

Compactación estática de suelos en laboratorio

Static soil compaction in the laboratory

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Gabriel Palma ^{1,*}, Cristóbal Alvarado ²

Historial del
artículo:

¹Departamento Laboratorio Nacional de Vialidad, Santiago, Chile

²Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

Recibido
14-11-2023
Aceptado
16-04-2024
Publicado
25-04-2024

Resumen

Se implementó un método de compactación por compresión edométrica estática para una serie de suelos de 4" de TM con granulometría controlada en laboratorio. También se efectuaron ensayos de compactación por vibración y apisonado de estos suelos para comparación de métodos. El método por vibración consiguió las mayores densidades secas en la mayoría de los casos, lo sigue el método propuesto y finalmente el de apisonado a distancia variable según el tipo de suelo. Se determinó experimentalmente la aplicabilidad del método de reemplazo Proctor y dónde no es conveniente su aplicación. El método estudiado se propone como una alternativa práctica para la determinación de la densidad máxima compactada seca de suelos granulares, haciendo posible el ensayo del suelo integral. Los resultados obtenidos ayudan a seleccionar el método de compactación de laboratorio más adecuado para suelos granulares, esperando con esto poder contribuir a dar mayor durabilidad a los pavimentos. El método estudiado da solución experimental a un problema de alcance de la corrección de la normativa AASHTO y ASTM al resultado del ensayo Proctor.

Palabras Clave:
Suelos
Compactación
Laboratorio
Densidad

Article history:

Abstract

A static oedometric compression compaction method was implemented for a series of 4" TM soils with controlled granulometry in the laboratory. Vibration and tamping compaction tests were also performed on these soils for method comparison. The vibration method achieved the highest dry densities in most cases, followed by the proposed method and finally the tamping method at variable distances depending on the type of soil. The applicability of the Proctor replacement method was determined experimentally and where its application is not convenient. The studied method is proposed as a practical alternative for the determination of the maximum dry compacted density of granular soils, making possible the integral soil test. The results obtained help to select the most adequate laboratory compaction method for granular soils, hoping to contribute to give more durability to pavements. The method studied provides an experimental solution to the problem of the scope of correction of the AASHTO and ASTM norms to the result of the Proctor test.

Received
14-11-2023
Accepted
16-04-2024
Available
25-04-2024

Keywords:
Soils
Compaction
Laboratory
Density

* Corresponding author at: Gabriel Palma, Departamento Laboratorio Nacional de Vialidad. Morandé 59, Santiago, Chile. E-mail address: Gabriel.palma@mop.gov.cl

RIOC

journal homepage: <https://revistas.ufro.cl/ojs/index.php/rioc/index>

Vol. 12, no. 01, pp. 1–6, Abril 2024

1. Introducción.

Hasta la década de 1920 la especificación de humedad y nivel de compactación de suelos se hacía en base a la experiencia de cada empresa constructora. Algunas fallas catastróficas en presas de tierra motivaron que el problema fuera encargado a expertos geotécnicos de la época, entre los que figura Ralph Roscoe Proctor. Él analizó el núcleo impermeable de esas estructuras mediante un método de compactación por apisonado, Proctor Estándar, que le permitió resolver el problema e informar sus resultados en 1933. Posteriormente Middlebrooks, Porter y Casagrande hicieron una modificación de este método para extenderlo a suelos granulares. El motivo de esta adaptación fue en primer lugar mejorar la calidad de las pistas de aterrizaje para los bombarderos de la Segunda Guerra Mundial, y luego aplicarlo a la meta de Gobierno de 40.000 millas de carreteras interestatales en USA. En esa época la maquinaria de construcción de caminos ya se había desarrollado en peso y potencia impulsado por las necesidades de rapidez en la construcción. La modificación del método de laboratorio consistió en aumentar el tamaño del molde y la energía de compactación para incluir suelos granulares con resultados más acordes a los de terreno.

Al poco tiempo de uso del ensayo Proctor Modificado se observó que éste daba resultados de densidad seca similares a los de terreno cuando los suelos eran finos o arenas con poca grava. Pero, a medida que el contenido de grava crecía el valor de la DMCS de laboratorio era progresivamente menor a lo que se medía en terreno. Desde entonces se han propuesto varios tipos de correcciones al valor de DMCS de laboratorio para una correcta especificación constructiva. Las correcciones más conocidas son: la gráfica de Humphres, la teórica de Ziegler (presente en la normativa AASHTO y ASTM), las semi-empíricas de NACFAC y la Bureau of Reclamation, entre otras.

