

**EVALUACION DEL MEJORAMIENTO DEL SUELO EMPLEANDO EL
METODO DE COMPACTACION DINAMICA.**

LAURA ALEJANDRA GUTIÉRREZ CAJICÁ- 219366

KAREN ANDREA BARRERA WILCHES – 198841

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL BUCARAMANGA
2017**

**EVALUACION DEL MEJORAMIENTO DEL SUELO EMPLEANDO EL
METODO DE COMPACTACION DINAMICA.**

LAURA ALEJANDRA GUTIÉRREZ CAJICÁ- 219366

KAREN ANDREA BARRERA WILCHES – 198841

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Civil**

Director:

Ing. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL BUCARAMANGA**

2017

NOTA DE ACEPTACIÓN

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Marzo 2017.

DEDICATORIA

A Dios porque ha estado conmigo a cada paso que doy, cuidándome y dándome fortaleza para continuar, a mis padres, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar y educación siendo mi apoyo en todo momento, depositando su entera confianza en cada reto que se me presentaba sin dudar ni un solo momento en mi inteligencia y capacidad. Es por ellos que soy lo que soy ahora. A mis hermanos, por ser el incentivo para seguir adelante con este objetivo, a mi pareja por ser mi constante apoyo, y a mi director el Ingeniero Julián Galvis por entregarme sus conocimientos.

Dedico

Karen Andrea Barrera Wilches.

A Dios por ser mi principio y final, quien ilumina cada día de mi vida, a mi tío Hoover Cajicá quien me inspiró para hacer de mi vida luz para los demás, a mi mamá Luz Dary Cajicá por ser mi principal inspiración para lograr con éxito mis propósitos, por su amor infinito, su paciencia y su constante apoyo, a Rafael López por sus sacrificios y consejos, a mis hermanos Pablo y Esteban por ser mi principal motivación, a mi abuelo Belisario Cajicá por ser mi mayor alegría y bendición, a mi abuela Aurora Remolina por ser mi ejemplo de tenacidad, a Guillermo Velandia quien me motivó y ayudó a superar momentos de dificultad, por ser mi apoyo incondicional y brindarme sus conocimientos durante mi formación profesional.

Dedico

Laura Alejandra Gutiérrez Cajicá.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por acompañarnos y guiarnos a lo largo de nuestra carrera profesional, por brindarnos fortaleza, sabiduría y paciencia para poder culminar este proyecto.

A nuestros padres por su constante apoyo en nuestra formación como profesionales y a nuestros hermanos por su confianza y por ser nuestra mayor motivación para ser mejores día a día.

Al ingeniero Julián Galvis nuestro director en este proyecto por ser nuestro guía y tener la paciencia necesaria para ayudarnos a superar los obstáculos que se nos presentaron, por su exigencia para lograr mejores resultados.

Al ingeniero Diego Cobos por su dedicación, generosidad y apoyo incondicional en este proyecto, por compartir con nosotras su conocimiento y experiencia, por dejar una huella imborrable en nuestra vida profesional.

A la Universidad Pontificia Bolivariana por permitirnos formar parte de ella y brindarnos las herramientas necesarias para ser profesionales con excelencia y sentido humano.

TABLA DE CONTENIDO

1. GENERALIDADES	15
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.3 ALCANCE	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1. OBJETIVO GENERAL	18
2.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS	18
3.1. CASOS HISTORICOS DE MEJORAMIENTO DEL SUELO POR MEDIO DE LA COMPACTACIÓN DINÁMICA EN COLOMBIA	19
3.1.1. Puente de Siberia 2010.....	19
3.2 GENERALIDADES TECNICAS.....	19
3.3 METODOS DE MEJORAMIENTO	19
3.3.1 Precargas.....	19
3.3.2 Mejoramiento por Vibrado.....	20
3.3.3 Inyección de Compactación.....	25
3.3.4 Inclusiones Rígidas	26
3.3.5 Compactación Dinámica.....	28
4. METODOLOGIA DEL PROYECTO DE GRADO	35
4.1. SELECCIÓN DEL SITIO.....	35
4.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SITIO DE ENSAYO.....	36
4.3. ENSAYOS DE CAMPO PRE- COMPACTACION.....	39
4.4. ENSAYOS DE LABORATORIO PRE-COMPACTACIÓN	49
4.5. DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE COMPACTACIÓN DINÁMICA	51
4.5.1. Construcción de la Placa de Ensayo.....	52
4.5.2. Determinación de Energía de Impacto, Altura de Caída.....	55
4.6. PROCEDIMIENTO REALIZADO EL DIA DEL ENSAYO DE COMPACTACION	59
DINAMICA	59
4.7. RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPACTACIÓN DINÁMICA	60
4.8. CARACTERIZACIÓN POST-COMPACTACIÓN DINÁMICA	60
4.9. MEDICIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LA COMPACTACIÓN.....	64

4.10. ANÁLISIS DE DATOS PARA UN CIMIENTO.....	69
5. CONCLUSIONES	73
7. REFERENCIAS.....	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema típico de mejoramiento por precarga. Fuente: Documento recuperado [4]	23
Figura 2 - Equipos de vibrocompactación. Fuente: Geotecnia y Cimentaciones [6]	25
Figura 3 - Esquema típico de vibroflotación. Fuente: Construcción Geotécnica [7].....	26
Figura 4 - Esquema típico de vibrosustitución Fuente: Construcción Geotécnica [7]	27
Figura 5 - Esquema de vibro sustitución. Fuente: Geotecnia y Cimentaciones [6]	28
Figura 6 - Esquema de inyección de compactación. Fuente: Micropilotes General [9]	29
Figura 7 - Inclusiones rígidas. Fuente: “Construcción Geotécnica” [7]	30
Figura 8 - Procedimiento del Jet-grouting. Fuente: BACHY-SOLETANCHE [8]	31
Figura 9 - Procedimiento del ensayo. Fuente: “International Symposium: Rigid Inclusions in Difficult Soft Soil Conditions” [11]	32
Figura 10 - Efectos de la compactación dinámica en el suelo.	33
Figura 11 – Fases de compactación dinámica. Fuente: International Symposium: Rigid Inclusions in Difficult Soft Soil Conditions” [11]	35
Figura 12 - Aplicación típica de impactos. Fuente: Geotecnología SAS [13]	35
Figura 13 - Recomendaciones de suelos mejorables con compactación dinámica. Fuente: Federal Highway Administration “ <i>Dynamic Compaction</i> ” [12]	36
Figura 14 - Desplazamientos laterales medidos por FHWA Fuente: Federal Highway Administration (FHWA), 1995, “Dynamic Compaction”[12]	38
Figura 15 – Ubicación general del sitio de estudio. Fuente: Imagen tomada de Google Earth.	39
Figura 16 – Localización del área de estudio en la microzonificación sísmica. Fuente: INGEOMINAS (2001) [14]	40
Figura 17 – Vista del talud en corte y plataforma de trabajo	41
Figura 18 – Vista aérea del área de trabajo	42
Figura 19 – Realización Apique 1	43
Figura 20 – Realización Apique 2	43
Figura 21 – Muestras tomadas en Apique 1	44
Figura 22 – Registró Apique 1	45
Figura 23 – Registró Apique 2	46
Figura 24 – Ensayos de cono de arena, condiciones pre-compactación	47
Figura 25 – Ensayos de PDC, condiciones pre-compactación	48
Figura 26 - Resumen ensayos PDC en condiciones pre-compactación. Fuente: Elaboración propia.	49
Figura 27 - CBR correlacionado de los PDCs en el sitio de ensayo, condiciones pre-compactación	50
Figura 28 - Planta del área de ensayo y localización de pruebas de campo	51
Figura 29 – Granulometrías realizadas a las muestras recolectadas en los apiques	53

Figura 30 – Límites de Atterberg	54
Figura 31 - Placa de aplicación de cargas dinámicas. Fuente: Elaboración Propia.	56
Figura 32 – Construcción de placa para impacto.....	57
Figura 33 – Ensayo de control de calidad al concreto de la placa	58
Figura 34 – Patrón de aplicación de impactos y ensayos post-compactación	61
Figura 35 - Grúa empleada y patrón de impactos	63
Figura 36 - Resumen ensayos PDC en condiciones post-compactación	65
Figura 37 - CBR correlacionado de los PDCs en el sitio de ensayo, condiciones post-compactación	66
Figura 38 - Resumen ensayos PDC en condiciones pre y post compactación	67
Figura 41 – Cambios en la densidad del suelo	69
Figura 43 – Nube LiDAR antes del ensayo.....	71
Figura 44 – Comparación de nubes LiDAR antes y después del ensayo	72

