



GEO-
INSTITUTE



6.º SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CIMENTACIONES PROFUNDAS
Y MEJORAMIENTO DE SUELOS

Octubre 19-20, 2023 – CDMX, México



Validación de módulo elástico de Pila de Agregado Compactado® mediante monitoreo de asentamientos para tres silos de almacenamiento para grano

Validation of the elastic modulus of Rammed Aggregate Piers® by means of settlement monitoring of three grain bins

José Miguel BIMBRERA¹, Jorge ARROYO², Jose Luis AGUIRRE¹ y Erika BERNAL¹

¹SOILSOLUTION

²GEOPIER

RESUMEN: Este artículo presenta los resultados de monitoreo de asentamientos para tres silos de 32m de diámetro apoyados sobre terreno mejorado con Pilas de Agregado Compactado® (PAC) en Guadalajara, Jalisco. Se reforzaron arenas limosas de baja compacidad para controlar asentamientos y aumentar la capacidad de carga. Los asentamientos registrados se comportaron de acuerdo al modelo tridimensional de asentamientos que se desarrolló durante la etapa de diseño. De esta manera se valida el modelo geotécnico de diseño, particularmente el Módulo Elástico Compuesto (E_{comp}), que principalmente depende del Módulo Elástico de la PAC (E_g) y del Módulo Elástico del Suelo Circundante Mejorado (E_{m2}).

ABSTRACT: This paper presents the results of a settlement monitoring program for three 32m-diameter grain bins supported by Rammed Aggregate Piers® (RAP) used for soil improvement in Guadalajara, Jalisco. In order to provide settlement control and increased bearing capacity, the very loose silty sand foundation soils were reinforced. The soil improvement system performed as expected since the settlement monitoring records were compelling with the settlement 3D analysis conducted during design phase. The settlement monitoring results validate the geotechnical parameter values used for settlement estimations, particularly the Composite Elastic Modulus (E_{comp}) that primarily depends on the RAP Elastic Modulus (E_g) and the Elastic Modulus of the Improved Surrounding Soil (E_{m2}).

1 INTRODUCCIÓN

Existen diversas técnicas de mejoramiento del suelo, cada una diseñada para abordar desafíos específicos y diferentes condiciones geotécnicas. Sin importar sus diferencias, todas deben cumplir con un objetivo: incrementar la rigidez del suelo matriz, la cual se puede representar en términos de un módulo elástico compuesto, E_{comp} . La magnitud de incremento en rigidez y su desviación en la estimación varía según la técnica empleada.

Durante la fase de diseño, la estimación del nuevo valor de rigidez es clave para dimensionar las cimentaciones y predecir sus deformaciones en el corto y largo plazo; un error en la estimación puede llevar a un diseño deficiente.

En este artículo se describe, en primer lugar, la metodología para la estimación del módulo elástico compuesto alcanzado por los sistemas de mejoramiento de Pilas de Agregado Compactado (PAC). Después, se aplica la teoría a un caso real en la construcción de tres silos para almacenamiento de grano de 32 m de diámetro. Finalmente, se realiza la comparación de las deformaciones calculadas en la

teoría con lo obtenido en mediciones topográficas in-situ.

2 DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL PROYECTO

Los silos de almacenamiento para grano son estructuras esenciales en la industria del sector primario, y están diseñados para soportar enormes cantidades de carga. Las presiones de apoyo de los silos pueden llegar a ser muy elevadas. Además, sus huellas tan amplias de desplante se construyen de manera contigua entre sí, y adyacentes a otras estructuras de importancia. Esto puede dar lugar a asentamientos totales y diferenciales significativos que pudieran interrumpir las operaciones de todo un sistema complejo e interconectado para el almacenamiento y suministro de granos y cereales por medio de silos o tolvas.

En la ciudad de Guadalajara, Jalisco se construyeron tres silos de 32 m diámetro de lámina de acero, cuyo principal reto fue el control de asentamientos totales y la poca capacidad de carga del suelo de cimentación.

La exploración geotécnica reveló la existencia de arenas limosas en un estado que varía desde suelto hasta medianamente compacto. Con base en esta información geotécnica, se construyó un modelo geotécnico, considerando módulos elásticos del terreno in situ provenientes de correlaciones empíricas a partir del número de golpes de la Prueba de Penetración Estándar (SPT). Los análisis de asentamientos in situ pronosticaron una deformación del orden de 22 cm bajo las condiciones de carga en operación, lo cual no es aceptable para este tipo de sistema de estructuras interconectadas. Por consiguiente, se implementó un sistema de mejoramiento con el fin de proveer una capacidad de carga mejorada y controlar los asentamientos, manteniendo el sistema de estructuras dentro de los estados límites de falla y servicio permisibles.

