



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL SUELO
(COHESIVO) LICUABLE MEDIANTE INCLUSIÓN DE COLUMNAS DE
GRAVA EN EL VALLE DE QUETZALTENANGO, GUATEMALA**

Walter Fabricio Yela Gómez

Asesorado por el M.Sc. Ing. Luis Felipe López Aguilar

Guatemala, septiembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL SUELO (COHESIVO)
LICUABLE MEDIANTE INCLUSIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA EN EL VALLE DE
QUETZALTENANGO, GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

WALTER FABRICIO YELA GÓMEZ

ASESORADO POR EL M.SC. ING. LUIS FELIPE LÓPEZ AGUILAR.

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. José Gabriel Ordóñez Morales
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL SUELO (COHESIVO)
LICUABLE MEDIANTE INCLUSIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA EN EL VALLE DE
QUETZALTENANGO, GUATEMALA**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado, con fecha 29 de mayo de 2019.


Walter Fabricio Yela Gómez

Ref. AGS-MIGPP-001-2019

Guatemala, 29 de mayo de 2019.

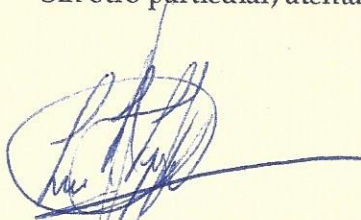
Director
Hugo Leonel Montenegro Franco
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Presente.

Estimado Director:

Reciba un atento y cordial saludo de la Escuela de Estudios de Postgrado. El propósito de la presente es para informarle que se ha revisado los cursos aprobados del primer año y el Diseño de Investigación del estudiante **Walter Fabricio Yela Gómez** carné número **201020108**, quien optó la modalidad del "PROCESO DE GRADUACIÓN DE LOS ESTUDIANTES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA OPCIÓN ESTUDIOS DE POSTGRADO". Previo a culminar sus estudios en la Maestría en Ciencias en Ingeniería Geotécnica.

Y si habiendo cumplido y aprobado con los requisitos establecidos en el normativo de este Proceso de Graduación en el Punto 6.2, aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011, firmo y sello la presente para el trámite correspondiente de graduación de Pregrado.

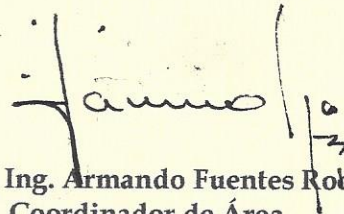
Sin otro particular, atentamente,



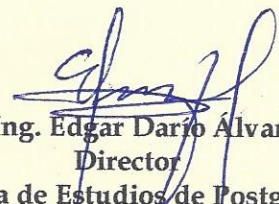
Maestro Ing. Luis Felipe López Aguilar

Luis Felipe López Aguilar Asesor (a)
Ingeniero Civil
Geofísico (B.Sc. y M.Sc.)
Colegiado No. 2177

"Id y Enseñad a Todos"



Maestro Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Área
Infraestructura



Maestro Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Cc archivo/LZLA.

RESOLUCIÓN DE JUNTA DIRECTIVA: Proceso de Graduación aprobado por la Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería en el Punto Decimo, Inciso 10.2, del Acta 28-2011 de fecha 19 de septiembre de 2011.



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen de la Asesor MSc. Ing. Luis Felipe López Aguilar y del Coordinador del Área de Infraestructura MSc. Ing. Armando Fuentes Roca, al trabajo de graduación del estudiante Walter Fabricio Yela Gómez, **MEJORAMIENTO DEL SUELO (COHESIVO) LICUABLE MEDIANTE INCLUSIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA EN EL VALLE DE QUETZALTENANGO, GUATEMALA**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco



Guatemala, julio 2019

/mrrm.



Universidad de San Carlos
de Guatemala




Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref.DTG.345.2019

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE INVESTIGACIÓN PARA EL MEJORAMIENTO DEL SUELO (COHESIVO) LICUABLE MEDIANTE INCLUSIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA EN EL VALLE DE QUETZALTENANGO, GUATEMALA**, presentado por el estudiante universitario: **Walter Fabricio Yela Gómez**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Inga. Aurelia Arriabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, Septiembre de 2019

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Todopoderoso, misericordioso y fiel en cumplir sus promesas.
Mis padres	Carlota Gómez y Walter Yela, a quienes amo, admiro y respeto.
Mis hermanos	Vivian Massiel, Andrea Judith, Adrian Israel Yela Gómez, por ser una bendición en mi vida.
Mis abuelos	Thelma Acevedo, Dagoberto Gómez, Gabriela Morales y Carlos Yela, por siempre velar por mí.
Familia y amigos	Con mucho cariño.
Mis compañeros	A quienes deseo éxitos.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por prepararme con los mejores conocimientos y así alcanzar mis metas.
Mis padres	Por su ejemplo, sacrificio y amor.
Mis hermanos	Por ayudarme a dar lo mejor de mí.
Mi familia	Por su apoyo incondicional.
Mis amigos	Por los momentos compartidos.
Mis catedráticos	Por compartir su sabiduría.
Mi asesor	M.Sc. Ing. Luis Felipe López Aguilar, por su tiempo y dedicación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	XI
RESUMEN	XV
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	3
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
4. JUSTIFICACIÓN	13
5. OBJETIVOS	15
6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN.....	17
7. MARCO TEÓRICO	19
7.1. Introducción, métodos de mejora del terreno	19
7.2. Principales métodos de mejora del terreno	25
7.2.1. Compactación superficial	25
7.2.2. Precarga	26
7.2.3. Vibración profunda o vibroflotación.....	26
7.2.4. Compactación dinámica.....	27
7.2.5. Inyecciones.....	27
7.2.6. Jet grouting.....	28

7.2.7. Inclusiones rígidas y columnas de grava	28
7.3. La mejora del terreno mediante columnas de grava	30
7.3.1. Aplicaciones y objetivos	30
7.3.2. Descripción de la técnica de columnas de grava.....	37
7.3.3. Métodos constructivos y características	44
7.3.3.1. Vía húmeda con alimentación superior.....	45
7.3.3.2. Vía seca con alimentación por fondo (vibrodesplazamiento).....	46
7.3.3.3. Otros procedimientos.....	47
7.3.4. Consideraciones generales	47
7.3.5. Control de ejecución y ensayos.....	49
7.3.6. Métodos de cálculo.....	51
8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS	53
9. METODOLOGÍA	57
10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN	59
10.1. Tipos de suelo.....	59
10.1.1. Suelos no cohesivos.....	59
10.1.2. Suelos cohesivos.....	59
10.1.3. Suelos orgánicos	59
10.2. Capacidad portante del suelo.....	61
10.3. Asentamiento de las cimentaciones.....	62
10.4. Ensayo normal de penetración (SPT)	62
10.4.1. Procedimiento del ensayo SPT y equipo.....	64
10.5. Límites de Atterberg.....	67
10.5.1. Límite líquido	68
10.5.2. Límite plástico.....	68

10.5.3. Límite de retracción	68
11. CRONOGRAMA.....	69
12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO	71
13. BIBLIOGRAFÍA	73

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1. Métodos de mejora aplicables a diferentes tipos de suelos	22
2. Métodos de mejora según la profundidad del suelo compresible y el tipo de estructura	23
3. Estabilización de un talud natural en Route 22 New York State	33
4. Depósitos sobre columnas de grava	34
5. Cimentación de nave industrial mediante columnas de grava	35
6. Principio básico de formación de columnas de grava	37
7. Diferentes configuraciones de carga para columnas de grava.....	37
8. Diferencia entre el funcionamiento de las columnas de grava y los pilotes.....	41
9. Aplicación de columnas de grava según la granulometría del suelo..	42
10. Capacidad de carga de las columnas	43
11. (a) Vía húmeda con alimentación superior (vibrosustitución); (b) Vía seca con alimentación por fondo (vibrodesplazamiento).....	44
12. Sacamuestra partido ASTM D1586-84.....	65
13. Determinación in situ mediante SPT	66
14. Ensayo SPT equipo	66
15. Cronograma de trabajo	69
16. Recursos necesarios para la investigación	71

TABLAS

1. Clasificación de métodos de mejorad el suelo.....	20
2. Alcances de las técnicas de mejoramiento del terreno más Comunes	24
3. Maquinaria convencional de compactación	26
4. Granulometría para realizar columnas de grava.....	39
5. Características principales y datos técnicos de los métodos por vía Húmeda y por vía seca (alimentación por fondo)	48
6. Métodos de cálculo para el diseño de columnas de grava	51
7. Capacidad portante dependiendo del tipo de suelo.....	61
8. Aplicabilidad del SPT	63
9. Correlaciones de propiedades físicas con el ensayo SPT	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (por sus siglas en inglés American Society for Testing and Materials).
CD	Compactación dinámica.
CG	Columnas de grava.
cm	Centímetro.
CMC	Columnas de módulo controlado.
CPT	El ensayo de penetración de cono CPT (por sus siglas en inglés Cone Penetration Test).
DR	Densidad relativa.
FHA	Instituto de Fomento de Hipotecas Aseguradas.
HCD	Compactación dinámica de alta energía.
JG	<i>Jet grouting.</i>

k	Kilo.
M	Mega.
MV	Precarga con vacío.
m	Metro.
mm	Milímetro.
m²	Metro cuadrado.
N	Newton.
n	Número de golpes.
Pa	Pascal.
Q	Quetzales.
s	Segundo.
SPT	El ensayo de penetración estándar o SPT (por sus siglas en inglés Standard Penetration Test).
SD	Sustitución dinámica.

VD

Drenes verticales.

%

Signo de porcentaje.

GLOSARIO

Ángulo de fricción interna	Ángulo entre el eje de esfuerzos normales y la tangente a la envolvente de Mohr en un punto que representa una condición dada de esfuerzo de ruptura de un material sólido. El ángulo de fricción interna de un suelo corresponde al ángulo cuya tangente es el coeficiente promedio de fricción entre las partículas de un suelo.
Antrópico	Producido o alterado por acción humana.
Asentamiento	Hundimiento gradual de una estructura.
Capacidad admisible de soporte	Valor máximo del esfuerzo de contacto aplicable al diseño y construcción de una cimentación. La capacidad admisible de soporte es solo una fracción de la capacidad última de soporte y se calcula aplicando a esta última un factor de seguridad apropiado. Los valores de factor de seguridad más corrientes se encuentran en el intervalo de 3 a 5.
Cohesión	Resistencia al corte del terreno cuando la presión normal efectiva es nula.
Ensayo CPT	El ensayo de penetración de cono CPT (por sus siglas en inglés Cone Penetration Test) es un método

de ensayo *in situ* para determinar las propiedades geotécnicas y delinear la litología del suelo. Consiste en el uso de una plataforma hidráulica para introducir a presión una punta cónica instrumentada en el suelo mediante varias barras.

Ensayo SPT

El ensayo de penetración estándar o SPT (por sus siglas en inglés Standard Penetration Test), es un tipo de prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que se quiere realizar un reconocimiento geotécnico.

Grava

Fracción de suelos cuyas partículas tienen un tamaño comprendido entre 2 mm y 60 mm. Fina hasta 6 mm; media hasta 20 mm; gruesa por encima de 20 mm.

Inclusión geotécnica

La inclusión busca lograr que los suelos, sobre todo aquellos que se encuentran en condiciones de segregación, puedan integrarse y funcionar como uno solo.

Licuefacción

Anulación de la capacidad para resistir esfuerzos de corte en un suelo granular fino, saturado y con densidad relativa baja, como consecuencia del aumento de presión intersticial originado por vibraciones.

Sondeo	Perforación profunda de pequeño diámetro, con extracción de testigo.
Permeabilidad	Capacidad de una roca o de un suelo de permitir el paso de un fluido a través suyo. Medida de la relativa facilidad en que un fluido pasa a través de un material bajo una diferencia de presión dada. La permeabilidad es una característica del material, independientemente de las propiedades físicas del fluido que pasa a través suyo, y es diferente del coeficiente de permeabilidad o conductividad hidráulica.
Poros	Espacio entre las partículas sólidas de los materiales.
Porosidad	Relación entre el volumen ocupado por los poros y el volumen total de la muestra (partículas sólidas + poros).
Presión intersticial	Presión (en exceso sobre la presión atmosférica) del agua en los vacíos de un suelo o roca saturados.
Resistencia al corte	Tensión tangencial máxima que un suelo puede soportar sin alcanzar la rotura. Se distinguen dos situaciones: con drenaje y sin drenaje.
Suelo cohesivo	Cuando la proporción en el peso del contenido de finos que tenga plasticidad es igual o superior al 35%.

Suelo granular

Cuando la proporción en peso del contenido de arenas y gravas es mayor del 65%.

RESUMEN

El aumento de la capacidad portante del suelo, mediante inclusión de columnas de grava, consiste en abrir pozos en el terreno a tratar, rellenarlos de grava graduada y a su vez compactarla para crear empujes laterales y mejorar diversas propiedades mecánicas del suelo. Este método ha mostrado ser eficaz y de gran beneficio en proyectos con suelos de tipo cohesivo sujetos a sufrir del fenómeno de licuefacción por sismos.

En diversos países desarrollados se aplica este método probando ser de gran utilidad; sin embargo, requiere de maquinaria especial, la cual difícilmente puede encontrarse en Guatemala, en donde se aplica la inclusión de columnas de grava actualmente en algunos proyectos para aumentar la capacidad portante del suelo, sin embargo, al no contar con maquinaria especial, se aplica un método de tipo artesanal adaptando la maquinaria que se puede encontrar en el medio local.

El presente diseño de investigación busca sentar las bases para aplicar la inclusión de columnas de grava con los medios que se encuentran al alcance en Guatemala, con base en los principios que rigen la aplicación de columnas de grava en otros países. Realizando ensayos de laboratorio se busca comprobar que se produce un aumento de la capacidad portante del suelo utilizando un método artesanal.

1. INTRODUCCIÓN

Debido a que en repetidas ocasiones se presenta la necesidad de edificar sobre terrenos con poca capacidad portante, se recurre a la aplicación de métodos de mejora del terreno, entre los cuales se encuentran: la compactación superficial, la precarga, la vibración profunda, la compactación dinámica, inyecciones, *Jet grouting*, entre otros. Escoger el método adecuado depende de varios factores como: el tipo de suelo, los resultados esperados, la rapidez de aplicación del método, la economía, entre otros.

La siguiente investigación presentará los resultados de la mejora de la capacidad portante del suelo, después de la aplicación del método de mejoramiento de la capacidad portante del suelo de inclusión de columnas de grava, en la finca No. 50, folio 3 del libro 5A, de Quetzaltenango, Guatemala.

En el primer capítulo se realiza una descripción de los métodos de mejora del suelo más utilizados, indicando sus ventajas y desventajas, así como su forma de aplicación.

En el segundo capítulo se explica el método de mejora del terreno de inclusión de columnas de grava, sus aplicaciones y objetivos, métodos constructivos, control de ejecución, características, formas de cálculo y los ensayos que asegurarán la correcta aplicación del método. Se exponen las condicionantes que permiten la aplicación de este método y su aplicación válida para este proyecto.

