

Ventajas del uso de técnicas de mejoramiento de suelos mediante compactación: Dinámica (CD) y de impacto rápido (RIC) en la mitigación de potencial de licuación dentro de un predio de alto riesgo sísmico en la costa occidente de México.

Advantages of using soil improvement techniques through: dynamic compaction (DC) and rapid impact compaction (RIC) in mitigating liquefaction potential within a high seismic risk site on the west coast of Mexico

Juan Alfredo Carmona

Menard, México; carmona.juan@menard.com.mx

Gabriel Andrés Portillo & Gabriel Lira Alvarez

Menard, México; portillo.gabriel@menard.com.mx; lira.gabriel@menard.com.mx

RESUMEN: El proyecto de referencia consiste en la ampliación de una central eléctrica la cual ocupará una superficie de 32,000 m², más una franja lineal de aproximadamente 500 m por ocho metros de ancho, para la instalación de una tubería de agua de la actual obra de toma del proyecto hacia la nueva instalación. La estratigrafía del sitio evidencia la existencia de depósitos superficiales de arena suelta a media, al menos hasta los seis primeros metros y un nivel freático promedio a tres metros de profundidad. La problemática identificada es potencial de licuación en estratos entre 3.0 y 5.5 metros de profundidad y baja capacidad portante de los estratos superficiales. Para mitigar el potencial de licuación de los estratos debajo del nivel freático, en el predio principal de la central se empleó la técnica de compactación dinámica (CD) y para el caso de zonas específicas del proyecto se empleó la técnica de compactación de impacto rápido (RIC), cuyo alcance de mejoramiento es menor a la compactación dinámica por las propias características de esta técnica; sin embargo, presenta otras ventajas en comparación con la CD. El documento pretende describir las ventajas del uso de estas técnicas de mejoramiento CD y RIC en beneficio del proyecto de la central generadora.

ABSTRACT: The reference project consists of the expansion of a power plant which will occupy an area of 32,000 m², plus a linear strip of approximately 500 m per eight meters wide for the installation of a water pipeline from the current intake work to the new facility. The stratigraphy of the site shows the existence of superficial deposits of loose sand, at least up to the first six meters, and a water level table averages three meters deep. The problem identified is liquefaction potential in layer between 3 and 5.5 meters deep and low bearing capacity of the superficial strata. To mitigate the liquefaction potential of the strata below the water table, the dynamic compaction (DC) technique was used on the main site of the plant, and in the case of specific areas of the project, the rapid impact compaction technique was used (RIC), whose scope of improvement is less than dynamic compaction due to the characteristics of this technique; However, it has other advantages compared to DC. The document aims to describe the advantages of using these DC and RIC improvement techniques for the benefit of the generating station project.

KEYWORDS: Licuación, arena suelta, Compactación dinámica, Compactación de impacto rápido, Técnicas de mejoramiento

1 INTRODUCCIÓN

El proyecto consiste en la construcción de una central de ciclo combinado (CCC), ubicada en la ciudad de Manzanillo, en el estado costero de Colima, México. Ver Figura 1. Cabe aclarar que el predio se encuentra dentro del polígono de la actual central generadora de energía, con capacidad total de 2,804 MW.

La problemática principal es relacionada con el potencial de licuación alto que existe en la zona y que afecta el polígono principal del proyecto, la obra de toma y sistema de circulación, Figura 2. Lo anterior debido a la naturaleza granular y suelta del suelo, así como, a las magnitudes sísmicas de la región, los cuales se confirman con los parámetros sísmicos de los espectros de sitio. Con el fin de mitigar el potencial de licuación, se propuso un mejoramiento de suelos mediante compactación dinámica (CD) y compactación de impacto rápido (RIC).

2 CONDICIONES GEOTÉCNICAS

La campaña de exploración geotécnica consistió en la ejecución de:

- Siete (7) sondeos de penetración estándar, de profundidades variables entre 30 y 45 m.
- Once (11) (PCA) pozos a cielo abierto, con profundidad variable entre 3.0 y 3.65 m, que estuvo condicionada por la aparición del nivel de aguas freáticas. De estos PCA se obtuvieron muestras representativas por estrato, integrales y cúbicas inalteradas.
- Once (11) sondeos mediante el cono dinámico "PANDA".
- Trece (13) sondeos con piezocono (CPTu), alcanzando profundidades variables entre 4.1 y 6.12 m, debido al rechazo durante el proceso de hincado.