3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PILAS DE AGREGADO COMPACTADO®

Las Pilas de Agregado Compactado® son columnas de grava altamente densificadas que gracias a su particular proceso constructivo también rigidizan al suelo matriz circundante a las mismas. Como resultado, se obtiene una masa de suelo reforzada que exhibe una mayor capacidad de carga, una mayor rigidez y por ende, un buen control de asentamientos.

3.1 Construcción y diseño de las PAC.

Los elementos se construyen ya sea por desplazamiento o por perforación y reemplazo. En el segundo método (Figura 1), primero se perfora hasta la profundidad de diseño, después comienza una secuencia de relleno y compactación de grava para formar columnas de agregado muy rígidas y de alta densidad. Las perforaciones se ejecutan hasta la profundidad de diseño de cada proyecto. La primera capa de agregado forma un bulbo por debajo de la parte inferior de las pilas, lo que pre-esfuerza los suelos a una profundidad igual al menos a un diámetro de la pila en el fondo de la perforación, aumentando así la influencia de la PAC por debajo de su profundidad máxima de instalación.

La compactación se lleva a cabo mediante una herramienta especial de alta energía que densifica el agregado y lo empuja lateralmente hacia las paredes de la perforación. Esta acción aumenta el esfuerzo lateral en el suelo circundante, fortaleciendo la masa de suelo compuesta. Como resultado de la instalación de las PAC, se logra un aumento significativo en la capacidad de carga y una mayor rigidez en los suelos subsuperficiales que permite controlar los asentamientos y por lo tanto resistir mayores presiones de apoyo.

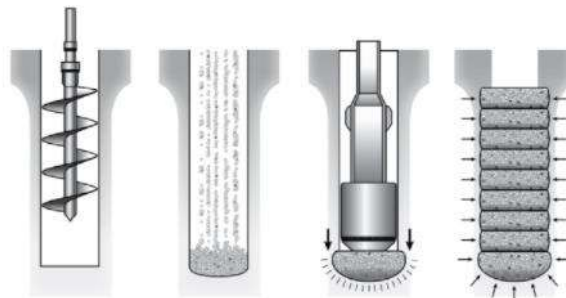


Figura 1. Secuencia de construcción de PAC®.

3.2 Estimación del módulo elástico compuesto

La metodología de control de asentamientos de las Pilas de Agregado Compactado se basa en un enfoque de dos capas, como se describe en los trabajos de Lawton et al. (1994), Fox y Cowell (1998) y Wissmann et al. (2002). Dentro de la zona reforzada con PAC, conocida como la zona superior, se crea una zona reforzada con menor compresibilidad que reduce el asentamiento de las estructuras, para este caso de los silos. El asentamiento por debajo de la zona reforzada con PAC, denominada zona inferior, se evalúa utilizando los enfoques convencionales de análisis geotécnico. El asentamiento total (S_{tot}) se evalúa como la suma del asentamiento de la zona superior (S_{uz}) y el asentamiento de la zona inferior (S_{iz}).

El asentamiento de la zona reforzada (zona superior) se estima con la ley de Hooke:

$$S_{uz} = \frac{q l_{\sigma} H_{uz}}{E_{comp}} \quad (1)$$

donde: q = es la presión aplicada del silo; l_{σ} = es el factor de influencia de esfuerzos en la zona superior; H_{uz} = es el espesor de la zona superior reforzada; y E_{comp} = es el módulo elástico compuesto de la zona superior reforzada

El módulo de elasticidad compuesto E_{comp} , es un concepto fundamental en el diseño geotécnico y tiene un papel crucial en la mejora del suelo y el diseño de cimentaciones.

Se define como una medida de la rigidez combinada del sistema de mejoramiento y el suelo circundante mejorado, lo que influye en los asentamientos y la distribución de cargas. Es decir, es el promedio ponderado del módulo elástico de los elementos de refuerzo PAC (E_g) y el módulo elástico del suelo matriz (E_m).