Posteriormente se publicaron estudios experimentales (Donaghe y Townsend, 1973) y (NAVFAC, 1986), que consolidaron el método de corte y reemplazo actualmente en uso en Chile. Sin embargo, este método también presenta DMCS menores o iguales que las de terreno cuando el contenido de grava es alto. Cabe mencionar que las correcciones de los valores de laboratorio de la normativa internacional (ASTM D4718-07 y AASHTO T 224, 2000) se aplican en el extranjero, pero no se aplican en la Vialidad chilena. Todas ellas tienen límites de aplicabilidad que dejan sin posibilidad de corrección a suelos granulares gruesos cuyo porcentaje retenido entre las mallas 19 mm y 50 mm sea mayor a 30%, situación frecuente en algunas sub-rasantes, terraplenes y rellenos estructurales.

En un estudio realizado por el Departamento Laboratorio Nacional de Vialidad en 2010, se formuló una posible explicación a la aplicabilidad del corte y reemplazo para un suelo en particular. Esta aplicabilidad estaría relacionada con el efecto de pared del molde metálico y el hecho de que los experimentos de (Donaghe y Townsend, 1973) fueron realizados con arenas, los que no serían extrapolables a gravas gruesas.

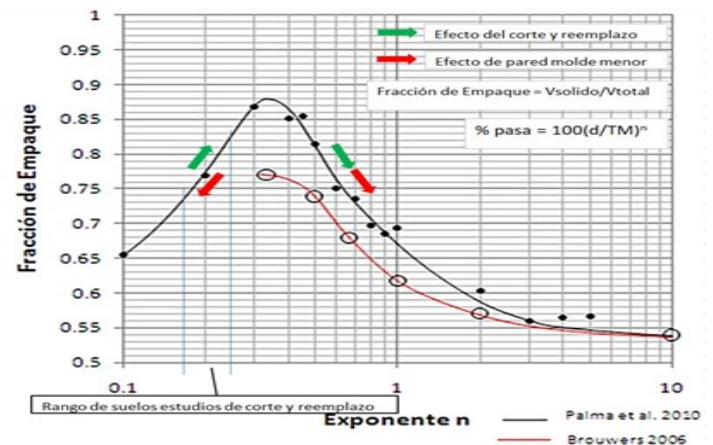


Figura 1. Fracción de Empaque Máxima para suelos con distribución geométrica.

En toda estructura de pavimento se pueden distinguir los siguientes estratos: sub-rasante, terraplén, sub-base y base. Adicionalmente pueden existir rellenos estructurales o de mejoramiento. La especificación constructiva usual en todos los casos anteriores es de 95% o 90% de la DMCS respectiva. En algunos suelos con muy alto contenido de gravas, los controles de compactación de terreno pueden superar el 100% de este valor de laboratorio, lo que se debería a una sub-estimación de la DMCS del material original debida al método de corte y reemplazo aplicado.

Cuando se usa la mesa vibradora para obtener la densidad máxima seca (Manual de Carreteras 8.102.8, 2019), el suelo se ensaya integral o con un corte simple del sobre-tamaño. Se observó que este equipo resulta bastante eficiente para la compactación de suelos en laboratorio, incluso más allá de su rango previsto de uso. Estos equipos son escasos, difíciles de calibrar y operar dentro de norma, entre otras desventajas. Debido a lo anterior, y teniendo como objetivos generar un método práctico de compactación de laboratorio que permita estimar la DMCS en terreno para una amplia variedad de suelos, que se pueda implementar con equipos normales y con inversión mínima, se implementó y probó un sistema de compactación estática del suelo humedecido dentro de un molde cilíndrico resistente, prensado con la ayuda de una máquina de compresión de hormigones.