Figura 1. Ubicación del Proyecto de la CCC



Figura 2. Polígono principal de la CCC

A partir del análisis e interpretación de la información anterior, se pudo definir el modelo geotécnico de la Tabla 1, en la cual se observan estratos de arenas sueltas entre 0 a 5.5 m, las cuales, muestran ser potencialmente licuables por debajo del nivel freáticas (3.0 m).

Tabla 1. Modelo geotécnico

Unidad Geotécnica	H [m]	γ [kN/m ³]	E_y [kPa]	P_l [kPa]
U1-SM	0.0 - 3.0	17.5	19,000	750
U2-SP	3.0 - 5.5	18.0	30,000	1,200
U3a-SM	5.5 - 7.0	18.6	43,000	1,700
U3b-SM	7.0 - 10.0	19.5	63,000	2,500

Donde: γ es el peso volumétrico del suelo, E_y es el módulo de elasticidad del suelo, P_l es la presión límite del suelo.

3 ANÁLISIS DE LICUACIÓN

Para el cálculo del potencial de licuación se empleó el método simplificado de Youd et al (2001), el cual relaciona el esfuerzo cíclico inducido por un sismo en estratos potencialmente licuables, con la resistencia a la penetración, del sondeo de penetración estándar (SPT). Los valores de N_{SPT} y el esfuerzo cíclico, definen puntos en un plano en el que, a partir de experiencias anteriores, se dibuja una curva que separa los puntos que definen casos de licuación durante sismos de aquellos en los que no se produjo el fenómeno. Youd et al (2001) propusieron la ecuación 1 que establece un factor de seguridad contra la licuación de la siguiente manera:

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} M_{SF} K_{\sigma} K_{\alpha} \quad (1)$$

Donde: FS, es el factor de seguridad frente a la licuación, considerando $FS > 1.0$ como capa no licuable; M_{SF} , es el factor de escala de magnitud dado por la magnitud del sismo de diseño (M_w); K_{σ} , el factor por esfuerzos de confinamiento; y K_{α} , el factor por esfuerzo cortante estático.

$CRR_{7.5}$ es la relación de la resistencia cíclica que está en función del número de golpes en la prueba de penetración estándar (N_{SPT}), normalizada a una magnitud de sismo de 7.5. La cual viene dada por la ecuación 2.

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10(N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200} \quad (2)$$

CSR es la relación de esfuerzos cíclicos promedio (demanda sísmica), dada por la ecuación 3:

$$CSR = \frac{0.65(\sigma_v) \left(\frac{a_{max}}{g}\right)}{\sigma'_v} r_d \quad (3)$$

Donde: σ_v , es el esfuerzo vertical total; σ'_v , el esfuerzo vertical efectivo; g , la aceleración de la gravedad; a_{max} , la aceleración máxima del suelo; y r_d , el coeficiente de reducción de esfuerzos cortantes.

Los parámetros de riesgo sísmico para el sitio de estudio que fueron empleados para determinar el potencial de licuación del terreno se obtuvieron a partir de un estudio de respuesta sísmico. De este estudio particular se deriva que la magnitud del sismo (M_w) del sitio es de 8.4 y la aceleración máxima en la superficie del terreno es $a_{max} = 0.72 g$ asociados a un periodo de retorno $Tr = 475$ años.

En la Figura 3, se observan los resultados del análisis de licuación para el sondeo más desfavorable, el cual reporta potencial de licuación a una profundidad máxima de 5.5 m. Analizando los demás sondeos se encontraron igualmente condiciones de licuación a profundidades similares.

4 PROPUESTA DE MEJORAMIENTO DE SUELOS

A partir de las curvas granulométricas en los estratos licuables, se realiza el análisis para conocer la viabilidad del mejoramiento de suelos mediante compactación dinámica, CD. El tamaño de partícula del suelo para la compactación dinámica cae dentro de

la zona A clasificada como “fácilmente compactable”. Ver Figura 4.
 Se concluye que la CD técnicamente es viable como solución de mejoramiento de suelos ante el potencial de licuación para este proyecto.

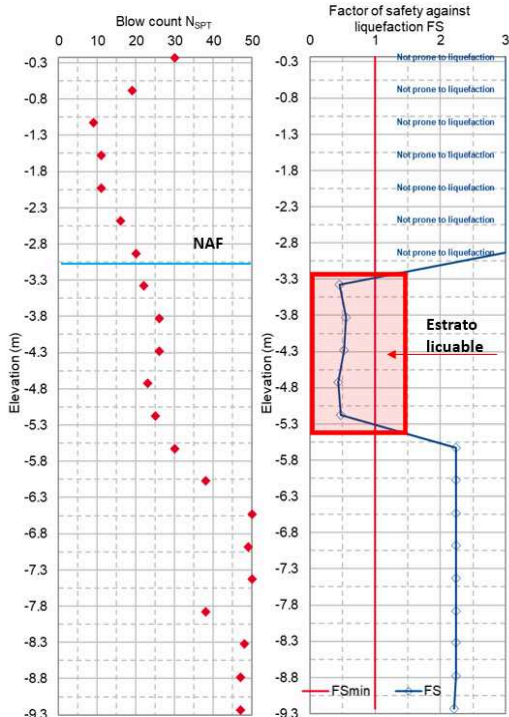


Figura 3. Factor de seguridad contra licuación antes del mejoramiento

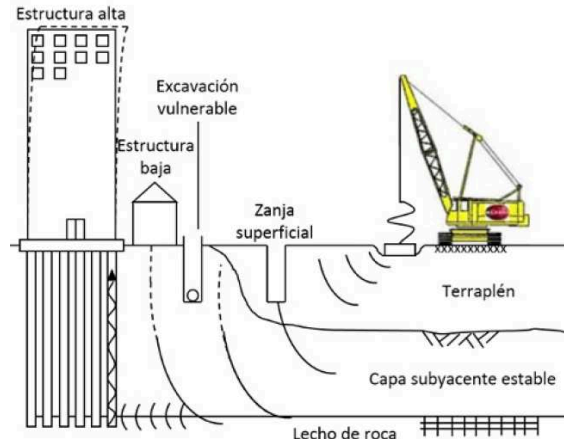
Figura 4. Curva granulométrica de los estratos licuables

Con la aplicación de esta técnica de mejoramiento de suelos, se busca compactar los estratos predominantemente friccionantes con baja densidad relativa y mitigar el potencial de licuación hasta una profundidad de 5.5 m.

Por otra parte, debido a las características del sitio, en particular la presencia de estructuras en operación en el norte y en el oeste del predio, así como la presencia de un ducto de gas en el sur y sureste del predio, la aplicación de un método de mejoramiento de suelos mediante compactación de impacto rápido (RIC) fue necesario. Este método se implementó cuando la distancia con las estructuras en operación fue de al menos de 30 m (15 m para

torres eléctricas metálicas). De igual manera como medida preventiva, se aplicó un método de mitigación de las ondas horizontales superficiales inducidas por la compactación, mediante la realización de una zanja. Ver Figura 5.
 Figura 5. Zanja mitigadora de ondas dinámicas

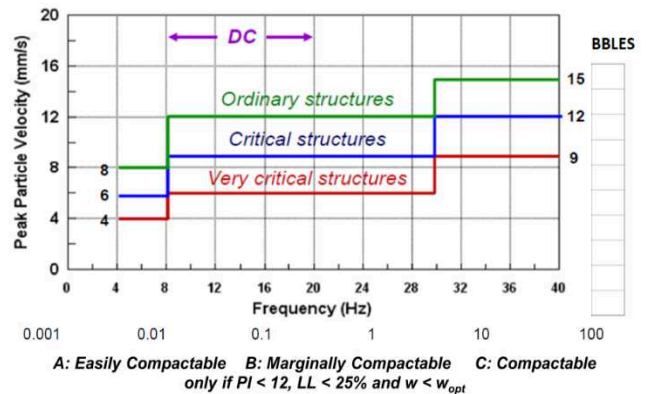
Para verificar que las vibraciones generadas por el tratamiento



por compactación no afecten las estructuras existentes, se instalaron dos acelerómetros para monitorear dichas vibraciones.