Tradicionalmente, el suelo se considera como un material con una rigidez uniforme, lo que puede llevar a estimaciones incorrectas de asentamientos y capacidad de carga. Al introducir un sistema de mejoramiento como las Pilas de Agregado Compactado, se modifica la rigidez del suelo localmente. El módulo compuesto captura esta variación en la rigidez y permite un diseño más preciso.

El módulo compuesto, E_{comp} , se expresa matemáticamente como:

$$E_{comp} = E_g R_a + E_m \cdot (1 - R_a) \quad (2)$$

donde: E_g = módulo elástico de la PAC; E_m = es el módulo de la matriz de suelo; y R_a = relación de área de reemplazo entre A_g , que es el área de las PAC y A_c , el área de cimentación.

4 REFUERZO DE SUELOS PARA EL SOPORTE DE SILOS DE GRANDES DIÁMETROS

4.1 Criterios de diseño

Los silos están diseñados para soportar cargas masivas y garantizar la integridad de su contenido. Aunque las metodologías de diseño son en principio similares a las de las cimentaciones convencionales, es crucial destacar ciertos detalles y consideraciones adicionales, como los criterios para asentamientos totales y diferenciales.

Los criterios para los asentamientos totales y diferenciales pueden variar según el tipo de silo. En términos generales, el asentamiento diferencial se refiere a la variación entre el hundimiento del perímetro con respecto al centro del silo. El diseñador del silo define el criterio específico para el asentamiento diferencial aceptable.

Es importante tener en cuenta que diferentes tipos de silos pueden tener requisitos particulares en cuanto a los criterios de asentamiento. Por lo tanto, es fundamental considerar cuidadosamente estos criterios durante el proceso de diseño y construcción para garantizar el funcionamiento adecuado y la seguridad de los silos en todas las condiciones operativas.

4.2 Ventajas de las PAC para el soporte de silos

Una de las principales ventajas del sistema de Pilas de Agregado Compactado® es que permite modificar el espaciamiento y longitudes de fuste para resolver diferentes grados de control de asentamientos, y hacer un diseño basado en el desempeño permisible para cada estructura. Al definir el criterio de asentamientos permisible particular del proyecto, y para cada estructura del mismo, se puede elaborar un arreglo que represente la solución más costo-efectiva; entre mayores tolerancias de desplazamientos, mayores espaciamientos entre los puntos de mejoramiento, y por tanto menores elementos requeridos. Así mismo se puede iterar con las profundidades de refuerzo.

Las Pilas de Agregado Compactado® se implementan principalmente para controlar asentamientos totales, sin embargo, otro gran beneficio es la reducción de asentamientos diferenciales entre dos silos adyacentes, donde hay mayor concentración de esfuerzos debido al posible traslape generado por la proximidad de todas las estructuras del sistema. Así mismo, se pueden

controlar asentamientos diferenciales y distorsiones angulares en el centro del silo con respecto al borde o perímetro, así como a lo largo del anillo de cimentación cuidando la condición planar del sistema estructural. El control de asentamientos diferenciales es posible gracias a la formación de una zona reforzada de baja compresibilidad y mucho mayor rigidez que el suelo matriz in-situ.

5 CASO PRÁCTICO

El mejoramiento del suelo se diseñó para apoyar tres silos de 32 m de diámetro. La cimentación consiste en un anillo perimetral conformado por una zapata corrida anular y una losa de cimentación circular al centro dividida por un túnel central. En la Tabla 1, se resumen las presiones de contacto empleadas en el diseño.