2. Metodología

El método de compactación de este trabajo surgió de la consideración de los métodos habituales de compactación de probetas de suelo, asfalto y hormigón. Invariablemente en todos ellos se contiene la muestra dentro de un molde metálico resistente (Figura 2) donde se agrega el material en capas y luego se compacta aplicando varillado, amasado, vibración, apisonado, percusiones, etc. En este trabajo la energía de compactación se aplicó mediante una prensa para el ensayo de hormigones de 3000 kN de capacidad. Por pruebas preliminares, se limitó la carga a 400 kN para no fracturar en exceso las partículas mayores.



Figura 2. Diversos edómetros o moldes de compactación para ensayos de suelos, asfalto y hormigón.

El método se inspiró en el utilizado para extraer aceite de oliva (Figura 3). Se diseñó un molde de acero estanco de 280 mm de diámetro interior, 5 mm de espesor y 300 mm de altura. El diámetro corresponde aproximadamente al ancho máximo que admite el gálibo de la prensa que se usó para este trabajo. La altura permite la colocación de 45 kg de muestra seca con un peso total de unos 65 kg. El espesor del molde se diseñó para una presión de compresión máxima de 120 kgf/cm², la presión aplicada en todos los casos fue de 65 kgf/cm².



Figura 3. Izq.: Prensa de aceitunas. Centro: Prensa de suelos. Der.: Detalle base y fin de carrera.

El llenado del molde se hizo en tres capas con escarificado, aumentando la carga de 0 a 400 kN en un tiempo de 2 a 3 minutos y manteniéndola luego por 3 minutos. La humedad de compactación se determinó mediante el criterio de agregar agua hasta obtener una textura brillante del material con un pequeño excedente de flujo libre en el fondo de la paila.

Para aplicar la carga sin dañar el molde se usó una serie de discos espaciadores de madera terciada de 14 mm de espesor para el contacto superior y el apoyo de fondo. Se usó un disco de acero de 7 mm de espesor y 277 mm de diámetro en contacto con el suelo. Este disco tiene una perforación con hilo en el centro para facilitar su extracción y sirvió para medir el descenso con respecto a los bordes del molde con pie de metro. El volumen del molde se midió con agua y fue actualizado periódicamente por si se producían deformaciones. Se tuvo presente no sobrepasar el recorrido del pistón para no dañar la prensa (Figura 3, Der.).

Las curvas granulométricas sin chancado preparadas en laboratorio se muestran en la Figura 4. Se definieron 7 curvas con concavidad variable en un rango amplio. Cuatro de ellas tienen distribución geométrica, típicas de depósitos fluviales, una logarítmica y dos típicas de depósitos glaciales. No se usaron curvas en "S" por ser granulometrías discontinuas y porque estos resultados fueron usados posteriormente para otro trabajo que requería curvas sin puntos de inflexión.

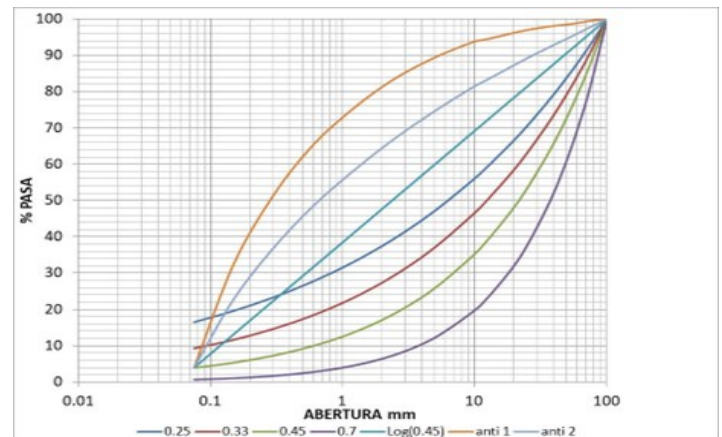


Figura 4. Curvas Granulométricas Analizadas.

Cada una de las muestras fueron compactadas por vibración, se secaron y reensayaron por prensado. Luego de un segundo secado, se aplicó corte y reemplazo con compactación por apisonado (Proctor Modificado, Método D). La serie de imágenes de la Figura 5 muestra el aspecto y textura de cada suelo ensayado.