En el tercer capítulo se describe la fiabilidad del diseño de columnas de grava a fin de controlar los asentamientos en el terreno, además se describe su fiabilidad frente a la estabilidad de columnas, mediante mallas indefinidas de columnas de grava, grupos de columnas bajo zapatas y columnas aisladas.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados de varias pruebas de laboratorio a fin de comprender las condiciones existentes del suelo, se presentan dentro de esta investigación resultados de los siguientes ensayos de laboratorio: ensayo normal de penetración (Standard Penetration Test o SPT, por sus siglas en inglés), granulometría, límites de Atterberg, ángulo de fricción interna y velocidad de onda sísmica.

En el quinto capítulo se analiza el mejoramiento del suelo mediante la realización de los ensayos aplicados anteriormente al terreno mejorado, realizando un resumen de las condiciones existentes contra las condiciones mejoradas del suelo.

En el sexto capítulo se concluye con la discusión de los resultados obtenidos mediante la medición de diversos parámetros mecánicos del suelo entre la situación previa del terreno y la situación ya mejorada. Se realizan recomendaciones para la correcta aplicación del método y se indica el porcentaje de mejora que este puede otorgar a un terreno con tipo de suelo cohesivo.

2. ANTECEDENTES

Se conoce por los resultados obtenidos en laboratorio mediante el ensayo de penetración estándar (Standard Penetration Test o SPT por sus siglas en inglés) que el terreno ubicado en la finca No. 50, folio 3 del libro 5A, de Quetzaltenango, Guatemala, posee baja capacidad portante y cuenta con un suelo de tipo cohesivo.

Debido a que existe gran necesidad de construir en todo tipo de terrenos, se han desarrollado diversos métodos de mejoramiento del terreno, los cuales se utilizan para aumentar la capacidad portante del mismo. Entre las técnicas de mejoramiento del terreno más comunes se encuentran: compactación dinámica, estabilizaciones, inyecciones químicas, pilotaje, etc. Escoger la técnica adecuada depende de varios aspectos tales como: tipo de suelo, tiempo de ejecución, profundidad de la mejora, costo, materiales disponibles en la zona, propiedad del suelo que se busque mejorar, el tipo de estructura que se planea realizar, la experiencia del profesional, entre otros.

La siguiente investigación tiene como objetivo principal demostrar que, al aplicar el método de mejoramiento del suelo de columnas de grava en el terreno antes mencionado, la capacidad portante del terreno aumenta significativamente.

Se aplicará este método de manera artesanal, utilizando grava graduada y compactación mecánica con bailarina en varias capas, se espera obtener el aumento de la capacidad portante del terreno en un 65% más de lo que se cuenta actualmente, se realizarán ensayos de penetración estándar (SPT), a fin

de comprobar el aumento de la capacidad portante del suelo después de aplicar el método.

Resultados de investigaciones en otros países muestran que tras la ejecución de las columnas de grava se produce un fuerte incremento de las presiones intersticiales, que posteriormente se disipan en un período de tiempo relativamente corto, logrando el aumento de la capacidad portante del suelo. (Pollán, 2014).

Si bien las técnicas específicas de vibrocompactación y vibroflotación hacen uso de vibradores o vibroflotadores especiales, obviamente es posible construir columnas de grava mediante otros procedimientos más o menos convencionales y más económicos siguiendo el mismo principio de mejoramiento del suelo y obtener resultados satisfactorios. (Abad, 2003).

Los resultados de esta investigación proporcionarán referencia a los profesionales de la geotecnia, a fin de poder aplicar la inclusión de columnas de grava en terrenos de tipo cohesivo similares y de esa manera tener un estimado de los resultados posibles, así como de la manera correcta de aplicar el método, su cálculo y supervisión, por lo tanto podrán recomendar una solución más económica y rápida al inversionista o ejecutor de la obra, en el mejoramiento de la capacidad portante del suelo.

“El diseño frente a carga vertical de columnas de grava, se efectúa con base en la celda unidad, los ensayos a escala real y sobre modelo, son la base para el análisis numérico y para su diseño.” (Mitchell, 1985). Para diseñar columnas de grava no existe un marco normativo, como existe para una cimentación directa o profunda, por lo que esta investigación presentará un parámetro importante a considerar para la recomendación del profesional de la

geotecnia. Además, ayudará al pueblo de Guatemala, ya que no se cuenta con una investigación de la aplicación de forma artesanal de inclusión de columnas de grava.

El mejoramiento del suelo mediante columnas de grava se basa en los principios de la vibrocompactación y vibroflotación, los cuales utilizan pozos de grava compactados por grandes maquinarias, las cuales producen que se compacte la grava y se disipen sustituyendo parte del terreno por otro mejorado. (Barksdale, 1983).

Por lo que, según esta teoría, en esta investigación se realizarán pozos y se compactarán capas de grava mecánicamente con bailarina, por lo que la grava ejercerá un empuje lateral en el suelo logrando que suelo y grava trabajen juntos y aumente la capacidad portante del suelo.

Aunque existen varias técnicas constructivas, el principio de construcción básico mediante técnicas vibratorias es el mismo. En primer lugar se crea un hueco cilíndrico en el terreno, a continuación se coloca una carga de grava en el fondo de la cavidad, mediante la hinca y re-hinca del método de compactación mecánico dentro de la grava se forma una pequeña longitud de grava compactada, con un diámetro mayor que el hueco original. Este proceso se repite hasta que se forma la columna de grava y constituye el principio básico de formación de una columna de grava. (Wang, 2009).

En el terreno a tratar se excavarán pozos de tipo artesanal de hasta 8 metros de profundidad y se procederá a crear las columnas de grava compactadas, debajo de las estructuras que soportarán el peso de carga más significativo del proyecto.

La mejora del terreno, se produce al incorporarle columnas de grava, de manera que el resultado es un suelo mejorado, distribuyendo la carga uniformemente repartida en superficie, produciendo una disipación de las tensiones y por tanto el terreno tenderá a tener asientos despreciables. (Booker, 1981).

Las columnas de grava deben colocarse en una distribución uniforme debajo de las cimentaciones principales de la estructura, ya que el peso de la misma provocará que estas se hinchen, provocando que se distribuya mejor la carga y se aumente el valor soporte del terreno, logrando disipar los esfuerzos provenientes de las cargas a las que la estructura esté sujeta.

Los movimientos de la vibración al compactar las columnas movilizan el empuje pasivo del suelo e inducen un alto nivel de energía vibratoria. Además, la grava compactada en toda la columna origina el saneo y refuerzo de suelos sueltos blandos y funcionan como potentes drenes verticales que aceleran la consolidación. (Mora-Rey, 2014).

Como resultado de los esfuerzos al compactar la grava se obtiene la mejora de varias propiedades mecánicas del suelo, entre ellas se encuentran: una consolidación más rápida, el aumento de la capacidad portante, homogenización de los asientos del suelo y que se mitigue el riesgo de licuefacción.

Las columnas de grava además de aumentar la capacidad portante del suelo mejoran parámetros intrínsecos del terreno tales como: ángulo de rozamiento, cohesión, módulo de deformación, densidad, etc., hasta obtener un suelo equivalente mejorado, con capacidad suficiente para el apoyo de la estructura mediante cimentación directa. (Abad, 2003).

La aplicación del método de inclusión de columnas de grava no solo mejora la capacidad portante del suelo, sino que mejora muchas propiedades mecánicas de los suelos en los que se aplica, esto debido a la combinación de propiedades suelo-grava, empujes laterales, compactación e hinchamiento de las columnas y además drena la humedad existente del suelo.

“Las columnas de grava se basan en los principios de la vibrocompactación y vibrosustitución, lo cual posibilita el tratamiento de suelos granulares, arenosos, arcillosos o finos puramente cohesivos de manera práctica, rápida y económica”. (Pollán, 2014). A diferencia de otros métodos de mejoramiento del suelo las columnas de grava no necesitan de grandes maquinarias para su ejecución, por lo que pueden realizarse de diversas maneras artesanales, siempre que se sigan los principios fundamentales que rigen su diseño y ejecución.

“Las columnas de grava logran aumentar sustancialmente la rigidez y la resistencia del conjunto. Además, las columnas constituyen excelentes drenes para acelerar la consolidación del suelo cohesivo”. (Abad, 2003). Para su ejecución se abren pozos artesanales de 0.80 m. de diámetro como mínimo en un arreglo de tipo malla regular (para cargas extensas) y se vierte grava de granulometría selecta para luego irse compactando en capas mediante métodos mecánicos, a fin de que, al producirse vibración y esta reduzca el contenido de

vacíos en el suelo y se logre embutir en el terreno circundante la grava, se provoque un comportamiento en conjunto del sistema suelo-columnas.

Se debe conseguir que la base de las columnas sea muy robusta. Por ello es frecuente emplear más tiempo y energía de vibrado en esta zona. Debido al desplazamiento lateral de la grava durante el proceso de vibrado, generalmente el diámetro de las columnas es mayor que el del hueco inicial. (Arcos, 2005).

Se debe compactar cuidadosamente cada capa de las columnas de grava, ya que se espera que esta se hinche y logre combinarse con el suelo adyacente provocando empujes laterales, por lo que se debe calcular un excedente de grava a utilizar, ya que no solo se cubrirá el pozo sino que este se expandirá.

El diámetro también resulta variable en altura, correspondiendo mayores diámetros a las zonas más blandas. Por último, cerca de la superficie las columnas también muestran diámetros mayores debido al escaso confinamiento lateral del suelo circundante, lo que permite a la grava penetrar más en él. (Bayuk, 1979).

Se deberá descabezar cada columna de grava en la superficie con una capa de cemento, ya que esto proveerá de soporte a la cimentación a realizar sobre la misma y ayudará a distribuir de mejor manera la carga.

De acuerdo con la experiencia de investigadores, cuando el contenido de limos y arcillas (expresado como el tanto por ciento en peso de partículas de suelo de diámetro inferior a 0.08 mm) es superior a un 15 a 18%, el procedimiento de mejorar el suelo con columnas de grava no proporciona buenos resultados. (Armijo, 2008).

Esto se debe a que debido al contenido de finos mencionado cuando se compacta no se logra la combinación suelo-grava, por lo que no trabajan en conjunto.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Existe baja capacidad portante del suelo, mediante resultados obtenidos de la prueba *in situ* del ensayo de penetración normal (Standard Penetration Test o SPT, por sus siglas en inglés), en la finca No. 50, folio 3 del libro 5A, de Quetzaltenango, Guatemala, y además se sabe mediante resultados de laboratorio de suelos que el terreno posee suelo de tipo cohesivo.

Los estratos superiores no son apropiados ya que cuentan con muy poca capacidad portante, lo que puede deberse a varios factores tales como: uso previo del suelo (agricultura o posible relleno antrópico), suelos de tipo rígido, arcillas expansivas o arenas densas, baja resistencia al corte del suelo o nivel freático cercano. Por lo tanto se deben realizar acciones que garanticen la capacidad soporte del suelo que requiere la estructura planificada utilizando la técnica de mejoramiento del suelo que mejor se adecue a las necesidades.

Los métodos de mejoramiento del suelo son variados y dependen del tipo de suelo con que se cuente, por lo que se plantea la siguiente pregunta: ¿el método de inclusión de columnas de grava podrá ayudar a mejorar la capacidad portante de este terreno? ¿Será este método aplicable para este lugar específico? Además se quiere evaluar lo siguiente: ¿será este método eficaz, económico y rápido frente a otras técnicas de mejoramiento del suelo? ¿Cómo funciona el método de inclusión de columnas de grava? ¿Se cuenta con un suelo que pueda mejorarse mediante este método?

Notando que se cuenta con presencia de un suelo de tipo cohesivo y conociendo que el método de inclusión de columnas de grava es aplicable para este tipo de suelos, se propone utilizarlo para lograr el aumento de la capacidad soporte del suelo presente. Esto ayudará a disminuir el riesgo de asentamientos diferenciales, licuefacción, disminuirá los costos de ejecución del proyecto y garantizará la integridad estructural de la misma.

Además se deberá deducir mediante ensayos de laboratorio el porcentaje de aumento de capacidad portante en el suelo después de aplicado el método, y se medirá la mejora de las propiedades mecánicas del suelo en el terreno mejorado. Se pretende realizar este trabajo de investigación en un período de un año.

4. JUSTIFICACIÓN

El presente informe tiene como objetivo exponer los beneficios de aplicar la técnica de mejoramiento del suelo de inclusión de columnas de grava, ya que esta técnica es poco utilizada a nivel nacional, “en otros países ha probado ser muy efectiva” (Pollán, 2014). Esta investigación pretende aportar una opción diferente en busca del aumento de las propiedades mecánicas de los suelos, en especial de la capacidad portante del suelo, a fin de ofrecer una solución rápida, económica y práctica en su aplicación.

Sí no se aplica un método de mejora del terreno y se cuenta con una baja capacidad portante, dependiendo de la carga estructural y de la profundidad de los estratos, es posible que ocurra un asentamiento por consolidación inusualmente grande o tener problemas de licuefacción, durante los sismos, entre otros eventos, produciendo daños a la integridad de la estructura que se proyecta construir en el lugar. Debido a esto se hace necesario emplear la técnica de mejoramiento del suelo que permita su aplicación de modo práctico, rápido y a su vez sea eficaz en fortalecer la capacidad portante del suelo, disminuir su deformabilidad y modificar la permeabilidad del suelo, entre otros aspectos.

Por ello con la aplicación del método de mejoramiento mediante inclusión de columnas de grava se pretende obtener una mejora en la resistencia cortante del suelo, aumento en el factor de seguridad contra la falla posible de un talud, reducir la contracción y expansión de los suelos, reducir el riesgo de licuefacción y de asentamientos, entre otros beneficios.

“La inclusión de columnas de grava representa un desarrollo tecnológico que permite extender el ámbito de aplicación de las técnicas de vibración profunda, posibilitando tanto el tratamiento de suelos granulares como suelos arcillosos”. (Mora-Rey, 2014). Por eso es importante la implementación de este método en Guatemala y demostrar la mejora que el mismo ofrece en el incremento de la capacidad portante del suelo y en las propiedades mecánicas de los suelos tratados.

“Existen métodos de mejoramiento de la capacidad portante del suelo como la vibroflotación (*jet grouting*, en inglés) y la vibración profunda, los cuales han probado ser altamente efectivos en otros países” (Pollán, 2014). Sin embargo resultan ser poco aplicados debido a su alto costo y a que se debe contar con equipo especial para la aplicación de los mismos, el cual no es fácil de encontrar en nuestro mercado local. Se propone por tanto una aplicación más simple de estos métodos ya conocidos, bajo los mismos principios de manera artesanal.

La aplicación de columnas de grava en esta investigación se realizará mediante pozos artesanales y rellenados con grava mediante varias capas compactadas mecánicamente con bailarinas, a fin de poder simular el efecto de los métodos anteriormente descritos, por lo que resulta de aplicación práctica en el mercado.

Esta investigación realizará un importante aporte probando que se pueden aplicar los mismos principios de otros métodos similares en proyectos de menor envergadura y obtener resultados satisfactorios. Estos resultados ayudarán al futuro profesional a contar con un método alternativo de mejora de la capacidad portante del suelo que resulta más económico y rápido en su aplicación

5. OBJETIVOS

5.1. General

Aumentar la capacidad portante del suelo en la finca 50, folio 3 del libro 5A de Quetzaltenango, Guatemala, mediante la aplicación del método de inclusión de columnas de grava.