Tabla 1. Presiones empleadas en el diseño y estimación de los asentamientos

Estructura	Presión de diseño t/m ²
Túnel	16
Losa	15
Zapata	25.5

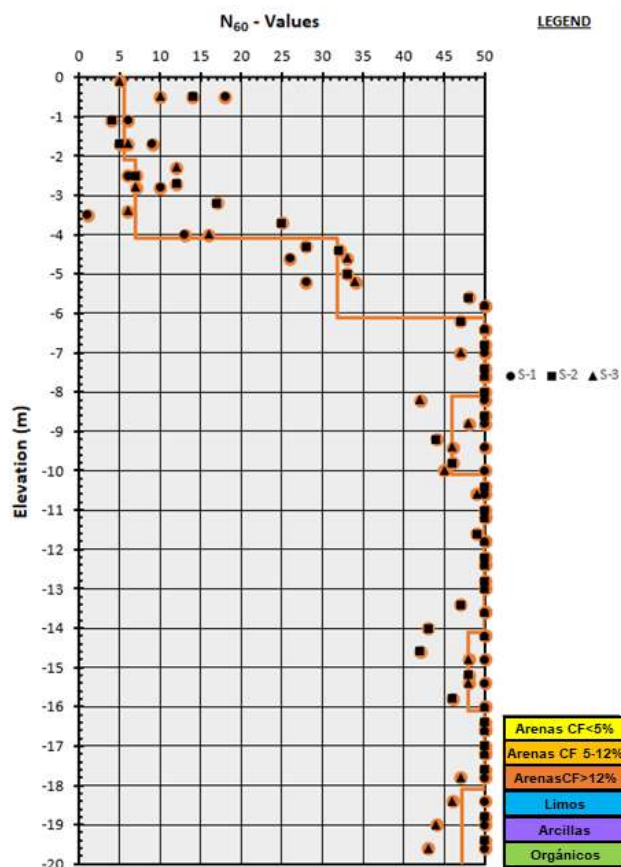
La estratigrafía del sitio por debajo de la elevación de desplante de cimentación, está conformada por un estrato de arenas limosas de compacidad muy suelta con un espesor aproximado de 4 m, subyacente por arena limosa de compacidad media hasta 6 m de profundidad, seguido por una arena limosa de compacidad media a densa que llega hasta la profundidad máxima de exploración de 20 m. No se detectó el Nivel de Agua Freática (NAF). En la Figura 2, se muestra el concentrado de número de golpes, N_{60} .

Para la estimación del módulo elástico del suelo empleando los datos obtenidos de los sondeos SPT, Schmertmann, J.H. (1970) propone las siguientes correlaciones en arenas, las cuales fueron empleadas en este análisis:

Tabla 2. Correlaciones empleadas para obtener el módulo elástico in situ del suelo Schmertmann, J.H. 1970.

Tipo de suelo	E_m tsf
Arena limpia	20 N
Arena con limo/arcilla	12 N
Limo/arcilla arenosa	9 N

Los resultados obtenidos de pruebas realizadas por diferentes autores, como Vautherin E. en 2017 y Amoroso S. en 2022, han demostrado de manera concluyente la efectividad de las Pilas de Agregado Compactado®. Tras la instalación de los Pilas de Agregado Compactado®, generalmente se observan en pruebas CPT aumentos significativos en los valores de q_c y en el módulo edométrico (M) en comparación con las condiciones iniciales del suelo.

Figura 2. Concentrado de número de golpes, N_{60SPT}

Los resultados de las pruebas in situ también han mostrado un aumento significativo en los esfuerzos horizontales derivado de la construcción de las Pilas de Agregado Compactado, lo que genera un aumento en la presión lateral del suelo en reposo (K_0), según lo por Baldi et al. en 1986. El incremento en el módulo edométrico (M) en el suelo circundante debido a la instalación de las pilas, usualmente supera el 200% del valor original, lo que demuestra que la instalación de las PAC aumenta la rigidez del suelo. Esta última aproximación parece ser una solución prometedora en suelos limosos y arenas limosas para aumentar no solo su densidad, sino también esfuerzo lateral y la rigidez, aspectos que a menudo son descuidados y poco comprendidos (Smith y Wissmann en 2018; Amoroso et al. en 2020).

Por lo tanto, la instalación de las Pilas de Agregado Compactado®, incrementa la capacidad de los suelos para resistir deformaciones elásticas bajo cargas verticales. Como resultado, los valores del módulo elástico (E_{m2}) estimados para el suelo mejorado son al menos el doble en comparación con las del módulo elástico en condiciones in situ (E_m) (Amoroso et., al. 2022).

En las tablas 3 a 5 se muestran las propiedades empleadas en los modelos de asentamientos que se describen en la siguiente sección.

Tabla 3. Modelo geotécnico in situ

Unidad geotécnica	SUCS	Prof. (m)	E_m (kPa)	E_g (kPa)	E_{comp} (kPa)
UG-01	SM	0-4	4,300	-	-
UG-02	SM	4-6	25,800	-	-
UG-03	SM	6-20	35,000	-	-

E_m : Módulo Elástico del Suelo en condiciones in situ.