Se definieron velocidades permitidas en las estructuras, utilizando los valores mostrados en la Figura 6 y que se indican en la norma francesa del ministerio de ambiente (1993), la cual divide las construcciones en tres clases: resistente, sensible y muy sensible, marcando las velocidades máximas de partículas en función de tres rangos de vibraciones.
 Figura 6. Valores máximos de velocidad de partícula (mm/s)

A partir de estos parámetros y de las mediciones de velocidades



de partículas en el predio, se concluyó que el mejoramiento mediante CD se puede llevar a cabo a una distancia mínima de 30 m de estructuras existentes, mientras que el RIC se pudo llevar hasta 5 m. La zonificación de trabajos con CD y RIC se muestran en la Figura 7.

4.1 Compactación dinámica

La compactación dinámica (CD) es una técnica de mejoramiento masivo de suelos, en la cual la densificación de terrenos granulares es obtenida por los esfuerzos de cortante provocados por impactos de gran energía en la superficie del suelo. Esos impactos son obtenidos por la liberación en caída libre de una

masa, desde una altura de 10 a 30 m en caída libre de un peso de 10 a 30 toneladas en una malla previamente trazada en el terreno.

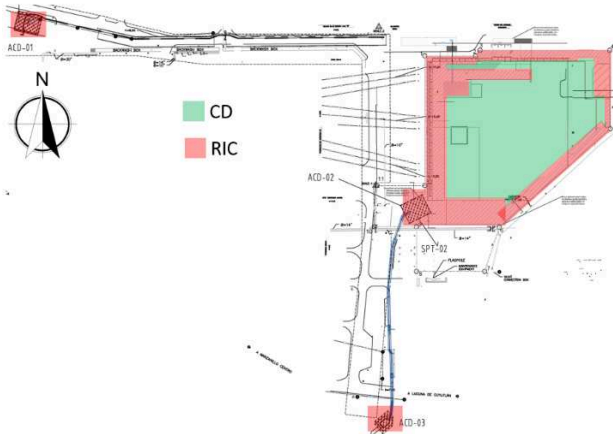
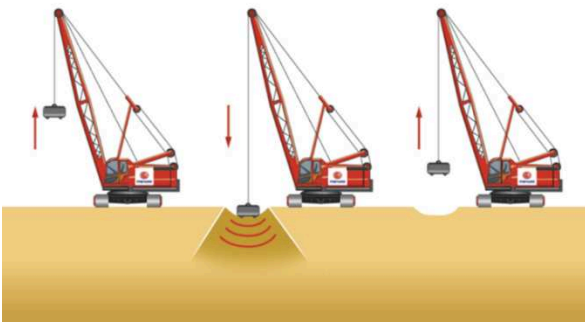


Figura 7. Zonificación de los trabajos de compactación

La energía que se transmite al suelo con el impacto de la masa se aplica en fases sucesivas. El número de fases e impactos, así como posibles tiempos de espera entre fases, son determinados por el objetivo del tratamiento y las propiedades del terreno a tratar, tales como el espesor, el tipo de suelo y la permeabilidad. Para una energía de compactación común se utilizan grúas de 80 a 120 toneladas que cuentan con un sistema específico para este uso. Los parámetros de ejecución se verifican y evalúan mediante un panel de prueba previo a los trabajos de tratamiento. Para los tratamientos profundos, el diseño de las fases de compactación es particularmente importante para garantizar una densificación homogénea, sobre todo en lo que se refiere al espesor del terreno tratado; en la Figura 8 se muestra la secuencia de ejecución. Figure 8. Secuencia de ejecución de la compactación dinámica

Como consecuencia del tratamiento se producirá un

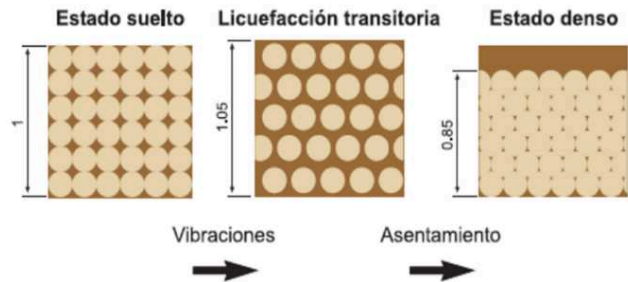


asentamiento medio de la zona tratada del orden de 5.0 % del espesor en los materiales a tratar. Durante el tratamiento por CD se distinguen dos efectos distintos según su temporalidad:

- Efecto a corto plazo: En la gran mayoría de los casos, este efecto resulta en una reducción inmediata de la relación de vacíos del suelo generada por la energía de compactación realizada por el sistema de compactación.
- Efecto a largo plazo: Observado en algunos casos de suelos saturados, este efecto resulta en un aumento de la presión intersticial durante el tratamiento y puede causar licuación local del suelo. Después de ello, la disipación progresiva de las presiones intersticiales permite la reestructuración del suelo en un estado más

compacto y el incremento progresivo de la resistencia al corte del terreno, Figura 9.