5.2. Específicos

- Comprobar que el método de inclusión de columnas de grava es económico, rápido y eficaz en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo de tipo cohesivo.
- Indicar los tipos de suelos en los que resulta eficaz la aplicación del método de mejoramiento de la capacidad portante, mediante la inclusión de columnas de grava y la manera de evaluar el mejoramiento del terreno.
- Realizar y comparar mediante el ensayo de penetración estándar (Standard Penetration Test o SPT, por sus siglas en inglés) que existe una mejora en la capacidad portante del suelo y sus propiedades mecánicas, después de aplicar el método de mejoramiento de inclusión de columnas de grava mediante los diversos parámetros de correlación con base en los resultados de este ensayo.

6. NECESIDADES A CUBRIR Y ESQUEMA DE SOLUCIÓN

La presente investigación trata del mejoramiento de la capacidad de soporte del suelo en la finca 50, folio 3 del libro 5A de Quetzaltenango, Guatemala, la cual posee suelo de tipo cohesivo, según pruebas de laboratorio. Se pretende mejorar la capacidad portante mediante la aplicación del método de mejoramiento del terreno conocido como inclusión de columnas de grava.

Debido a que esta investigación debe contar con la base teórica del método a aplicarse, la manera de aplicar el método, los ensayos aplicables para su verificación, así como el cálculo del tipo de columnas de grava a utilizar, se considera que tiene un carácter de tipo descriptivo.

A su vez se considera que esta investigación es de tipo correlacional, ya que se compararán las propiedades mecánicas del suelo antes y después de la aplicación del método de mejoramiento del terreno, evaluando los resultados mediante la prueba *in situ* del ensayo de penetración estándar (Standard Penetration Test o SPT, por sus siglas en inglés), esperando una mejora en la capacidad portante del suelo, así como otras propiedades mecánicas asociadas al mismo.

Este trabajo de investigación ayudará a comprender que existe la posibilidad de aplicar el método de mejoramiento de columnas de grava mediante otros procedimientos más o menos convencionales, distintos a la vibroflotación y al vibrodesplazamiento, ya que se plantea una solución de tipo artesanal bajo el mismo criterio de inclusión de material rígido compactado, solamente que utilizando compactación de tipo manual y pozos artesanales.

La aplicación del método de mejoramiento del terreno mediante la inclusión de columnas de grava en un suelo de tipo cohesivo ubicado en el valle de Quetzaltenango, Guatemala, permitirá que se profundice el conocimiento de la aplicación de este tema en el medio local y ayudará al profesional de la geotecnia a poder contar con una referencia fiable de la efectividad que el método presenta en un tipo de suelo específico, además podrá servir de referencia frente a lugares con suelos similares, a fin de poder dar una solución a los diversos proyectos de infraestructura que se proyecten en un terreno con necesidad de mejoramiento en sus propiedades mecánicas.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. Introducción, métodos de mejora del terreno

La necesidad de aplicar un método de mejoramiento del terreno surge debido a que se cuenta con un lugar dispuesto para la construcción de un proyecto y en este se encuentra suelo blando y/o deformable. Existen numerosas técnicas de mejoramiento del terreno disponibles hoy día, para aplicarlas deben considerarse aspectos tales como: tipo de terreno, propiedad geotécnica a mejorar, profundidad que se desea alcanzar con la mejora, condicionantes de coste, tipo de estructura a cimentar y tiempo de ejecución, entre otros.

Según Jiménez Salas (1989), “Los terrenos que necesitan de aplicación de un método de mejora del terreno son: i) terrenos granulares deformables y/o licuables; y ii) terrenos cohesivos blandos y/o deformables; a los que cabe añadir los rellenos antrópicos”. Según Quiles (2008), existen terrenos difíciles que pueden requerir tratamiento como: terrenos potencialmente expansivos, terrenos potencialmente colapsables (en particular los suelos loessicos), suelos residuales (lateritas, haloisitas, arcillas alófanas), suelos altamente compresibles (como la turba), suelos duros, terrenos kársticos (calizas, dolomías, yesos, terrenos salinos), suelos dispersivos (cuyo problema asociado es la tubificación), arcillas susceptibles (denominadas *quick clays*, que pueden sufrir una gran pérdida de resistencia).

Con los métodos de mejoramiento del terreno se busca aumentar la capacidad portante del suelo, disminuir la deformabilidad, modificar la permeabilidad, elevar la consolidación y mitigar la licuefacción. La profundidad de mejora es altamente variable, en un rango de menos de 1.00 m para la compactación superficial con rodillo hasta más de 100 m en el caso de tratamientos con inyecciones. (Ministerio de Fomento de España, 2002). Se muestran en la siguiente tabla métodos de mejora del terreno, los que a su vez se dividen en cinco grandes categorías:

Tabla I. **Clasificación de métodos de mejora del suelo**

CATEGORÍA	MÉTODO
A. Mejora del terreno sin adiciones en suelos no cohesivos o materiales de relleno	A1. Compactación dinámica
	A2. Vibrocompactación
	A3. Compactación por explosivos
	A4. Compactación por impulso eléctrico
	A5. Compactación superficial (incluyendo la compactación dinámica rápida, RIC)
B. Mejora del terreno sin adiciones en suelos cohesivos	B1. Sustitución/desplazamiento (incluyendo la reducción de carga mediante materiales ligeros)
	B2. Precarga mediante relleno (incluyendo empleo de drenes verticales)
	B3. Precarga mediante vacío (incluyendo la combinación de relleno y vacío)
	B4. Consolidación dinámica con drenaje mejorado (incluyendo el empleo de vacío)
	B5. Electro-osmosis o consolidación electro-cinética
	B6. Estabilización térmica usando calentamiento o congelación
	B7. Compactación por hidrovibración

Continuación de tabla I.

C. Mejora del terreno con adiciones o inclusiones	C1. Vibrosustitución o columnas de grava
	C2. Sustitución dinámica
	C3. Pilotes de arena compactada
	C4. Columnas encapsuladas con geotextiles
	C5. Inclusiones rígidas
	C6. Columnas reforzadas con geosintéticos o rellenos pilotados
	C7. Métodos microbianos
	C8. Otros métodos (métodos no convencionales, como la formación de pilotes de arena mediante explosivos y el uso de bambú, madera y otros productos naturales)
D. Mejora del terreno con adiciones tipo inyección	D1. Inyección de partículas
	D2. Inyección química
	D3. Métodos de mezclado (incluyendo la mezcla previa y la estabilización profunda)
	D4. Jet grouting
	D5. Inyecciones de compactación
	D6. Inyecciones de compensación
E. Refuerzo del terreno	E1. Tierra reforzada con acero o geosintéticos
	E2. Anclajes al terreno o claveteado del terreno
	E3. Métodos biológicos mediante vegetación

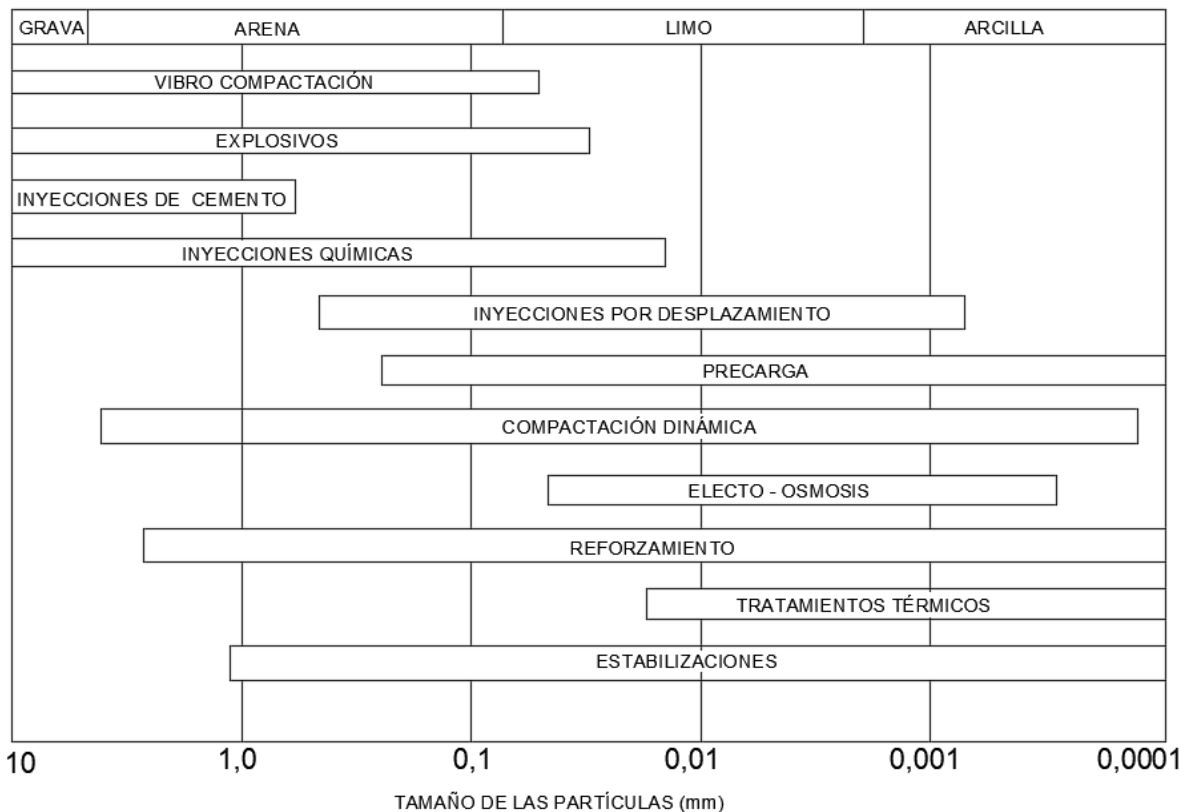
Fuente: Chu, J. V. (2009). *Construction processes. State of the art report.*

Según Mitchell (1981), para seleccionar el método más adecuado se deben evaluar previamente varios factores específicos del problema particular, entre los más importantes se encuentran:

- Conocer el volumen de suelo que necesita tratamiento.
- Determinar la profundidad de diseño a la que se necesita mejorar.
- El tipo de suelo a tratar y sus propiedades iniciales.
- Materiales disponibles, por ejemplo, arena, grava, agua, adiciones.
- Equipos y conocimientos disponibles.
- Factores medioambientales: eliminación de residuos, erosión, contaminación del agua.
- Efectos sobre estructuras adyacentes e instalaciones.

- Experiencia local y preferencias.
- Tiempo disponible.
- Coste.

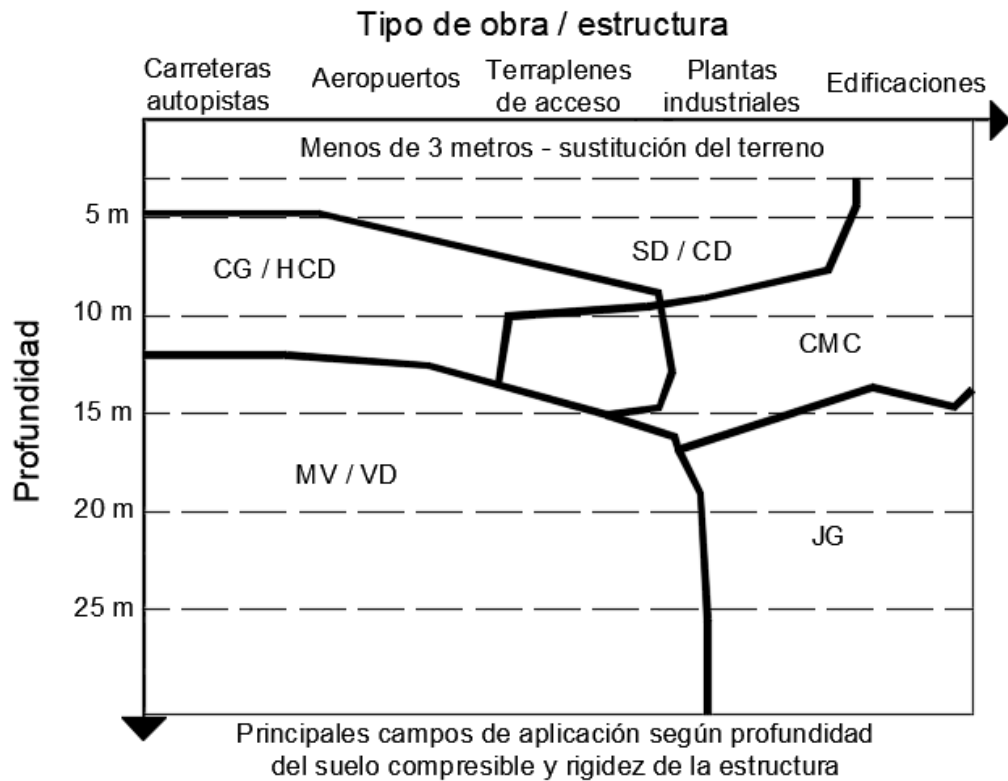
Figura 1. **Métodos de mejora aplicables a diferentes tipos de suelos**



Fuente: Mitchell, J. (1981). *Soil improvement. State of the art report.* / Olalla, C. (2006). *Metodos de control y su aplicación a suelos arcillosos.*

Para escoger un tipo de tratamiento de mejora del suelo es de suma importancia conocer el tipo de suelo con el que se cuenta, ya que según el suelo existente en el proyecto algunos tratamientos funcionarán mejor que otros.

Figura 2. **Métodos de mejora según la profundidad del suelo compresible y el tipo de estructura**



Fuente: Montejano, J. (2012). *Tratamiento de mejora y/o refuerzo del terreno mediante columnas de mortero o módulo controlado (CMC)*.

En donde:

- CD = compactación dinámica
- HCD = CD alta energía
- MV = precarga con vacío
- JG = *Jet grouting*
- CG = columnas de grava
- CMC = columnas de módulo controlado
- VD = drenes verticales

- SD = sustitución dinámica

El Ministerio de Fomento de España (2002), en su *Guía de cimentaciones*, presenta diversos métodos de mejora del terreno tomando en cuenta factores como: el tipo de suelo con el que se cuenta (granular o cohesivo), propiedad mecánica del suelo que se quiere incrementar (resistencia, deformabilidad, permeabilidad) y la profundidad que alcanza el tratamiento de mejora del suelo de la siguiente manera:

Tabla II. Alcances de las técnicas de mejoramiento del terreno más comunes

Técnica o tratamiento	Terreno		Mejora de			Eficacia
	Granular	Cohesivo	Resistencia	Deformabilidad	Permeabilidad	
Sustitución del terreno	Cualquier suelo problemático (suelos blandos, arcillas expansivas, suelos colapsables)		SÍ	SÍ	SÍ	Moderada (normalmente menos de 3 metros)
Compactación con rodillo	Cualquier terreno no saturado		SÍ	SÍ	NO	Pequeña (normalmente menos de 1 metro)
Precargas	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	NO	Varias decenas de metros
Mechas drenantes	NO	SÍ	NO	NO	SÍ	Hasta varias decenas de metros
Vibración profunda	SÍ Vibroflotación	SÍ Vibrosustitución	SÍ	SÍ	NO	Normalmente hasta 15 m. de profundidad
Compactación dinámica	Cualquier tipo		SÍ	SÍ	NO	Pequeña (normalmente menos de 1 metro)
Inyecciones	Impregnación	No aplicable	Algo	Algo	SÍ	Hasta más de 100 metros
	Hidrofracturación terreno	cualquier	Algo	SÍ	SÍ	
	Desplazamiento terreno	cualquier	SÍ	SÍ	SÍ	

Continuación de tabla II.