E_g : Módulo Elástico Pila de Agregado Compactado®

E_{comp} : Módulo Elástico Compuesto

Tabla 4. Modelo geotécnico mejorado en la zona de zapata y túnel Relación área de reemplazo 17%

Unidad geotécnica	SUCS	Prof. (m)	E_{m2} (kPa)	E_g (kPa)	E_{comp} (kPa)
UG-01 (PAC)	SM	0-4	8,600	168,000	35,300
UG-02	SM	4-6	25,800	-	-
UG-03	SM	6-20	35,000	-	-

E_{m2} : Módulo Elástico del Suelo en condiciones mejoradas

E_g : Módulo Elástico Pila de Agregado Compactado®

E_{comp} : Módulo Elástico Compuesto

Tabla 5. Modelo geotécnico mejorado en la zona de losa de fondo Relación área de reemplazo 5%

Unidad geotécnica	SUCS	Prof. (m)	E_{m2} (kPa)	E_g (kPa)	E_{comp} (kPa)
UG-01 (PAC)	SM	0-2	8,600	168,000	16,700
UG-01	SM	2-4	8,600	-	-
UG-02	SM	4-6	25,800	-	-
UG-03	SM	6-20	35,000	-	-

E_{m2} : Módulo Elástico del Suelo en condiciones mejoradas

E_g : Módulo Elástico Pila de Agregado Compactado®

E_{comp} : Módulo Elástico Compuesto

El diseño de la solución con Pilas de Agregado Compactado proporcionó una capacidad de carga admisible de 30 t/m^2 , típica para arenas de baja compacidad, convirtiéndose el control de asentamientos en el factor dominante de diseño.

5.1 Resultados

El proceso de diseño constó de varias etapas, la primera de ellas fue la determinación del módulo elástico del terreno in situ, con el que se determinó que los asentamientos duplicaban lo recomendado por el fabricante.

El siguiente paso fue realizar los modelos geotécnicos mejorados, en función de las áreas de reemplazo. Es muy importante mencionar que se ha demostrado que las técnicas de mejoramiento del suelo tradicionales mediante vibración son efectivas para densificar arenas con menos del 15% de finos (D'Appolonia 1954; Mitchell 1981; Adalier y Elgamal 2004; Wissmann et al. 2015; Vautherin et al. 2017) y que los sistemas de Pilas de Agregado Compactado®, para este tipo de terreno pueden duplicar el módulo elástico del terreno debido al desplazamiento lateral generado por el proceso constructivo. Ver tablas 2 a 5.

Como resultado de los análisis y las necesidades del proyecto, se propuso la instalación de un arreglo de Pilas de Agregado Compactado® en el área de los tres silos (Figura 3).

Estas PAC se colocaron a diferentes profundidades. Para el caso del túnel, se construyeron pilas de 2 metros de longitud, mientras que para la losa y la zapata se utilizaron elementos de 4 metros. Dicho arreglo se ajustó con base en un proceso iterativo para alcanzar valores de asentamiento totales de 9 centímetros y cumplir con el máximo permisible establecido por el fabricante.



Figura 3. Planta de localización de las PAC®

Dentro de la información estructural proporcionada para el proyecto, se conocía el calendario de aplicación de cargas con respecto al tiempo, asociado al llenado gradual de los silos de almacenamiento. Esto se modeló de manera gradual y secuencial en el software *Settle3* de Rocscience. El resultado de este análisis mostró que los valores de asentamiento total obtenidos coincidieron estrechamente con los datos medidos en campo.

En la Figura 4, se presenta de manera gráfica el comportamiento de los tres silos a lo largo del tiempo a medida que se aplicaron los incrementos de carga correspondiente a las etapas de almacenamiento. Es importante destacar que los tres silos exhibieron un comportamiento similar en términos de asentamiento tanto para las condiciones in situ como para las condiciones mejoradas. En los modelos numéricos de cálculo in-situ y cálculo mejorado se alcanzó el asentamiento máximo a los 7 días, mientras que las mediciones de campo registraron el asentamiento máximo hasta los 10 días. Los resultados siguen siendo apropiados y son validados por las mediciones topográficas.