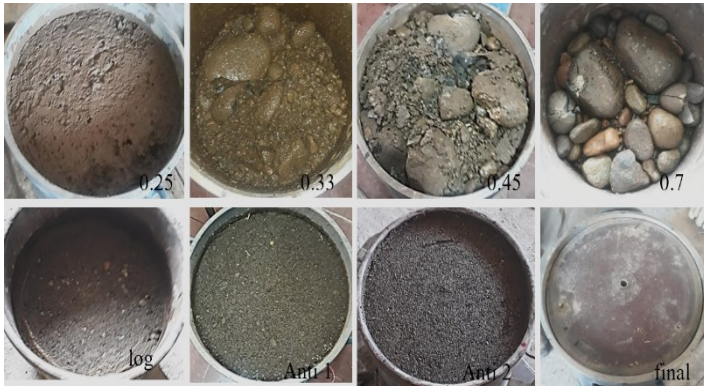


Figura 5. Texturas de los suelos ensayados. El cuadro final corresponde a la posición de medida.

Cabe comentar que el suelo con exponente 0.33 corresponde a la curva óptima de máxima densidad para la familia de curvas con distribución geométrica. La curva con exponente 0.45 es la clásica curva de Fuller, fundamental para la dosificación de hormigones y asfaltos. La curva logarítmica es secante a la curva de Fuller, la curva anti métrica 1 es una imagen invertida y vista desde atrás de esta misma curva. La anti métrica 2 es lo mismo respecto de la curva con exponente 0.33.

Para minimizar el efecto de pared se tuvo un cuidado especial en la colocación de las partículas mayores para que en lo posible no quedaran en contacto con la pared ni el fondo del molde, o sobre la capa recién compactada. La razón (Diámetro molde) / (TM) escogida fue 3:1, menor a la recomendación 7:1 estándar, o la de 3.5:1 que usa el ensayo de densidad máxima vibrada. Se hizo de esta manera para extender al máximo el alcance del método, dejando incorporada en la correlación el efecto de esta razón.

3. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos se detallan en la Tabla 1. Por claridad se escogió el porcentaje bajo la malla de 19 mm como variable independiente. En la Figura 6 se graficó las curvas separándolas por familias de la misma concavidad.

Tabla 1. Densidades Secas Obtenidas por Diferentes Métodos.

ID	% Bajo 3/4"	D.máx. Vibrada	D. Mínima	Prensa	Proctor
	%	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³
0.25	67	2181	1792	2122	2210
0.33	58	2394	1877	2270	2224
0.45	48	2435	1900	2258	2266
0.7	32	2189	1840	2005	1930
log	78	2278	1873	2079	2192
anti-2	87	2110	1723	1998	2120
anti-1	96	2078	1707	1944	2074

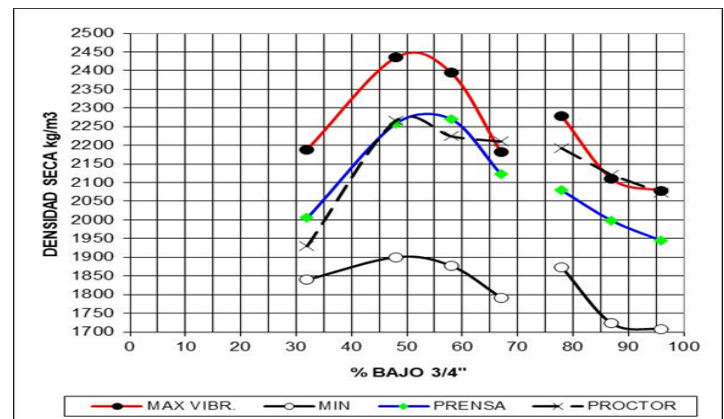


Figura 6. Resultados de densidad seca obtenidas por diferentes métodos. El conjunto de la izquierda corresponde a las curvas convexas.

Se produjo una clara discontinuidad por la convexidad. Las curvas cóncavas lograron densidades menores que las convexas para todos los métodos probados, producto de su peor gradación y menor contenido de grava.

En la Figura 6 también se observa que el método que consiguió mayores densidades secas fue el vibrado, con la excepción de la curva de exponente 0.25, lo que permite considerar a la vibración como el que consigue las mejores aproximaciones a las densidades que se pueden alcanzar en terreno con suelos granulares con alto contenido de grava gruesa. Paralelamente lo sigue el método de prensado propuesto. La compactación por apisonado (Proctor Modificado con corte y reemplazo) tuvo un resultado variable: desde mucho menor densidad para porcentajes bajo la malla 3/4" inferiores a 65%, hasta prácticamente iguales al método de vibrado para contenidos mayores o iguales a ese valor. La densidad mínima sigue las mismas curvas de densidad máxima vibrada, pero a escala menor.