Jet-Grouting	Cualquier tipo	SÍ	SÍ	Sólo con columnas secantes	Normalmente menos de 20 m.
Columnas de grava	Cualquier tipo de suelo blando	SÍ	SÍ	SÍ	Normalmente menos de 20 m.
Columnas de suelo cemento	Cualquier tipo de suelo blando	SÍ	SÍ	NO	Normalmente menos de 20 m.
Claveteado o cosido del terreno	Suelos de consistencia media o superior	SÍ	SÍ	NO	Normalmente menos de 10 m.

Fuente: Ministerio de Fomento de España (2002). *Guía de cimentaciones*.

7.2. Principales métodos de mejora del terreno

A continuación se incluye una breve descripción de los métodos más comunes de mejora del terreno:

7.2.1. Compactación superficial

“Método que consiste en aumentar el peso específico del suelo, ordenando las partículas en un estado más denso y reduciendo el aire de los poros mediante la aplicación de fuerzas estáticas o dinámicas”. (Bergado, 1996). El suelo se compacta mediante la aplicación de energía en tres formas: por presión estática (con o sin un cierto amasado del suelo), por impacto dinámico y por vibración. “Las máquinas convencionales utilizadas suelen compactar por uno de estos principios o por una combinación de ellos”. (Kraemer, 1997).

Tabla III. **Maquinaria convencional de compactación**

Principio de compactación	Máquinas usuales	Comentarios
Presión estática	Rodillos lisos (Tándem, triciclo, trijes)	Su uso hoy día se restringe prácticamente a la construcción de firmes y al alisado o planchado final de capas ya compactadas
	Rodillos de patas de cabra	Se utiliza en fondos de desmonte o cimientos de terraplén en suelos cohesivos
	Rodillos de reja	Su utilización actual es muy reducida
	Compactadores de neumáticos	Particularmente eficaces en suelos algo cohesivos (arenas con finos) o bien en suelos de grano fino de plasticidad moderada.
Impacto dinámico	Pisones automáticos	En obras pequeñas o para compactar áreas reducidas o de difícil acceso (zanjas, rellenos próximos a muros, estribos, etc.)
	Pisones de caída libre	Capacidad de fragmentación y compactación de materiales rocosos en pedraplenes.
	Rodillos de impactos (tamper)	Cada vez más empleados en las grandes obras de carreteras.
Vibración	Rodillos vibratorios	Los rodillos lisos remolcados son actualmente los compactadores más usados
Métodos mixtos	Rodillos vibratorios de patas de cabra	Especialmente indicados para suelos cohesivos
	Rodillos lisos vibratorios	Actúan por vibro-compresión

Fuente: Kraemer, C. M. (1997). *Explicaciones y drenaje*.

7.2.2. Precarga

La precarga es comprimir un terreno con la finalidad de aumentar la resistencia y disminuir asentamientos, esto se logra mediante una presión aplicada en superficie, durante cierto tiempo antes de empezar a ejecutar el proyecto. (Faraco, 1980).

7.2.3. Vibración profunda o vibroflotación

La vibroflotación (vibrocompactación sin material de aporte) es la compactación profunda o densificación de suelos granulares flojos obtenida mediante vibración. Las vibraciones mecánicas consiguen que en suelos

saturados las partículas de arena y grava (sueltas) se reordenen en un estado más denso. “Las vibraciones causan la licuefacción en depósitos saturados sueltos, seguida por su densificación y asiento durante la disipación de presiones intersticiales”. (Bergado, 1996).

7.2.4. Compactación dinámica

Método eficaz en densificar terrenos con suelo de tipo granular, sueltos tanto en presencia de nivel freático como sin este y suelos cohesivos. El objetivo es mejorar la capacidad portante, disminuir la deformabilidad y reducir el potencial riesgo de licuefacción.

Su aplicación consiste en soltar una maza pesada desde cierta altura provocando un impacto en el terreno. Los impactos se efectúan desde una plataforma de trabajo por encima del nivel freático, coordinadamente sobre una malla de puntos, repitiéndose varias veces.

7.2.5. Inyecciones

Tienen como objetivo principal aumentar la resistencia del terreno, disminuir su deformabilidad y especialmente disminuir la permeabilidad. Las inyecciones pueden realizarse con o sin desplazamiento del terreno, existen tres métodos de inyección, los cuales son: i) Inyecciones de impregnación (permeación, inyección de fisuras y de contacto), ii) inyecciones de hidro fracturación, e iii) inyecciones de compactación. El primero se efectúa sin desplazamiento del terreno, mientras que los últimos dos requieren el desplazamiento del terreno para la introducción de la mezcla.

7.2.6. Jet grouting

También es conocido como inyecciones de alta presión, este método consiste en la sustitución parcial y/o mezclado del terreno. “Esto se logra mediante equipo de perforación especial, el cual perfora el suelo y luego inyecta una lechada de cemento a alta velocidad, a través de toberas laterales con un movimiento ascendente y descendente”. (Armijo, 2008).

7.2.7. Inclusiones rígidas y columnas de grava

Las inclusiones rígidas y las columnas de grava realizan la conformación de columnas de forma cilíndrica para mejorar el terreno, estas columnas son mecánicamente continuas y típicamente verticales. El concepto general es la construcción de una malla regular (para cargas extensas) alcanzando en general un sustrato resistente, de no encontrar un sustrato resistente las columnas de grava pueden dejarse flotantes, ya que trabajan por empuje lateral del suelo mediante su ensanchamiento al recibir las cargas, a su vez las mismas disminuyen la cantidad de vacíos en el suelo y provocan el aumento en varias propiedades mecánicas de los suelos.

Las columnas de grava poseen mayor rigidez que el suelo alrededor, por lo que atraen una parte importante de las cargas aplicadas en superficie, mientras que la carga tomada por el suelo reduce considerablemente a niveles aceptables en términos de capacidad portante y asiento admisible. Este proceso de transferencia de cargas se aplica tanto a obras de tierra (rellenos) como para estructuras de obra civil y edificaciones.

En las inclusiones rígidas el material que las compone ofrece una elevada cohesión, por lo que la columna no necesita de confinamientos laterales, no obstante, la rigidez de las inclusiones es altamente variable dependiendo del tipo de inclusión, que puede ir desde una columna de cal hasta una sección metálica, pero que también incluye las columnas de hormigón vibrado, columnas de mortero, etc. El diámetro de las inclusiones rígidas es variable desde un mínimo de 0.25 m., a diferencia de las columnas de grava cuyo diámetro frecuentemente es mayor a 0.80 m.

A diferencia de las inclusiones rígidas en el diseño de columnas de grava, se asume que los asientos son uniformes en cualquier plano horizontal de forma que todos son “planos de igual asiento” (Simon, 2012). Algunos puntos en común entre las columnas de grava y las inclusiones rígidas son:

- El diseño frente a carga vertical se efectúa con base en la celda unidad.
- Los ensayos a escala real y sobre modelo son la base para el análisis numérico y para el avance en la guía de diseño, existiendo muchas dificultades para su aplicación, especialmente económicas.
- En las técnicas de mejora del terreno no existe un marco normativo para su cálculo y diseño, como existe para una cimentación directa o profunda.

Se expondrá con mayor detalle este contenido en el capítulo 2 de esta tesis, por lo que no se insiste más sobre las columnas de grava en este apartado.

7.3. La mejora del terreno mediante columnas de grava

A continuación, se fundamenta el conocimiento necesario para poder utilizar el método de mejoramiento del suelo con columnas de grava. Se presentan los conceptos básicos del funcionamiento de este método y su aplicabilidad, la manera de ejecutarse y los métodos de cálculo que existen para el diseño de las columnas de grava.

7.3.1. Aplicaciones y objetivos

El método de mejoramiento del suelo con columnas es una opción distinta al realizar cimentaciones profundas comunes, el concepto de este método es mejorar el suelo en conjunto, no precisamente dirigir la carga hacia un estrato firme. Al lograr que suelo-columna trabajen juntos se mejoran las siguientes propiedades mecánicas del mismo: ángulo de rozamiento, cohesión, módulo de deformación, densidad, etc., hasta lograr un suelo equivalente mejorado, con características mecánicas necesarias para el apoyo de la estructura que se desea mediante cimentación directa sobre el terreno ya mejorado. “Este método permite la distribución uniforme de las cargas repartidas en la superficie, ya que produce una disipación de las mismas por todo el terreno y así logra obtener asientos despreciables”. (Mora-Rey, 2014).

Debido a las características del material granular del cual están hechas las columnas de grava, estas crean a su vez drenes naturales por los cuales puede ascender la humedad del terreno, lo que ayuda a mejorar la capacidad del portante del terreno. El material granular de las columnas de grava disipa las cargas que soporta la estructura, ya que densifica el suelo mediante empujes laterales, lo que produce una mejora en resistir el corte.

Debido a que las columnas de grava son poderosos drenes verticales se produce homogenización de los asientos en el suelo, se mejora el tiempo de consolidación y se obtiene una reducción del riesgo de licuefacción, ya que las ondas sísmicas pueden viajar con mayor rapidez en la grava y así producir menor impacto en la estructura cimentada. (Keller Cimentaciones, 2019).

El método de columnas de grava puede tener mejor economía y rapidez frente a otros métodos, ya que este utiliza para su ejecución únicamente grava, compactada en varias capas, la cual se apoya del empuje lateral que genera frente al suelo existente, por lo que el diseño de las columnas de grava está definido según sean las propiedades del suelo *in situ*, la carga que se requiera que estas puedan soportar y el asiento del suelo permitido según sea la edificación a construirse.

“Este método de mejoramiento del suelo se puede aplicar únicamente en terrenos cohesivos, formados por arcillas o limos, terrenos granulares cuyo contenido en finos sea superior al 10% a 15% y rellenos antrópicos”. (Mora-Rey, 2014).

Los movimientos generales de la compactación de las capas de grava, mediante vibradores, inducen al suelo alrededor de columnas de grava empujes laterales activos durante el proceso de ejecución del tratamiento.

Estas características indican la importancia de los efectos de ejecución de estas técnicas en la mejora de suelo final, a pesar de que, en el caso de las columnas de grava, los métodos de análisis y diseño habituales no consideran ningún efecto de ejecución. (Keller Cimentaciones, 2019).

La manera de realizar la mejora del terreno mediante columnas de grava es colocando grava en pequeñas capas compactadas mediante vibración mecánica para lograr aumentar la densidad relativa (D_r) del suelo, por lo que después de cierto tiempo de compactación las partículas se logran acomodar de manera más densa que su estado inicial.

Según Keller Cimentaciones (2019), para poder aplicar la técnica de mejoramiento del suelo mediante columnas de grava es importante considerar que el suelo debe cumplir con las siguientes características:

- Porcentaje de finos en el suelo superiores al 15 %
- Permeabilidades menores de 10^{-3} cm/s
- El cortante mínimo del suelo debe ser de al menos 30 y 60 kPa.

La decisión de emplear columnas de grava como mejora del terreno tiene su origen en el tipo de suelo a tratar, ya que se busca que estos sean suelos blandos como las arcillas.

Según Jiménez (2016), los parámetros que se mejoran debido a la aplicación del método de mejoramiento del suelo mediante columnas de grava son:

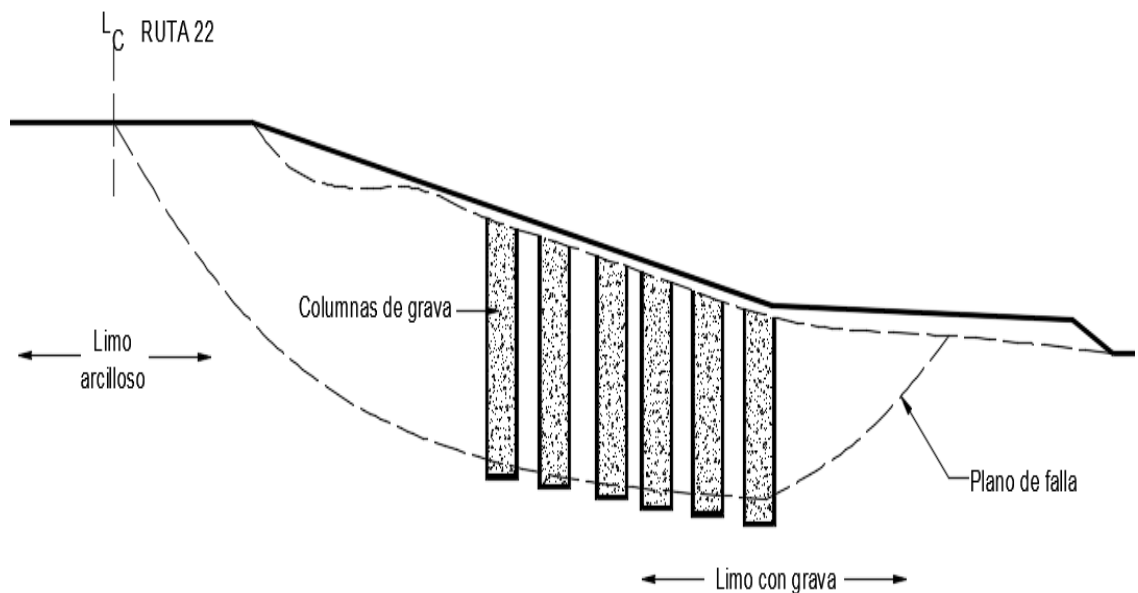
- Resistencia al corte.
- Aumento de la rigidez.
- Aumento de la permeabilidad.
- Reducción de contenido de finos.
- Reducción de asentos.
- Se consolidan los suelos de tipo cohesivo con rapidez.
- Disminuye el riesgo de deslizamientos en terraplenes.

- Se evita la licuefacción en arenas flojas, debido a que funcionan como drenes a la superficie.
- Se obtienen densidades relativas entre 70% a 80%.

En general las columnas de grava se emplean de forma frecuente para las siguientes aplicaciones:

- Estabilización de deslizamientos: se utilizan para eliminar el riesgo de deslizamientos en taludes.