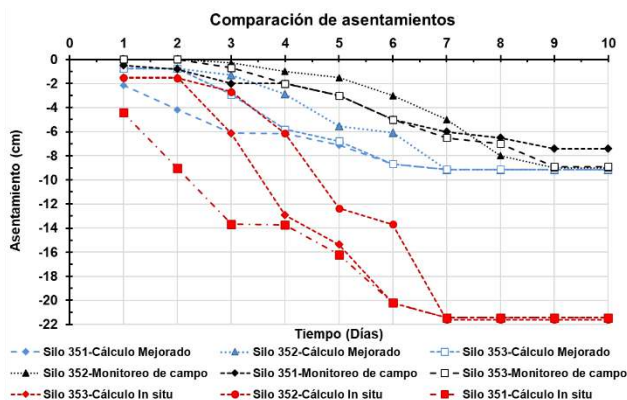


Figura 4. Gráfico comparativo de los asentamientos de cálculo in situ, cálculo mejoradas y medidos en campo.

Este análisis y validación demuestran que las estimaciones de los módulos de elasticidad compuestos E_{comp} utilizados en el cálculo de asentamiento son adecuados. Por lo tanto, confirma el módulo elástico de las Pilas de Agregado Compactado® E_g , y su influencia en el suelo adyacente (E_{m2}). Así mismo, el modelo numérico refleja el comportamiento real de los silos bajo cargas variables a lo largo del tiempo, lo que indica un criterio correcto en la selección de los parámetros empleados en el diseño geotécnico.

6 CONCLUSIONES

- El módulo de elasticidad compuesto es un parámetro clave para el diseño geotécnico del sistema de mejoramiento de suelos a base de Pilas de Agregado Compactado, ya que permite un diseño más preciso de las cimentaciones y una distribución de cargas adecuada.
- Una de las principales ventajas del sistema de Pilas de Agregado Compactado es que permite modificar el espaciamiento y longitudes de fuste para resolver diferentes grados de control de asentamientos, lo cual permite ofrecer una solución basada en el desempeño, lo que genera oportunidades para optimización.
- La comparación entre los resultados de las deformaciones medidas en campo y los asentamientos teóricos modelados con base en los módulos elásticos mejorados de las PAC®, válida el uso adecuado de la selección de parámetros de compresibilidad y la metodología de diseño del módulo elástico compuesto al final de las etapas de llenado, así como la calidad en el proceso constructivo de las Pilas de Grava Compactada®.
- Como en toda obra de ingeniería, siempre es recomendable realizar mediciones topográficas para evaluar las deformaciones in situ, lo cual nos permite a su vez corroborar los parámetros de módulo de elasticidad compuesto utilizado en el diseño.

REFERENCIAS

- Adalier, K. and Elgamal, A. (2004). "Mitigation of liquefaction and associated ground deformations by stone columns." *J. Eng. Geol.* 72 (3–4):275–291.
- Amoroso, S. et al. (2020). "Blast-induced liquefaction in silty sands for full-scale testing of ground improvement methods: Insights from a multidisciplinary study." *Eng. Geol.* 265 (Feb)
- Amoroso, S., et al. (2022). "Comparative Study of CPTU and SDMT in Liquefaction-Prone Silty Sands with Ground Improvement" *ASCE*
- D'Appolonia, E. (1954). "Loose sands—Their compaction by vibroflotation." In *Proc., Symp. on*

- ASTM Int., 138–162. West Conshohocken, PA: ASTM.
- Fox, N.S. and Cowell, M.J. (1998). "Geopier Soil Reinforcement Manual." Geopier Foundation Company, Inc., Blacksburg, Virginia.
- Lawton, E.C., Fox, N. S., and Handy, R. L. (1994). "Control of settlement and uplift of structures using short aggregate piers." In-situ Deep Soil Improvement, Geotechnical Special Publication No. 45, American Society of Civil Engineers, 121-132.
- Mitchell, J. 1981. "Soil improvement—State-of-the-art report." In Proc., 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 509–565. Rotterdam, Netherlands: A.A. Balkema.
- Schmertmann, J.H. (1970) "Static Cone to Compute Static Settlement Over Sand" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Vol. 96, No. SM3, May 1970
- Smith, M. E., and K. J. Wissmann. (2018). "Ground improvement reinforcement mechanisms determined for the Mw 7.8 Muisne, Ecuador, earthquake." In Proc., 5th Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Conf.: Liquefaction Triggering, Consequences, and Mitigation, 286–294. Reston, VA: ASCE.
- Vautherin, E., C. Lambert, D. Barry-Macaulay, and M. Smith. 2017. "Performance of rammed aggregate piers as a soil densification method in sandy and silty soils: Experience from the Christchurch rebuild." In Proc., 3rd Int. Conf. on Performance-based Design in Earthquake Geotechnical Engineering—PBD-III. London: International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering.