. vol. 110, N° 6 (1984).
- MENARD L. and BROISE Y. "Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation", Journal Geotech. vol. 25 N° 1 (1975).
- OTEO MAZO C. "Tendencias en el control de la calidad de la compactación", Curso de compactación y maquinaria especializada. Colegio ICC y P., Madrid (1992).
- PORAN C. SEN HEH K. and RODRÍGUEZ J. "Impact Behavior of Sand", Soils and Foundations vol. 32, N° 4, 81-92, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Dec. 1992.
- PORAN C. and RODRÍGUEZ J. "Finite element analysis of impact behavior of Sand", soils and foundations vol. 32 N° 4, 68-80, Japanese Society of Soil Mechanics and foundation Engineering, Dec. 1992.
- PORAN C. and RODRÍGUEZ J. "Design of dynamic compaction", Civil Engineering Department, University of North Carolina at Charlotte - U.S.A. 1991, Journal Geotécnica (1992).
- ROJO, J. "Fundamentos de la compactación por ciclos de carga y descarga", curso de compactación y maquinaria especializada. Colegio ICC y P. Madrid (1992).
- TISSERA L. "Un caso de mejora de terreno por compactación dinámica para cimentación superficial", ingeniería Civil - CEDEX - N° 84 (1992), y boletín de la Soc. Esp. de Mec. del Suelo y Cimentaciones, N° 106 (1992).
- URIEL A. "Mejora de terrenos por medios dinámicos", Curso de tratamiento de Terrenos, Fundación A. Bethencourt- Madrid (1986).



CON G.O.C. ESTARÁ ASISTIDO

En **G.O.C.** encontrará la información, el seguimiento permanente y la asistencia técnica a su proyecto y obra.

Con **G.O.C.** tendrá la mejor asistencia.



G.O.C.

CONSULTORÍA Y GESTIÓN DE LA CALIDAD

EN VIGO: C/ DOCTOR CANO 5, BAJO. TELF.: 902 377 111.

EN MADRID: C/ AMARA 8, 1º D. TELF.: 902 185 045.