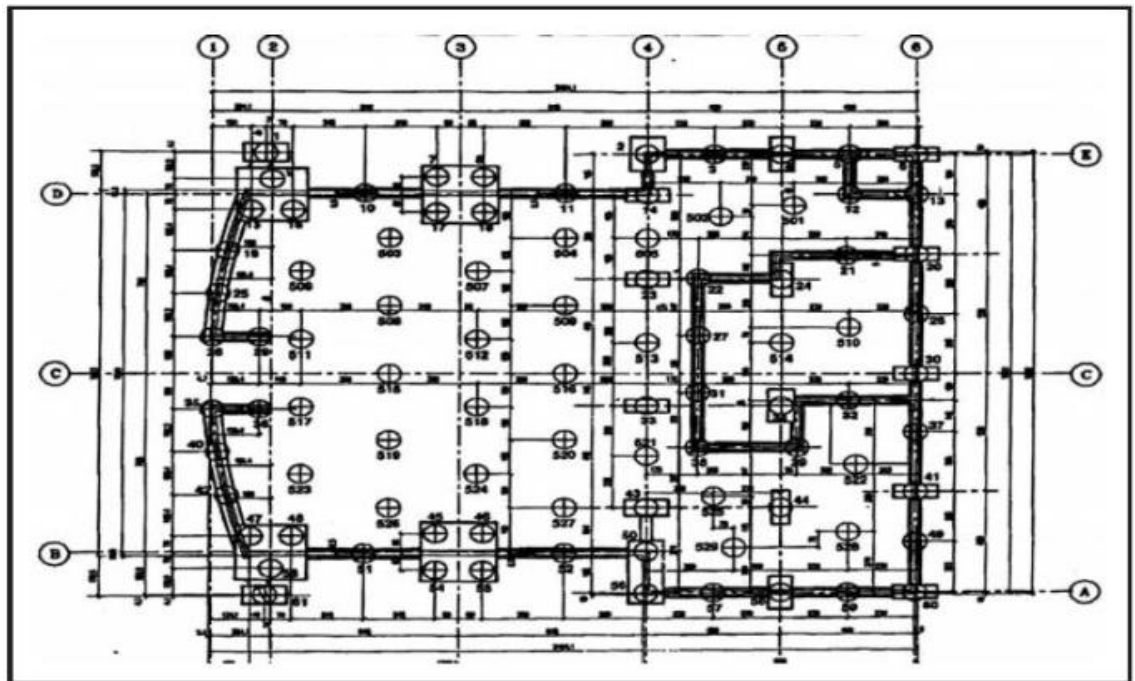
Figura 3. **Estabilización de un talud natural en Route 22 New York State**



Fuente: Goughnour, R. J. (1991). *Slide correction by stone columns*.

- Edificaciones ligeras y extensas: las columnas de grava también son aplicables en edificación, siempre que las cargas sean moderadas y se justifique la implantación de los equipos. Las columnas de grava se colocan debajo de los apoyos directamente en contacto con los mismos, estos pueden ser: zapatas aisladas, cimiento corrido, losas de cimentación, etc. (De Santiago, 2006).

Figura 5. **Cimentación de nave industrial mediante columnas de grava**



Fuente: De Santiago, R. (2006). *Mejora del suelo con columnas de grava en vía seca.*

Empleo como medida antilicuefacción: las columnas de grava también se han utilizado para prevenir la licuefacción en terrenos granulares en zonas sísmicas (por ejemplo en USA y Japón). En este sentido las columnas de grava son un elemento excelente, ya que:

- “Densifican, durante su instalación, los suelos granulares más limpios”. (Pollán, 2014).
- “Refuerzan, absorbiendo parte de las cargas generadas durante el sismo, lo que equivale a minorar la acción del sismo”. (Priebe, 1998).

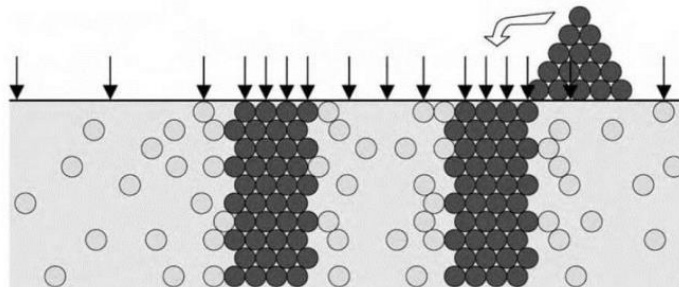
Las columnas de grava se colocan en el proyecto debajo de las cimentaciones que soportarán la estructura que se desea realizar. Las columnas de grava se colocan en arreglos de tipo malla rectangular, cuadrada o triangular. De preferencia se deben colocar en un arreglo de tipo malla triangular equilátera, ya que este arreglo es el que proporciona mayor certeza de que se estará tratando la mayor cantidad del suelo, esto debido a que las columnas de grava funcionan por hinchamiento, sustituyendo los vacíos en el suelo y expulsando a su vez la humedad del mismo, esto proporcionará uniformidad en los resultados del suelo tratado. (Abad, 2003).

Por eso las columnas de grava poseen ventajas en el tratamiento del problema sísmico sobre otros tratamientos que solo proporcionan densificación, drenaje o refuerzo. A medida que el porcentaje de finos del suelo aumenta, las columnas de grava disminuyen su eficacia, ya que se dificulta la densificación y la capacidad del drenaje del suelo. No obstante, en estos suelos es probable que la presencia de finos inhiba el propio proceso de licuefacción en sentido clásico (pérdida de resistencia al corte por anulación de tensiones efectivas), aunque aún se puede dar un fenómeno asociado al sismo denominado reblandecimiento cíclico (*cyclic softening*), especialmente en suelos blandos y susceptibles, para el que las columnas de grava pudieran aportar la componente de refuerzo, aunque aún es un aspecto que no está estudiado. (Pollán, 2012).

7.3.2. Descripción de la técnica de columnas de grava

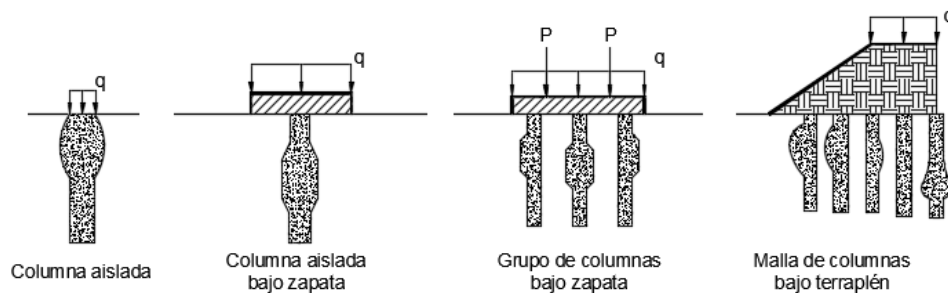
El principio de la técnica de mejoramiento del suelo mediante vibraciones es el mismo pese a la técnica constructiva que se aplique. En primer lugar, se crea un hueco cilíndrico en el terreno, se procede a rellenar el agujero con una capa de grava, por medio de los golpes del vibrador que se decida utilizar se forma una pequeña capa de grava compactada, el diámetro de la columna se ensancha a medida que avanza el proceso debido a la expansión por empuje lateral y confinamiento del suelo alrededor. Este proceso se repite hasta que se forma la columna de grava y constituye el principio básico de formación de una columna de grava. (Jiménez Salas, 1989).

Figura 6. **Principio básico de formación de columnas de grava**



Fuente: Raju, V. (2005). *Ground improvement using deep vibro techniques*.

Figura 7. **Diferentes configuraciones de carga para columnas de grava**



Fuente: Kirsch, K. (2010). *Ground improvement by deep vibratory methods*.

Las columnas de grava son aplicables a cualquier tipo de suelo blando, granular o cohesivo, existen algunas excepciones que requieren un estudio particular: rellenos antrópicos recientes (con basuras, plásticos, etc.) de impredecible evolución; rellenos recientes de materiales arcillosos con una fluencia muy alta; terrenos con obstáculos excesivos (restos de demolición, etc.); suelos con contenido muy alto de turba y suelos excesivamente blandos para permitir la formación de la columna. (Jiménez, 2016). Deben considerarse los siguientes aspectos en su ejecución:

- Para realizar el arreglo de columnas de grava se recomienda utilizar una malla triangular equilátera en donde se colocan las columnas entre 1.50 m. a 3.00 m. de separación entre las mismas. “Se debe tomar en cuenta que esta separación varía según la curva granulométrica del suelo que se requiera tratar”. (Abad, 2003).
- El diámetro común suele estar entre 0.8 m y 1.2 m. Para diseñar este diámetro se toma en cuenta: la resistencia al corte que ofrezca el suelo, el tipo de compactación que se aplique, la granulometría de la grava que se emplee y la carga que se considera que las columnas deban soportar. (Abad, 2003).
- “Contenido de finos menor del 15%, ya que si este es mayor la capacidad portante del suelo no puede incrementarse por métodos mecánicos de vibración, por lo que agregando grava al hueco generado no se logra una mejor compactación”. (Jiménez, 2016)

- “Para poder elegir el relleno de grava con las características adecuadas existen varios criterios: la grava debe ser bien graduada, triturada, angular y de tamaño entre 25 y 50 mm, aunque existen criterios más específicos según la granulometría”. (Abad, 2003).

Tabla IV. **Granulometría para realizar columnas de grava**

Apertura tamiz (pulgadas)	Apertura tamiz (mm)	Opción 1 (% que pasa)	Opción 2 (% que pasa)	Opción 3 (% que pasa)	Opción 4 (% que pasa)
4	101.6			100	
3.5	88.9			90-100	
3	76.2	90-100			
2.5	63.5			25-100	100
2	50.8	40-90	100		65-100
1.5	38.1			0-60	
1	25.4		2		20-100
0.75	19.05	0-10		0-10	10-55
0.5	12.7	0-5		0-5	0-5

Fuente: Instituto de Fomento de Hipotecas Aseguradas (1983). *Granulometría para columnas*.

Las opciones de la tabla anterior indican el tipo de granulometría que se debe utilizar para la elaboración de columnas de grava. Las opciones comúnmente aplicadas son la 1 y la 2, estas opciones muestran una granulometría graduada entre 40 a 50 mm.

“Si el suelo a tratar posee suelos blandos, se recomienda utilizar la alternativa 3 y una ejecución rápida. Las alternativas 2 y 4 se utilizan cuando se dispone de gravas de mayor tamaño”. (Pollán, 2014)

Debido a que las columnas de grava se expanden apoyándose de la resistencia al corte del suelo, no son aplicables a suelos blandos como las arenas, fangos o suelos orgánicos, ya que estos suelos son altamente compresibles fallarían por falta de soporte lateral, por lo que este tipo de suelos se deben tratar con otro método. (Abad, 2003)

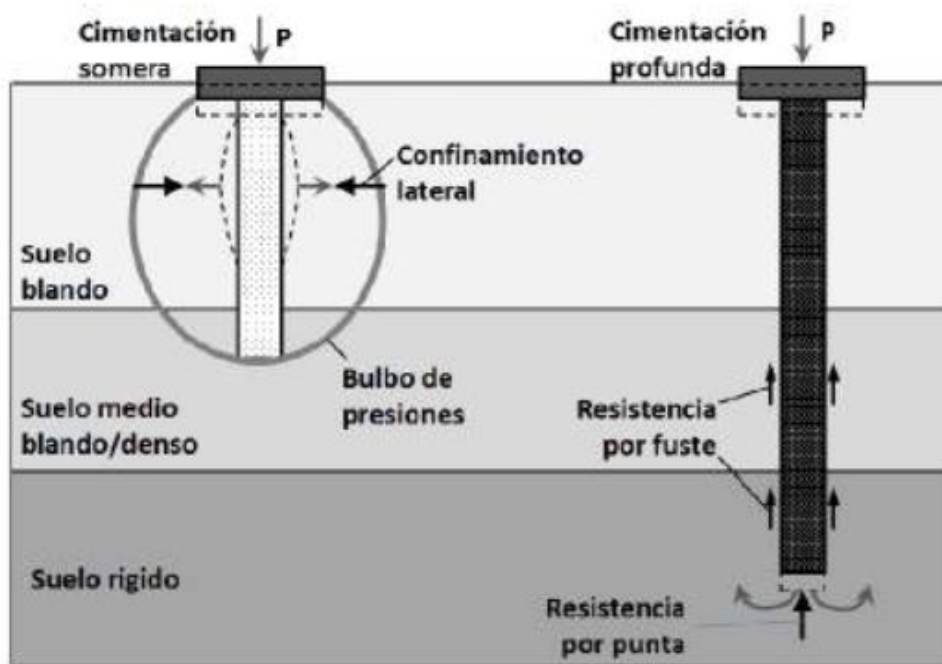
Debido a que las columnas de grava funcionan como un conjunto aumentando la compresibilidad de un área, los suelos sensitivos, es decir aquellos suelos como las arenas, suelos orgánicos, entre otros suelos blandos, no deben considerarse para la aplicación de este método de mejoramiento del suelo en ellos, ya que la vibración reduce su resistencia, por lo que no se logran confinar correctamente las columnas de grava. (Abad, 2003)

Con el transcurrir aumenta el coeficiente de empuje en reposo ya que la presión de la carga ejercida sobre las columnas y el terreno produce la consolidación del suelo alrededor de las mismas y se genera un incremento de rigidez en el suelo.

Al incluirse las columnas de grava dentro del suelo, estas trabajan como un sistema en conjunto suelo-columna aumentando la compresibilidad y el cortante del suelo. Por lo general se busca que las columnas se logren apoyar en un estrato firme de suelo, aunque de no poderlo encontrar las columnas de grava pueden quedarse flotantes trabajando por rozamiento. “Ya que estas se expanden al recibir la carga provocarán buenos resultados en la mejora de la capacidad portante del suelo”. (Jiménez, 2016)

Las columnas de grava no necesitan de una conexión estructural con un estrato profundo para lograr aumentar la capacidad portante del terreno, ya que estas reciben las cargas y las absorben mediante compresión vertical y expansión horizontal aumentando a su vez la densidad del terreno y la consolidación del mismo pues son excelentes drenes. (Pollán, 2014)

Figura 8. **Diferencia entre el funcionamiento de las columnas de grava y los pilotes**



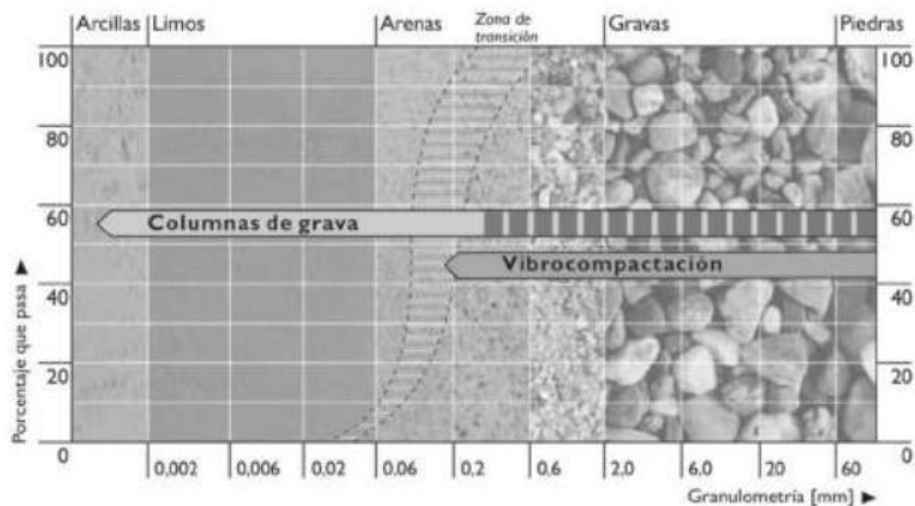
Fuente: Mora-Rey, E. C. (2014). *Columnas de grava mediante vibro-sustitución*.