La mayor de las densidades compactadas por vibración se obtuvo para la curva con distribución geométrica con exponente 0.40 a 0.45, lo que difiere en algo del resultado de la Figura 1, cuyo óptimo está en 0.33. La curva de ese anterior estudio se confeccionó con suelos de 3" de tamaño máximo, por lo que puede ser efecto del tamaño del molde. No obstante, lo anterior, el mayor valor de densidad se obtuvo para la curva con exponente 0.33 por el método de prensado.

De la Figura 6 se observa además que el apisonado con corte y reemplazo da buenas aproximaciones de la densidad máxima cuando el porcentaje bajo la malla 19 mm del suelo integral es mayor o igual a 65%.

Las mayores correcciones al ensayo Proctor propuestas en la literatura alcanzan hasta un 10% adicional a lo medido, equivalente a unos 200 kg/m³ y son aplicables a suelos con 70% o más de partículas bajo la malla 19 mm. Si el porcentaje bajo esta malla es menor al 70%, las normas no ofrecen solución al problema. En este trabajo se midió hasta 250 kg/m³ de menor densidad en el caso más desfavorable (geométrica con exponente 0.7).

Los suelos estudiados son representativos de terraplenes y subrasantes. Para bases, sub-bases y rellenos estructurales se estima que estas diferencias puedan ser menores por efecto de los menores tamaños máximos y los mayores porcentajes de chancado. El chancado tiene efecto negativo sobre la densidad debido a que la trabazón dificulta la acomodación de partículas.

La alta efectividad obtenida por el método de compactación por vibrado fue un resultado inesperado. Las curvas de compactación Proctor resultaron bien definidas con excepción del suelo con exponente 0.7, en ese caso se escogió el máximo valor observado.

La densidad por prensado resultó menor o igual a la obtenida por apisonado y a su vez sistemáticamente menor con respecto al vibrado. El apisonado resultó superior al vibrado sólo en el caso de la curva con exponente 0.25.

La Figura 7 muestra que hay una relación lineal entre vibrado y prensado para casi todos los suelos estudiados, lo que le da valor práctico al prensado como reemplazo del vibrado. El punto rojo de esa misma Figura 7 se excluyó de la correlación por ser un suelo con muchos finos (geométrica con $n = 0,25$), no apto para compactación por vibración o prensado. El error máximo observado con respecto al modelo en esta correlación fue de 45 kg/m³, con una varianza de 33 kg/m³.

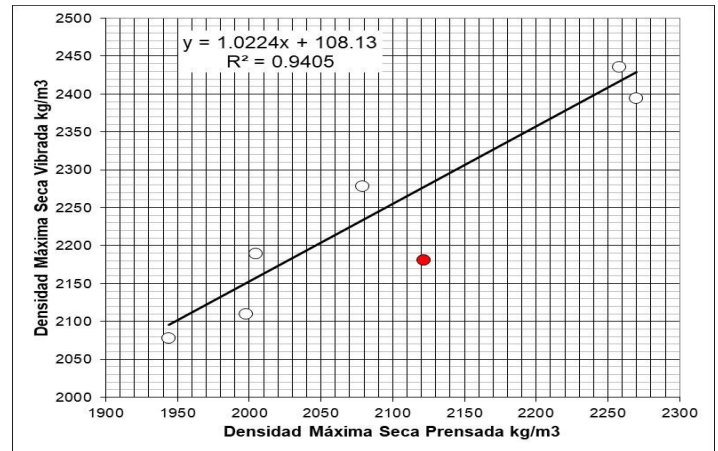


Figura 7. Relación entre Densidades Máximas Secas por Prensado y Vibrado.

En la Figura 8 se muestra la relación observada entre densidades máximas secas vibradas vs Proctor de este estudio. En este caso fue necesario descartar los dos puntos en rojo: el de la izquierda corresponde a la curva con exponente 0.7, demasiado gruesa para Proctor y el de la derecha corresponde a la curva con exponente 0.25, demasiado fina para para compactación por vibración. El error máximo observado y varianza con respecto al modelo fueron 36 kg/m³ y 30 kg/m³ respectivamente.