Figura 9. Comportamiento del suelo a largo plazo ante la CD



4.2 Compactación de impacto rápido (RIC)

La compactación por impacto rápido se realiza mediante el uso de una máquina más pequeña, comparada con la empleada en la compactación tradicional, y se aplica para la compactación de suelos granulares, rellenos flojos y residuos mineros, este sistema de mejoramiento permite densificar hasta profundidades de 4 a 6 m. El equipo consiste en un gran martillo pilón hidráulico montado sobre una excavadora. Ver Figura 10.

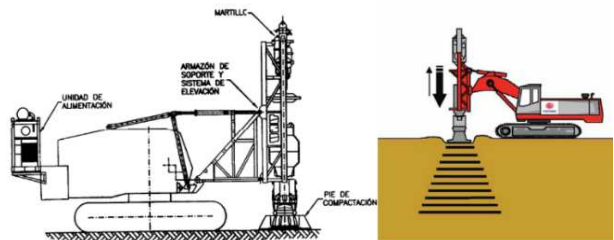


Figura 10. Compactador RIC

El proceso consiste en compactar el terreno con un martillo de un peso de entre 7 a 12 toneladas, el cual golpea un yunque (placa) de 1.52 m de diámetro. La energía impartida por la caída del peso está controlada a una altura de 1.2 m con una frecuencia de 40 a 60 golpes por minuto. Un sistema de adquisición de datos mide la altura de caída del martillo, el número de golpes, el hundimiento después de cada golpe, la energía total y el hundimiento acumulado tras varios golpes. Así pues, este sistema garantiza la transmisión al terreno de un alto porcentaje de la energía.

El control de la mejora del terreno compactado se suele llevar a cabo mediante la estimación del asentamiento generado según los parámetros que se registran en el propio equipo por cada huella, y mediante ensayos geotécnicos complementarios que verifiquen el aumento general de la compacidad.

5 VENTAJAS DEL MEJORAMIENTO MEDIANTE CD Y RIC

Las ventajas del mejoramiento mediante CD son:

- Mejora las propiedades mecánicas del terreno (aumento de capacidad de carga).
- Aumenta la densidad relativa del terreno (disminuye los asentamientos a corto y largo plazo).
- Funciona para mitigar el potencial de licuación de suelos predominantemente granulares.
- Se adapta particularmente bien a suelos de composición variable o rellenos heterogéneos inertes con un contenido importante de bloques, razón por la cual no podría aplicar soluciones de reforzamiento de suelos.
- Técnica económica al no incorporar material al terreno.

Las ventajas del sistema de mejoramiento mediante RIC son las

estratos licuables, las cuales fueron clasificadas como “fácilmente compactables”, por lo que se concluyó que el mejoramiento era

mismas que la CD, aunado a esto, el sistema tiene la versatilidad de realizar el mejoramiento en espacios reducidos, dentro de instalaciones existentes, y zonas próximas a edificios.