Las columnas de grava ayudan a reducir la cantidad de carga que soporta el suelo, ya que su rigidez es mayor, estas soportan la mayor cantidad de carga aplicada sobre el terreno; esto produce un aumento de la capacidad de carga. Debido a que las columnas de grava funcionan como grandes drenes verticales

producen una homogenización en la consolidación del suelo y asentamientos aceptables.

El sistema de inclusión de columnas de grava ayuda a reducir la carga tomada por el suelo, ya que debido a la rigidez de las columnas estas soportan una parte importante de la carga aplicada en superficie, lo que produce niveles aceptables de capacidad portante y asiento admisible. Este sistema es utilizado tanto en obras de tierra (rellenos) como para estructuras de obra civil y edificación.

Figura 9. **Aplicación de columnas de grava según la granulometría del suelo**

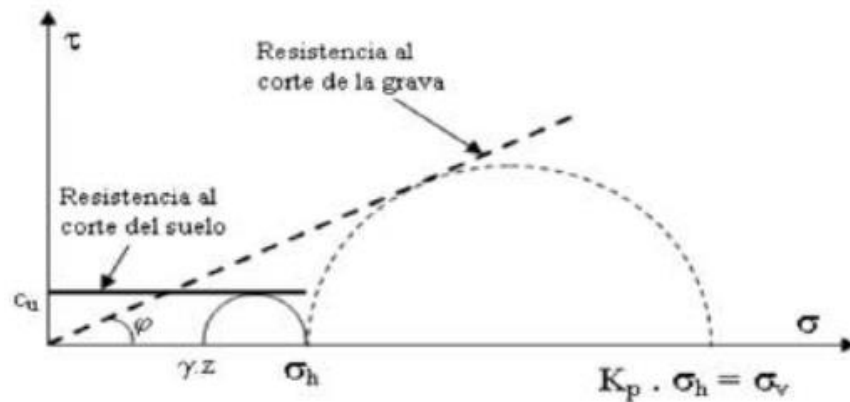


Fuente: Mora-Rey, E. C. (2014). *Columnas de grava mediante vibro-sustitución*.

En suelos arcillosos y saturados las columnas de grava no mejoran la capacidad portante del suelo, ya que no se cuenta con suficiente empuje lateral de parte del suelo, esto debido a que la energía vibratoria que se transmite no alcanza un alto nivel de densificación y los únicos esfuerzos con los que se cuenta son los laterales.

Al aumentar la densidad en el suelo se logra que la onda sísmica pueda recorrer con mayor rapidez el terreno, provocando que no se perciba en la estructura, por lo que se reduce en gran manera el riesgo de licuefacción. Es por esto que este método se utiliza en la mejora de terraplenes, cimentación de tanques, edificaciones, etc.

Figura 10. **Capacidad de carga de las columnas**



Fuente: Mora-Rey, E. C. (2014). *Columnas de grava mediante vibro-sustitución*.

“Al expandir su diámetro las columnas de grava generan sobre el suelo alrededor un empuje lateral activo, mientras el suelo ejerce un empuje lateral pasivo”. (Booker, 1981)

Por lo tanto, según Mora-Rey (2014), al mejorar la capacidad portante del suelo se esperan los siguientes resultados:

- Reducción de asentos: de existir estos serán homogéneos.
- Refuerzo del terreno: aumenta la capacidad portante del suelo evitando deslizamientos.

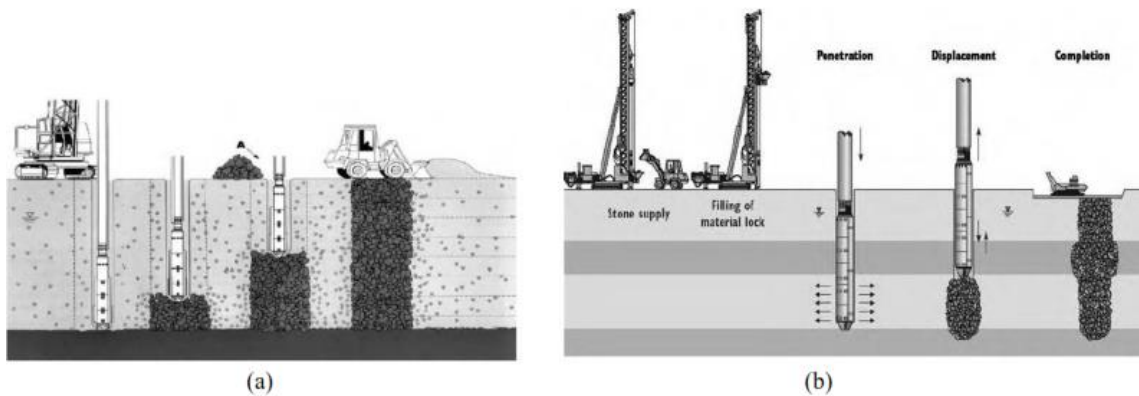
- Aceleración de la consolidación: las columnas de grava drenan el agua hacia la superficie, por lo que se reduce el riesgo de licuefacción.
- Densificación lateral del suelo: mediante el empuje activo de las columnas al suelo alrededor.

7.3.3. Métodos constructivos y características

Para poder realizar las columnas de grava existen diversos métodos, entre ellos se encuentran los métodos por vibración y los métodos por pilotaje.

Los métodos convencionales más comunes son: por vía húmeda con alimentación superior (Wet Top Feed Method, WTFD por sus siglas en inglés), y por vía seca con alimentación por fondo (Dry Bottom Method, DBM por sus siglas en inglés).

Figura 11. (a) Vía húmeda con alimentación superior (vibrosustitución);
(b) Vía seca con alimentación por fondo (vibrodesplazamiento)



Fuente: Raju, V. (2005). *Ground improvement using deep vibro techniques*.

Las columnas de grava tendrán un efecto mayor o menor en el incremento de la capacidad soporte del suelo dependiendo de factores como:

- Granulometría (% de finos, uniformidad, forma de las partículas).
- Propiedades mecánicas de los suelos como: relación de vacíos, compacidad y humedad, permeabilidad.
- Cota del nivel freático, etc.

7.3.3.1. Vía húmeda con alimentación superior

Se inyecta agua a alta presión desde la punta del vibrador para ayudar a su penetración en el terreno. Su secuencia constructiva según Jiménez (2016) es:

- Se deja caer el vibrador penetrando el terreno blando debido a su propio peso, además con la ayuda de chorros de agua y vibraciones.
- Se baja el vibrador hasta la profundidad de diseño y este se extrae y se vuelve a bajar a fin de generar el espacio para colocar la grava necesaria, la que a su vez se conforma con la mezcla de suelo y agua.
- En la superficie las gravas se colocan en torno al vibrador y se permite su entrada mediante un tractor en el espacio perforado, de modo que caen al fondo permitiendo la construcción de pequeñas columnas mediante extraer y volver a bajar el vibrador, el movimiento del vibrador compacta la grava y la comprime radialmente encajándola fuertemente en el suelo circundante.

Este proceso de compactación y alimentación continúa hasta que se forma la longitud de la columna deseada.

7.3.3.2. Vía seca con alimentación por fondo (vibrodesplazamiento)

Para realizar columnas de grava por medio de vía seca se utiliza aire comprimido, existen dos sistemas constructivos comunes, el de grúa y el de vibrocat. Su secuencia constructiva según Jiménez (2016) es:

- El vibrador penetra el terreno con el tubo cargado de grava (que actúa como tapón) con el aire comprimido activado.
- Al alcanzar la profundidad deseada se eleva el vibrador 1 ó 2 metros y mediante presión de aire se inyecta la grava en el espacio creado.
- El vibrador se extrae y se introduce en el suelo repetidamente hasta que se consiga que la grava se haya expandido en el hueco generado y se encuentre compacto.
- Se repite el proceso hasta alcanzar que la columna llegue a la superficie.

La ventaja de este método es que no necesita agua y puede ser aplicado cuando se cuenta con poco espacio de trabajo, o no se cuenta con suministro de agua cercano.

7.3.3.3. Otros procedimientos

Las columnas de grava se pueden elaborar de diversas maneras y no precisamente utilizando grandes equipos, siempre que se siga el mismo principio de compactación, vibración e hinchamiento, y tomando en cuenta los tipos de suelos y las características que estos deben poseer para que este método se pueda utilizar. Dependiendo del método constructivo puede variar la capacidad soporte de carga que la misma pueda poseer. (Abad, 2003).

7.3.4. Consideraciones generales

Una vez ejecutadas las columnas por cualquiera de sus métodos es conveniente regularizar la base de apoyo (descabezar) mediante una capa superficial de grava compactada de 0.3 – 0.5 metros, que encape las columnas realizadas con el fin de tener un apoyo más homogéneo para las estructuras, proporcionando un cierto reparto de cargas y facilitando la evacuación del agua.

A continuación se presenta una tabla comparativa entre las principales características de los métodos de ejecución de columnas de grava. “Se muestra que se tiene ventaja económica si la longitud necesaria de las columnas está en el rango de 6 – 10 metros”. (Barksdale, 1983).

Tabla V. **Características principales y datos técnicos de los métodos por vía húmeda y por vía seca (alimentación por fondo)**

	Vía húmeda	Vía seca
Máquina de apoyo	Grúa	Vibrocat con mástil Grúa
Profundidad máxima orientativa	35 m	20 m con mástil 35 m con grúa
Fluido de perforación	Agua	Aire
Gestión de agua y lodos	SI	NO
Efectos durante la instalación en el terreno original	No son significativos ya que se trata de una sustitución sin desplazamiento y con lavado de finos por el agua	Rigidización del terreno por desplazamiento Reducción de permeabilidad por remoldeo (smear)
Granulometría de la grava	25 – 75 mm	8 – 50 mm
Rango de diámetros	0.8 – 1.2 m	0.6 – 1.2 m (frecuente 0.7 – 0.8 m)
Ángulo de rozamiento	Práctica habitual de diseño: $\phi = 40^\circ$ Dr = 85% aprox.	
Módulo de deformación columna	E = 40 – 70 MPa	
Separación entre ejes	1.5 a 3.5 m	
Disposiciones habituales	En las filas bajo zapatas corridas y en mallas cuadradas o triangulares bajo zapatas aisladas o cargas extensas. Bajo zapatas la separación entre columnas será de al menos 1 diámetro. Bajo cargas extensas la intensidad del tratamiento oscila entre 1 col/2 m ² y 1 col/10 m ²	
Carga por columna	Orientativamente 150 a 400 kN/columna. Presión vertical admisible orientativa sobre la columna en el rango de 400 – 600 kPa	

Fuente: Kirsch, K. (2010). *Ground improvement by deep vibratory methods*.

Los rendimientos de ejecución dependen principalmente de la rigidez del suelo a mejorar, pero también del volumen de grava consumido, de las características del vibrador y de la eficacia del equipo de trabajo. “Los rendimientos generalmente varían entre 150 m y 450 m de columna de grava por turno de 10 horas por cada vibrador”. (Kirsch, 2010).

El método de mejoramiento de columnas de grava se utiliza comúnmente en áreas extensas, en las cuales se proyecta desarrollar terraplenes, tanques o depósito, aunque también se aplica para poder soportar cargas directas bajo zapatas aisladas, cada columna puede soportar una carga desde 200 a 500 kN. (Abad, 2003)

7.3.5. Control de ejecución y ensayos

Es muy importante la ejecución cuidadosa por parte de una empresa especialista y el registro continuo de parámetros durante la construcción. La bitácora del operador del equipo de ejecución es el control más fiable, ya que este proporciona datos muy importantes como: número de columna, tiempo de ejecución, velocidad con la que se elabora, empuje del vibrador y la cantidad de grava que se va consumiendo.

La bitácora del operador del equipo ayuda a que pueda comprobarse que la columna es continua, se encuentre compactada y esté apoyada en un estrato firme. Además, con la bitácora se pueden realizar mejoras en el diseño de las columnas para que el diseño se ajuste mejor al comportamiento del suelo *in situ*.

El control en tiempo real de la ejecución (control de procedimiento) es vital, pero también es adecuado efectuar ensayos externos de control sobre las columnas de grava ya ejecutadas.

Los ensayos para verificar la calidad de las columnas de grava deben medir: la continuidad, profundidad y compacidad de las columnas. Los más fiables son: el ensayo de penetrómetro estático o presiómetros, aunque los penetrómetros dinámicos también son válidos. (De Santiago, 2006).

Evidentemente estos ensayos externos tienen carácter estadístico muestral o de calibración, ya que resultaría antieconómico efectuarlos de forma sistemática (ya que las obras cuentan con cientos o miles de columnas de grava).

Para controlar la mejora, en su conjunto, si las columnas se instalan en suelos granulares, que pueden densificarse, está indicado realizar algunos ensayos *in situ* tipo: CPT, dilatómetros, penetrómetros dinámicos, presiómetros y SPT. Tienen interés especialmente en este tipo de cimentaciones los siguientes ensayos:

- Los ensayos de placa de carga sobre columna aislada (por ejemplo, para ajustar el factor de capacidad de portante por estabilidad de la columna).
- Ensayos de carga sobre una gran placa rígida o una zapata de hormigón de suficientes dimensiones para incluir una o más columnas en el terreno circundante.
- Zonas de ensayo a escala real, cargando una cimentación de tamaño real o colocando un relleno de tierras para simular cargas extensas.

7.3.6. Métodos de cálculo

Existen diversos métodos de diseño de columnas de grava, entre ellos se encuentran:

Tabla VI. **Métodos de cálculo para el diseño de columnas de grava**

Método	Comentarios
Edométrico	La compatibilidad de deformaciones verticales se establece suponiendo un modelo elástico edométrico. Es la solución más sencilla pero la predicción del SCF (factor de concentración de tensiones), no es realista, ya que está muy alejada de las medidas experimentales.
Greenwood (1970)	Proporciona un diagrama en el que se propone una estimación en la reducción de asientos con base experimental.
Balaam y Booker (1981)	Se trata de una solución analítica elástica rigurosa. La predicción del SCF esta aun alejada de las medidas experimentales.
Van Impe-De Beer (1983)	Sustituye la celda unidad (cilíndrica) por una pantalla indefinida equivalente en deformación plana.
Priebe (1976, 1995)	Es uno de los métodos más utilizados, especialmente en Europa. Se trata de un método semi-empírico en el que se consideran deformaciones plásticas en las columnas. Los valores obtenidos para n y SCF son razonablemente próximos a la realidad
Goughnour- Bayuk (1979,1983)	Proponen una solución incremental, basada en el concepto de la celda unidad, para el cálculo del asiento de una malla indefinida de columnas. Es necesario el uso de ordenador para su aplicación. Es un método muy utilizado en USA.
Guía de cimentaciones (2002)	Es un método empírico que parte de las observaciones de asientos en casos reales. Proporciona una relación entre la razón de sustitución y el factor de reducción de asientos. Está muy extendido en España.
Pulko y Majes (2005)	Es una solución analítica que considera un comportamiento elasto - plástico perfecto para la columna. Sólo se aplica al estado final, drenado, sin considerar la carga sin drenaje y posterior consolidación.
Ambily y Gandhi (2007)	Basándose en ensayos de laboratorio y en análisis mediante elementos finitos.
Castro y Sagaseta (2009)	Es una solución analítica completa, que considera tanto la carga sin drenaje como la posterior consolidación. Tiene en cuenta la plastificación de la columna. Los valores del SCF que obtienen están próximos a las medidas experimentales.
Lu et al. (2010)	Es una solución muy completa a la consolidación de un terreno mejorado con columnas de grava considerando tanto el flujo radial como el vertical.