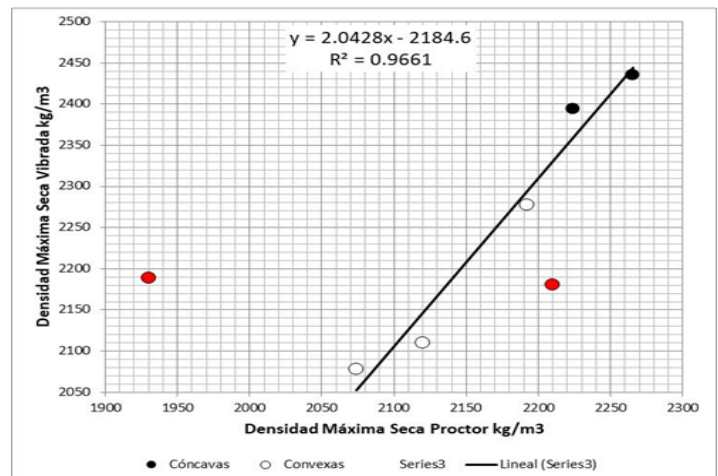


Figura 8. Relación entre Densidades Máximas Secas por Apisonado y Vibrado.

4. Conclusiones

De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos en este trabajo se puede extraer las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- Se logró implementar un método de compactación por prensado que permite medir en laboratorio la densidad máxima seca de suelos granulares con alto contenido de grava.
- La compactación por prensado permite estimar experimentalmente la densidad máxima seca de laboratorio cuando las muestras tienen alto contenido de grava gruesa.
- El método de compactación por vibración resultó más efectivo que el prensado para cada suelo analizado. Ambos métodos están relacionados linealmente, por lo que es posible estimar la densidad máxima de un suelo bajo prueba con error razonable.
- La mayor efectividad del método por vibración se debería a que la licuefacción que se produce durante el ensayo facilita el flujo de material fino y arena entre los poros, logrando una mejor distribución del material y minimizando el efecto de la pared del molde. El prensado en cambio no logra distribuir el material más fino con la misma efectividad.
- El método de compactación por apisonado (Proctor Modificado Método D) con corte y reemplazo, es representativo del material integral cuando la muestra original tiene 65% o más de suelo bajo la malla 19 mm.
- El método implementado da solución experimental alternativa a un problema que la normativa internacional no resuelve.
- El presente trabajo se orientó a mejorar la especificación constructiva de terraplenes y puede extenderse de forma directa para mejorar la especificación constructiva de compactación de bases, sub-bases y rellenos estructurales.
- El método descrito se debe usar para efectos de mejora de la especificación constructiva y determinación del punto de densidad a la que debe interpolarse el CBR. La confección de probetas de CBR debe mantenerse como es habitual para poder seguir usando las correlaciones existentes entre CBR y Módulo Resiliente.

5. Agradecimientos: Los autores agradecen la colaboración del personal de la Sala de Geotecnia del Laboratorio Nacional de Vialidad del MOP, Srs. Eladio Alveal y Marcelino González. Se agradece especialmente al jefe del LRM Sr. José Salamanca por su gestión con los materiales y colaboración para la realización de esta investigación.

6. Referencias

- ASTM D4718-07 (2007). Standard Practice for Correction of Unit Weight and Water Content for Soils Containing Oversize Particles. (ASTM).
- AASHTO T 224 (2000). Correction for Coarse Particles in the Compaction Test. (AASHTO).
- De la Hoz, K. (2007). Estimación de los Parámetros de Resistencia al Corte en Suelos Granulares Gruesos. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil.
- Donaghe, R., Townsend, F. (May, 1973). Compaction Characteristics of Earth-Rock Mixtures. Vicksburg, Mississippi, USA: U.S. ARMY ENGINEER WATERWAYS EXPERIMENT STATION.
- Manual de Carreteras 8.102.8 (2019). Método para Determinar la Densidad Relativa en Suelos no Cohesivos. MOP-Chile.
- Naval Facilities Engineering Command (NAVFAC) (1986). Foundation and Earth Structures, Design Manual 7.02.