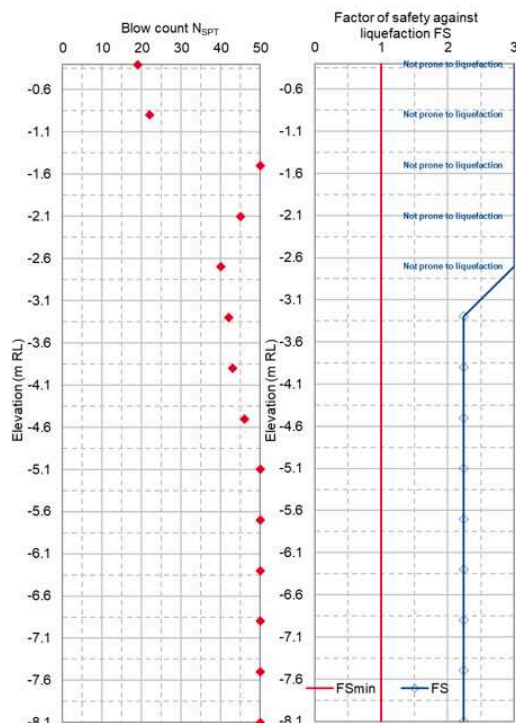
6 RESULTADOS DEL MEJORAMIENTO

Una vez realizado el mejoramiento de suelos mediante CD y RIC, se realizó una campaña de sondeos de verificación, ubicados en diferentes áreas del proyecto, esto con el fin de corroborar la densificación obtenida y realizar nuevamente los análisis de licuación post mejoramiento. La Figura 11, muestra el número de golpes en la prueba SPT, así como los factores de seguridad ante licuación para las diferentes profundidades; se puede observar el aumento de la resistencia del suelo debido a la reducción de los vacíos provocados por el mejoramiento de suelos. Con estos resultados se logró mitigar el estrato licuable entre 3.0 a 5.5 m. Es importante mencionar que hubo un incremento en el número de golpes desde 1.0 hasta 8.0 m de profundidad, por lo que se logró un estrato uniforme con mejores características mecánicas, lo cual incide directamente en beneficio de la cimentación superficial que se construirá.

7 CONCLUSIONES

Se presentó un caso de aplicación del sistema de mejoramiento de suelos por medio de compactación dinámica (CD) y compactación de impacto rápido (RIC), dentro de una central de ciclo combinado, en donde debido a la naturaleza granular y suelta del suelo, así como a los parámetros sísmicos poco favorables que prevalecen en la zona, existía un alto potencial de licuación.

Para conocer la viabilidad del mejoramiento mediante compactación, se analizaron las curvas granulométricas en los



técnicamente viable.

El uso de la CD en el proyecto mejoró las propiedades mecánicas y de compresibilidad del terreno (aumento de capacidad de carga, aumenta la densidad relativa), de igual manera mitigó el potencial de licuación de los estratos sueltos por debajo del nivel de agua freática.

Por otra parte, en las zonas con presencia de estructuras en operación (norte y oeste del predio), así como la presencia de un ducto de gas en el sur y sureste del predio, se determinó la aplicación de un método de mejoramiento de suelos mediante compactación de impacto rápido (RIC). Las ventajas de este sistema de mejoramiento es que tiene la versatilidad de realizar el mejoramiento en espacios reducidos, dentro de instalaciones existentes, y zonas próximas a edificios, evitando daños a las construcciones vecinas debido al mecanismo de impacto en el cual se logra una energía de compactación similar a la CD con una masa de menor dimensión y menor peso, esto con mayores repeticiones en los golpes.

De acuerdo con los resultados de los sondeos de penetración estándar “SPT” realizados después del mejoramiento de suelos mediante CD y RIC, se comprobó un bueno comportamiento del tratamiento al obtener un incremento en el número de golpes en la prueba de penetración estándar (SPT) de casi el doble, lo cual se traduce en un terreno con mejores características geomecánicas y factores de seguridad ante licuación mayores a 1.

Figura 11. Factor de seguridad contra licuación después del mejoramiento

7 REFERENCIAS

- Menard L. (1975) – Interpretation & Application of Pressuremeter
Test Results for Foundation Design (1975) – General Memorandum D60 – Soils.
- Seed & al. (2003) Recent advances in soil liquefaction engineering.
- Youd & al. (2001) NCEER Methods of evaluating liquefaction.
- Cassan M. (1988) Les essais in situ en mécanique des sols 1. Réalisation et interprétation. Editions Eyrolles.
- Idriss & Boulanger (2004) Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction during earthquake.
- Kerisel, J. (1985). The history of geotechnical engineering up until 1700, Proceedings.
- French codes (1993) ministry of environment - Limiting values of PPV for structures.
- Lukas, R.G. (1995). Geotechnical Engineering Circular n°1. Dynamic Compaction.
- Slocombe, B.C. (2004). Dynamic compaction. In M.P. Moseley & K. Kirsch (Eds.).
- Menard, L. and Broise, Y. (1975) Theoretical and Practical Aspects of Dynamic.
- Menard, L. y Broise (1976). Theoretical and practical aspects of dynamic consolidation.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

The paper was published in the proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE) and was edited by Gonzalo Montalva, Daniel Pollak, Claudio Roman and Luis Valenzuela. The conference was held from November 12th to November 16th 2024 in Chile.