Fuente: Pollán, J. A. (2014). *Diseño basado en técnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava.*

Uno de los métodos de cálculo muy utilizado y de buenos resultados es el factor de mejora (n) desarrollado por Priebe en 1995, el cual toma en cuenta la concentración de las cargas y comparaciones de columnas de grava experimentales en obra. (Bayuk, 1979)

Según el método de Priebe (1995) se asumen las siguientes condiciones:

- La carga sobre las columnas es de tipo distribuida y simétrica.
- No se producen deformaciones laterales en el contorno de la célula unitaria.
- No se producen esfuerzos cortantes en la célula unitaria.
- La célula unitaria se encuentra en condiciones triaxiales, ya que las columnas se encuentran confinadas por el suelo a su alrededor, lo que permite tener deformaciones verticales y laterales.
- Los asientos son uniformes en cualquier plano horizontal de forma que todos son planos de igual asiento.
- El confinamiento de las columnas mediante un geotextil las hace más rígidas y resistentes, incrementando su capacidad de carga vertical y aumentando la parte de carga tomada por las columnas.
- La celda unidad consiste en considerar el área de la columna junto con el área tributaria de suelo circundante.

8. PROPUESTA DE ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

LISTA DE SÍMBOLOS

GLOSARIO

RESUMEN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

OBJETIVOS

HIPÓTESIS

RESUMEN DEL MARCO TEÓRICO

INTRODUCCIÓN

1. MARCO TEÓRICO

- 1.1. Introducción, métodos de mejora del terreno
- 1.2. Principales métodos de mejora del terreno
 - 1.2.1. Compactación superficial
 - 1.2.2. Precarga
 - 1.2.3. Vibración profunda o vibroflotación
 - 1.2.4. Compactación dinámica
 - 1.2.5. Inyecciones
 - 1.2.6. *Jet grouting*
 - 1.2.7. Inclusiones rígidas y columnas de grava

2. MEJORA DEL TERRENO MEDIANTE COLUMNAS DE GRAVA

- 2.1. Aplicaciones y objetivos
- 2.2. Descripción de la técnica de columnas de grava

- 2.3. Métodos constructivos y características
 - 2.3.1. Vía húmeda con alimentación superior (vibrosustitución)
 - 2.3.2. Vía seca con alimentación por fondo (vibrodesplazamiento)
 - 2.3.3. Otros procedimientos
 - 2.4. Consideraciones generales
 - 2.5. Control de ejecución y ensayos
 - 2.6. Métodos de cálculo
3. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES EXISTENTES DEL SITIO PREVIO A LA APLICACIÓN DE COLUMNAS DE GRAVA
- 3.1. Resultados de laboratorio del ensayo SPT
 - 3.2. Resultados de laboratorio del ensayo de granulometría
 - 3.3. Resultados de laboratorio del ensayo de límites de Atterberg
 - 3.4. Resultados de laboratorio del ensayo de ángulo de fricción interna
 - 3.5. Resultados de laboratorio del ensayo de onda sísmica
 - 3.6. Resultados de laboratorio del ensayo CBR
 - 3.7. Conclusiones de situación actual del sitio
4. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DESPUÉS DE EJECUTAR EL MÉTODO DE COLUMNAS DE GRAVA EN EL SITIO
- 4.1. Resultados de laboratorio del ensayo SPT
 - 4.2. Resultados de laboratorio del ensayo de granulometría
 - 4.3. Resultados de laboratorio del ensayo de límite de Atterberg
 - 4.4. Resultados de laboratorio del ensayo de ángulo de fricción interna
 - 4.5. Resultados de laboratorio del ensayo de onda sísmica

- 4.6. Resultados de laboratorio del ensayo CBR
- 4.7. Conclusiones de situación modificada del sitio

- 5. COMPARACIÓN DE LA EFECTIVIDAD DEL MÉTODO DE COLUMNAS DE GRAVA
 - 5.1. Análisis comparativo de la mejora de los parámetros mecánicos del suelo entre situación previa y modificada
 - 5.2. Recomendaciones para la aplicación del método

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

9. METODOLOGÍA

Se procederá a realizar una inspección inicial de campo, para identificar, según las necesidades del proyecto, los lugares de cimentaciones principales y marcarlos en el sitio mediante mojones, con el fin de realizar el ensayo de penetración normal (SPT) y conocer así la capacidad portante del suelo existente en esos puntos específicos.

Se procederá a realizar el ensayo de penetración normal en los puntos previamente marcados. Una vez realizado este ensayo se llevarán las muestras al laboratorio con el fin de obtener las principales propiedades mecánicas del suelo sobre el cual se trabajará.

Mediante los ensayos de laboratorio se espera obtener la capacidad portante del suelo, el tipo de suelo, su granulometría, límites de Atterberg, su velocidad de onda sísmica y posibilidad de licuefacción, entre otras propiedades mecánicas de los suelos.

Conociendo que se cuenta con un suelo de tipo cohesivo se aplicará la técnica de mejoramiento del suelo de inclusión de columnas de grava, con el fin de mejorar la capacidad portante del suelo, se procederá al cálculo y diseño de las columnas de grava, procurando que su profundidad llegue a un estrato estable, de no ser así, se diseñarán para que trabajen por empuje lateral del suelo, además se procurará que se coloquen las columnas de grava en una malla de tipo triangular, según especificaciones y diseño adecuados según la teoría descrita.

Se verificará en campo la correcta aplicación del método de mejoramiento del suelo mediante ensayos de calidad de la grava y la correcta compactación y descabezado de cada columna, además se verificará la profundidad correcta de diseño.

Por último, se realizarán ensayos de penetración normal, a fin de realizar una comparación de la mejora de las propiedades mecánicas del suelo después de la aplicación del método de mejoramiento de este.

10. TÉCNICAS DE ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

10.1. Tipos de suelo

Los suelos pueden ser: suelos no cohesivos, suelos cohesivos y suelos orgánicos.

10.1.1. Suelos no cohesivos

Son aquellos que poseen diámetros relativamente grandes y sus partículas no se adhieren, también se les conoce como suelos granulares o de grano grueso, entre ellos se encuentran las gravas, arenas y limos.

10.1.2. Suelos cohesivos

Son los compuestos de partículas de granos muy finos, los cuales tienden a adherirse entre sí, poseen mucha plasticidad, en este tipo de suelos predominan los efectos electroquímicos superficiales. Entre estos se encuentran las arcillas. A mayor cantidad de arcilla más cohesivo será el suelo y será más estable teniendo menor probabilidad de provocar un derrumbe.

10.1.3. Suelos orgánicos

Suelos producto de la descomposición de materia, esponjosos y no aptos para el uso de obras de ingeniería civil.

La mayor parte de los suelos naturales se componen de una mezcla de diversos tipos de suelo, entre los cuales se pueden mencionar: gravas, arenas, limos y arcillas, además estos pueden contener material orgánico parcial o completamente descompuesto.

A continuación se describen individualmente los tipos de suelo más comunes:

- **Gravas:** acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas con diámetros mayores de 2 mm, las piezas grandes se llaman piedras cuando son mayores de 10 pulgadas (25.4 cm).
- **Arenas:** granos finos producto de la denudación de las rocas, varían entre los 0.05 mm y 2 mm de diámetro, no son plásticas, al aplicárseles carga en la superficie se comprimen rápidamente.
- **Limos:** granos finos con poca o ninguna plasticidad tienen diámetros entre 0.05 mm y 0.005 mm. Existen limos orgánicos que se encuentran en los ríos y limos inorgánicos que se producen en las canteras. “Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas, la permeabilidad y compresibilidad de los limos orgánicos es muy baja”. (Seis, 1994).
- **Arcillas:** partículas sólidas con diámetros menores a 0.005 mm altamente plásticas al ser mezcladas con agua. Debido a su composición química pueden ser de tipo silíceo o aluminico.

10.2. Capacidad portante del suelo

“Es una característica de cada sistema de suelo-cimentación, y no solo una cualidad intrínseca del suelo”. (Seis, 1994). La capacidad portante varía según el tipo de suelo que se tenga, así como del tipo, forma, tamaño y profundidad de la cimentación que aplica la presión. La resistencia a la deformación en los suelos depende de la resistencia a la fuerza cortante, la que a su vez depende de la suma de dos componentes: fricción y cohesión.

La fricción es proporcional a la fuerza perpendicular entre partículas de suelo y la cohesión es la resistencia máxima a la tensión del suelo. En la siguiente tabla se sugieren algunos valores de capacidad portante dependiendo del tipo del suelo según Seis (1994):

Tabla VII. **Capacidad portante dependiendo del tipo de suelo**

Material del suelo	Ton/m ²	Observaciones
Roca sana no intemperizada	645	No hay estructura de grietas
Roca regular	430	
Roca intermedia	215	
Roca agrietada o porosa	22-86	
Suelos gravillosos	107	Compactados, buena granulometría
Suelos gravillosos	86	Compactados con más del 10% de grava
Suelos gravillosos	43	Flojos, con mucha arena
Suelos arenosos	32-64	Densos
Arena fina	22-43	Densa
Suelos arcillosos	53	Duros
Suelos arcillosos	22	Solidez mediana
Suelos limosos	32	Densos
Suelos limosos	16	Densidad mediana

Fuente: Seis, J. V. (1994). *Guía teórica y práctica del curso de cimentaciones 1*.

10.3. Asentamiento de las cimentaciones

Bajo los esfuerzos que inducen las estructuras a edificarse sobre un suelo, se tienden a presentar hundimientos o asentamientos. Los asentamientos que producen daños son los que provocan hundimientos diferenciales, los cuales se presentan después de terminar la obra. Es importante para calcular los asentamientos posibles de una estructura contar con la distribución de esfuerzos dirigidos a los diversos estratos del suelo, así como su respectiva capacidad portante.

10.4. Ensayo Normal de Penetración (SPT)

Este método se emplea en suelos finos, en arenas finas y medias, en mezclas de finos y arenas, así como en suelos de tipo cohesivo y limosos. Se realiza de manera continua con muestreo alterado o en forma conjunta con muestreo inalterado (sondeos mixtos).

A partir de las pruebas se obtienen los parámetros de resistencia a la penetración estándar y en forma simultánea se efectúa la clasificación de campo, con base en los lineamientos que marca el Sistema Único de Clasificación de Suelos (SUCS). “El uso de este método es muy común en la mayoría de las obras de infraestructura y en las de trámite complementario, porque determina los principales parámetros mecánicos de los suelos. La normalización actual se rige por las normas ASTM D 1586 y D 6066”. (Menardi, 2003).

El rechazo se define de acuerdo a las siguientes alternativas: 1) total de 50 golpes aplicados en cualquiera de las tres carreras de 6"; 2) cuando se han acumulado un total de 100 golpes; 3) cuando no se observa ningún avance del sacamuestras durante la aplicación de 10 golpes sucesivos del martinete.

La aplicabilidad del método SPT en relación con los parámetros del subsuelo se describe en la siguiente tabla:

Tabla VIII. **Aplicabilidad del SPT**

Parámetros del subsuelo	Aplicabilidad del SPT
Tipo de suelo	B
Perfil estratigráfico	B
Densidad relativa (D_r)	B
Angulo de fricción (ϕ)	C
Resistencia al corte. UU	C
Presión neutra (U)	N
Relación de preconsolidación	N
Módulos E y G)	N
Compresibilidad (m_v & c_c)	C
Consolidación c_v)	N
Permeabilidad (k)	N
Curva-(σ - ϵ)	N
Resistencia a la licuefacción	A

Fuente: Menardi, R. L. (2003). *Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo normal de penetración.*

Las referencias sobre la aplicabilidad son las siguientes:

- A: aplicabilidad alta
- B: aplicabilidad moderada
- C: aplicabilidad limitada
- N: aplicabilidad nula

Los resultados del ensayo normal de penetración pueden correlacionarse aproximadamente para obtener propiedades físicas importantes del suelo, se muestra a continuación una tabla con algunas de estas correlaciones:

Tabla IX. **Correlaciones de propiedades físicas con el ensayo SPT**

Arenas (Aproximación bastante segura)		Arcillas (Aproximación relativamente insegura)	
Número de golpes por 30 cm, N	Compacidad relativa	Número de golpes por 30 cm, N	Consistencia
0-4	Muy suelto	Menos de 2	Muy baja
4-10	Suelta	4-8	Media
10-30	Media	8-15	Firme
30-50	Compacta	15-30	Muy firme
Más de 50	Muy compacta	Más de 30	Dura

Fuente: Seis, J. V. (1994). *Guía teórica y práctica del curso de cimentaciones 1*.

Correlación aproximada de las características del suelo mediante el ensayo normal de penetración

10.4.1. Procedimiento del ensayo SPT y equipo

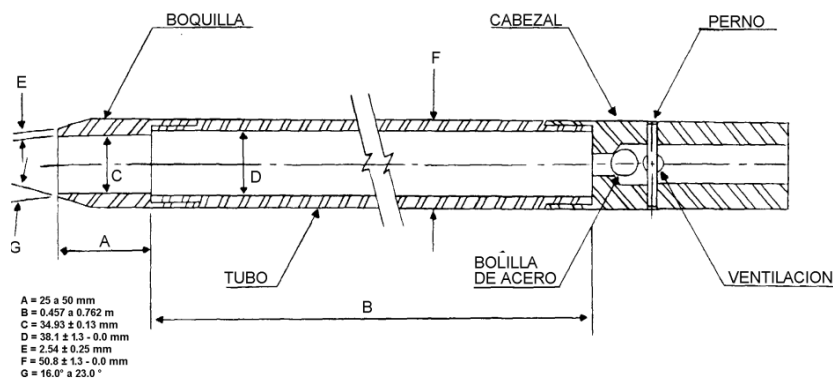
Consiste en definir el número de golpes (n) necesarios para conseguir que el tomamuestras penetre 30 cm el terreno a ser analizado. El tomamuestras se sitúa en la parte inferior del varillaje, que a su vez es hincado mediante el uso de una maza (peso-martillo) de 63.5 kilogramos (140 libras), que golpea el extremo superior del varillaje a manera de caída libre desde una altura de 76 centímetros (30 pulgadas). El tomamuestras suele tener 2 pulgadas de diámetro exterior y 1 3/8 pulgadas de diámetro interior y ángulo de punta a 60°.

El número de golpes N que se necesitan para que el tomamuestras penetre 30 cm se considera la resistencia a la penetración, para considerar la falla de apoyo los golpes de los primeros 15 cm de penetración no se toman en cuenta, y los necesarios para aumentar la penetración de 15 a 45 cm constituyen el valor N. (Seis, 1994).

Los elementos y las características relevantes del método propuesto por la ASTM son las siguientes:

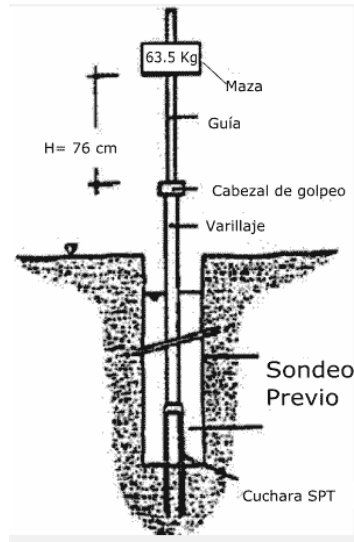
1. Maza de 63,5 kg.
2. Altura de caída: 76 cm
3. Sacamuestras: de diámetro externo = (50 mm ó 2 pulgadas). Figura 3.
4. Sacamuestras: de diámetro interno = (35 mm ó 1 3/8 pulgadas).
5. Variante con diámetro interno 38mm y tubo portamuestras (diámetro interno final 35mm).
6. Mecanismo de liberación del martinete mediante soga y malacate.
7. Barras de sondeo.
8. Cabeza de golpeo.

Figura 12. **Sacamuestra partido ASTM D1586-84**



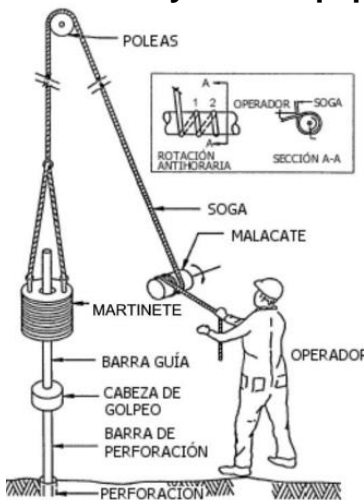
Fuente: Menardi, R. L. (2003). *Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo normal de penetración.*

Figura 13. **Determinación in situ mediante SPT**



Fuente: Menardi, R. L. (2003). *Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo normal de penetración.*

Figura 14. **Ensayo SPT equipo**



Fuente: Menardi, R. L. (2003). *Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo normal de penetración.*

10.5. Límites de Atterberg

Los límites de consistencia de Atterberg son: límite líquido, límite plástico y límite de retracción. Estos límites suministran los elementos para una rigurosa clasificación de las arcillas y para valorar muchas de sus propiedades. Pueden emplearse con utilidad para emprender un estudio riguroso, bien de los materiales destinados a la industria cerámica y de los ladrillos, o bien para proyectar las plantas de producción, integrando o sustituyendo algunos criterios todavía en uso.

Los límites de Atterberg están directamente relacionados con la cantidad de agua que contiene un material y es capaz de absorber; en otras palabras, con el tanto por ciento de partículas con dimensiones coloidales presentes en el material y su tendencia a comportarse como verdadero coloide. Está claro que debe existir una relación estrecha entre los límites y las características físicas y tecnológicas de un determinado material.

Vista la importancia de los límites, será útil definirlos aclarando su significado.

Si se considera una pasta de agua y arcilla, que se seca y endurece progresivamente pasando del estado fluido o líquido al estado plástico y, finalmente, al estado sólido, es fácil intuir que existen puntos de paso de un estado al otro; esto es, límites de cada estado.

10.5.1. Límite líquido

Es el punto de paso del estado líquido al estado plástico y se mide por la cantidad de agua que contiene un material en el momento que pierde la fluidez y la capacidad de escurrir como un líquido denso.

10.5.2. Límite plástico

Es el punto de paso del estado plástico al estado de semisólido, y se mide por la cantidad de agua que contiene un material en el momento que pierde la plasticidad y que no puede ser modelado.

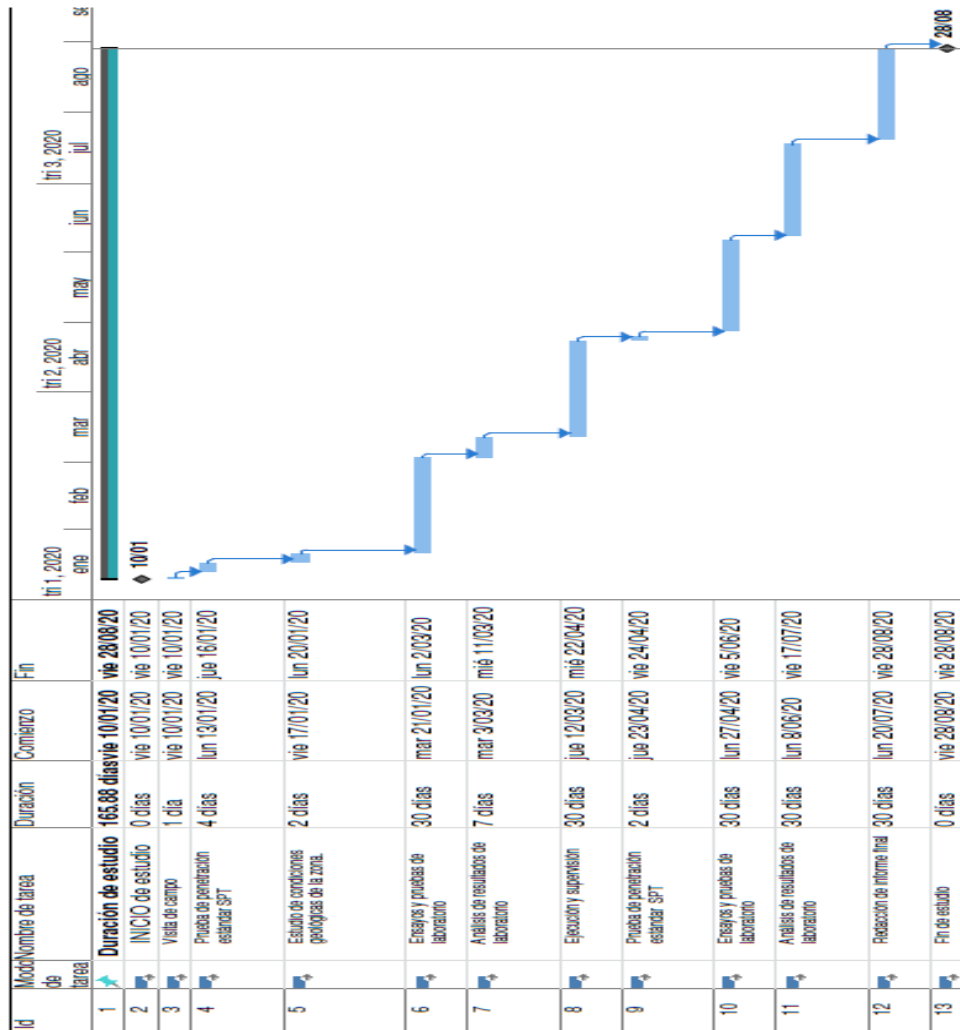
10.5.3. Límite de retracción

Es el punto de paso del estado semisólido al estado sólido, y se mide por la cantidad de agua que contiene un material en el momento que cesa la disminución de volumen que acompaña al secado.

Con los límites anteriores los suelos pueden ser clasificados por medio del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SCU).

11. CRONOGRAMA

Figura 15. Cronograma de trabajo



Fuente: elaboración propia.

12. FACTIBILIDAD DEL ESTUDIO

Figura 16. Recursos necesarios para la investigación

Descripción de la actividad	Recursos	Tipo de financiamiento
Pago de asesor	Q. 2,500.00	Propio
Vista de Campo para identificar puntos en donde se realizarán las pruebas	Q. 200.00	Propio
Prueba SPT Previo aplicación del método	Q. 4,000.00	PROVIDA GEOTECHNICAL ENGINEERING
Estudio geológico de la zona	Q. 500.00	PROVIDA GEOTECHNICAL ENGINEERING
Obtención de características geotécnicas y parámetros mecánicos del suelo	Q. 5,000.00	PROVIDA GEOTECHNICAL ENGINEERING
Análisis de resultados de laboratorio para aprobar la aplicación de columnas de grava	500.00	Propio
Ejecución y supervisión de la aplicación de columnas de grava	Q. 15,000.00	PROVIDA GEOTECHNICAL ENGINEERING
Prueba SPT Después de la aplicación del método	Q. 4,000.00	PROVIDA GEOTECHNICAL ENGINEERING
Obtención de características geotécnicas y parámetros mecánicos del suelo	Q. 5,000.00	PROVIDA GEOTECHNICAL ENGINEERING
Análisis de resultados de laboratorio antes y después de la aplicación del método	Q. 1,500.00	Propio
Redacción de Informe final	Q. 1,000.00	Propio
Costo total del proyecto de investigación	Q. 39,200.00	

Fuente: elaboración propia.

13. BIBLIOGRAFÍA

1. Abad, L. O. (2003). *Vibroflotación, columnas de grava*. Madrid, España: Uriel y Asociados S.A.
2. Alonso Pollán, J. A. (2012). *Análisis de fiabilidad del diseño de columnas de grava para mejora del terreno. Estabilidad de las columnas*. Sevilla, España: Simposio Nacional de Ingeniería Geotécnica: Cimentaciones y Excavaciones Profundas.
3. Arcos, A. T. (2005). *Fundamentos de los tratamientos con inyección y casos prácticos*. Madrid, España: Ingeoter.
4. Armijo, G. (2004). *Inyecciones de baja movilidad en terrenos kársticos*. Madrid, España: Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS.
5. Armijo, G. (2008). *Jet grouting*. Madrid, España: DRAGADOS-GEOCISA.
6. Barksdale, R. B. (1983). *Design and construction of stone columns*. Washington, D.C., USA: Federal Highway Administration Office of Engineering and Highway Operations Research and Development.
7. Bayuk, G. R. (1979). *Analysis of stone column-soil matrix interaction under vertical load*. Washington, D.C., USA: Int. sur le Renforcement des Sols.
8. Bergado, D. A. (1996). *Soft ground improvement in lowland and other environments*. Bangkok, Thailandia: ASCE Press.

9. Booker, B. N. (1981). *Analysis of rigid rafts supported by granular piles*. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics.
10. Castro, E. C. (2013). *Análisis numérico de los efectos de ejecución de columnas de grava*. Tesis de licenciatura. Universidad de Cantabria. Bilbao, España.
11. Castro, J. (2008). *Análisis teórico de la consolidación y deformación alrededor de columnas de grava*. Tesis de maestría. Universidad de Cantabria. Bilbao, España.
12. Chu, J. V. (2009). *Construction processes. State of the art report*. Alejandría, Egipto: International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering.
13. Cimentada, A. (2009). *Análisis experimental en modelo reducido de la consolidación radial y deformación de un suelo blando mejorado con columnas de grava*. Tesis de licenciatura. Universidad de Cantabria. Madrid, España.
14. Cuéllar, V. (2004). *Inyecciones por fracturación e inyecciones de impregnación*. Madrid, España: Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS.
15. Davie, J. Y. (1991). *Use of stone columns to improve the structural performance of coal waste deposits*. Washigton D.C., USA: Deep Foundation Improvement: Design, Construction and testing.
16. De Santigao, R. (2006). *Mejora del suelo con columnas de grava en vía seca*. Madrid, España: Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS.

17. Faraco, C. (1980). *Mejora del terreno de cimentación*. Geotecnia y Cimientos III, primera parte: Editorial Rueda.
18. Goughnour, R. (1983). *Settlement of vertically loaded stone columns in soft ground*. Denver, California, USA: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
19. Goughnour, R. J. (1991). *Slide correction by stone columns*. Denver, California, USA: Depp Foundation Improvement: Design, Construction and testing.
20. Jiménez Salas, J. (1989). *Introducción al proyecto de pilotajes*. Madrid, España: CEDEX-MOPU.
21. Jiménez, A. B. (2016). *Proyecto de ejecución de un relleno hidráulico y su tratamiento para cimentación directa*. Tesis de Licenciatura. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
22. Keller Cimentaciones. (2019). *Información sobre cimentaciones*. recuperado de: <https://www.keller-cimentaciones.com/mejora-del-terreno/columnas-de-grava-o-vibrosustitucion/#1497164090214-2279efad-a6a9>.
23. Kirsch, K. (2010). *Ground improvement by deep vibratory methods*. Madrid, España: Spon Press.
24. Kirstein, F. (2012). *General report. Vibro and impact Compaction*. Bruselas, Bélgica: International Symposium TC 211 IS-GI.
25. Kraemer, C. M. (1997). *Explicaciones y drenaje*. Madrid, España: UPM.

26. Menardi, R. L. (2003). *Determinación in situ de propiedades ingenieriles de los suelos y su relación con el ensayo normal de penetración*. Tesis de maestría. Universidad Tecnológica Nacional. Buenos Aires, Argentina.
27. Mengé, P. (2007). *Surface compaction of hydraulic fills of limited thickness*. Madrid, España: ECSMGE.
28. Ministerio de Fomento de España. (2002). *Guía de cimentaciones en obras de carretera*. Madrid, España: Ministerio de Fomento. Dirección General de Carreteras.
29. Mitchell, J. (1981). *Soil improvement. State of the art report*. Estocolmo, Suecia: International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
30. Mitchell, J. H. (1985). *Performance of a stone column foundation*. Estocolmo, Suecia: Journal of Geotechnical Engineering.
31. Mitchell, J. (2002). *A guide to ground treatment*. Estocolmo, Suecia: CIRIA C573.
32. Montejano, J. (2012). *Tratamiento de mejora y/o refuerzo del terreno mediante columnas de mortero o módulo controlado (CMC)*. Manual de dimensionado y ejecución, Madrid, España: Menard.
33. Mora-Rey, E. C. (2014). *Columnas de grava mediante vibro-sustitución*. Puerto Vallarta, Jalisco, Mexico: Keller Cimentaciones, S.L.U.

34. Moyle, R. T. (2012). *Assesment grid spacing for dynamic compaction*. Bruselas, Bélgica: International Symposium TC 211 IS-GI.
35. Olalla, C. (2006). *Metodos de control y su aplicación a suelos arcillosos*. Madrid, España: Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS.
36. Pollán, J. A. (2014). *Diseño basado en técnicas de fiabilidad del tratamiento de mejora del terreno mediante columnas de grava*. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno. Madrid, España.
37. Priebe, H. J. (1995). *The design of vibro replacement*. Ground Engineering. Madrid, España: Technical paper GT 07-13E
38. Priebe, H.-J. (1998). *Vibro replacement to prevent earthquake induced liquefaction*. Madrid, España: Technical paper 12-57 E.
39. Priebe, H.-J. (2005). *Design of vibro replacement. The application of Priebe's method to extremely soft soils, floating foundations and proof against slope or embankment failure*. Madrid, España: Ground Engineering.
40. Quiles, E. (2008). *Tratamiento del terreno*. Madrid, España: UPM.
41. Raju, V. (2005). *Ground improvement using deep vibro techniques*. Washignton D.C., USA: Ground Improvement Case Histories, Indraratna, B & Chu.,J.

42. Seis, J. V. (1994). *Guía teórica y práctica del curso de cimentaciones 1*. Guatemala, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala.
43. Simón, B. (2012). *General report. Rigid inclusions and stone columns*. Bruselas, Bélgica: International Symposium TC 211 IS-GI.
44. Wang, G. (2009). *Consolidation of soft clay foundations reinforced by stone columns under time-dependent loadings*. California, USA: Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.