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Ensayos cono de arena	46
Tabla 2 - Resumen ensayos PDC	48
Tabla 3 - Resumen ensayos de laboratorio pre-compactación	52
Tabla 4 - Resumen de ensayos de laboratorio, condiciones pre-compactación dinámica .	52
Tabla 5 - Ensayos de Proctor	53
Tabla 6 - Resultados de límites de Atterberg	54
Tabla 7 - Valores de n. Tomado de FHWA (1995)	59
Tabla 8 - Energía Aplicada	60
Tabla 9 - Ensayos cono de arena post-compactación	64
Tabla 10 - Resumen ensayos PDC post-compactación	64

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – Ensayos Pre-compactación ANEXO B – Ensayos Post-compactación
ANEXO C – Ensayos de laboratorio

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACION DEL MEJORAMIENTO DEL SUELO EMPLEANDO EL METODO DE COMPACTACION DINAMICA.

AUTOR(ES): Laura Alejandra Gutiérrez Cajicá Karen Andrea Barrera Wilches

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Ing. JULIÁN ANDRÉ GALVIS FLÓREZ M.Sc

RESUMEN

La compactación dinámica es una técnica históricamente empleada en el mejoramiento de suelos blandos o sueltos para aplicaciones de cimentaciones, control de deformaciones y disminución del potencial de licuación. La metodología consiste en densificar el suelo mediante impactos sucesivos de una masa de gran tamaño, aumentando su densidad, su resistencia al corte, capacidad portante y resistencia a licuación. Este trabajo de grado presenta un resumen de aplicaciones del método, sus ventajas y desventajas y mediante un ensayo de campo a escala real en un lote en Girón, Colombia, mostrar los beneficios de esta técnica frente a cimentaciones convencionales para aplicaciones superficiales. El ensayo se realizó en una excavación con existencia de suelos limo arenoso de consistencia media. La compactación fue ejecutada mediante una placa de concreto de 1x1x0.3 m, impactando el suelo en repetidas ocasiones en un patrón en tresbolillo. Se realizaron ensayos de caracterización geotécnica antes y después del ensayo parapropiedades básicas del suelo, mostrando una mejoría considerable. Por último, se realizó una evaluar la efectividad de la compactación y cambios en las comparación entre un diseño de cimiento superficial con las condiciones pre y post compactación, evidenciando un ahorro en la construcción del cimiento hipotético.

PALABRAS CLAVES:

Compactación dinámica, cimentación, mejoramiento suelo

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: EVALUATION OF GROUND IMPROVEMENT USING THE DYNAMIC COMPACTION METHOD.

AUTHOR(S): Laura Alejandra Gutiérrez Cajicá Karen Andrea Barrera Wilches

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Ing. JULIAN ANDRÉ GALVIS FLOREZ

ABSTRACT

Dynamic compaction is a technique employed for improving the ground conditions, particularly foundation and soil behavior. This technique consists on densifying the ground through successive impacts of a free-falling weight, increasing the soil density, shear strength, bearing capacity and liquefaction resistance. This research presents a summary of the method applications in Colombia, its advantages and disadvantages; and the results of a full-scale field test performed in Girón (Colombia) using a 1x1x0.3 m reinforced concrete slab as the impact weight. Geotechnical characterization tests were performed prior and after the test, evidencing a clear improvement on the basic properties of the soil. Lastly, the document presents the benefits of this technique over the construction of a hypothetical shallow foundation on the same soil with no improvement.

KEYWORDS:

Dynamic Compaction, foundations, ground improvement

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

INTRODUCCION

La compactación dinámica es un método que consiste en mejorar la capacidad portante de un suelo mediante la aplicación de esfuerzos dinámicos, que se generan por la caída a cierta altura de una masa que impacta el terreno repetidas veces, la energía de las ondas de impacto que se generan producen la densificación del suelo mejorando sus propiedades mecánicas y dinámicas, la reacción del suelo luego de la compactación depende de sus características geotécnicas y la cantidad de energía aplicada por los impactos de la masa.

El presente trabajo de grado tiene como objetivo evaluar el mejoramiento en las propiedades mecánicas de un suelo limo arenoso de un lote ubicado en la vereda la hormiga del municipio de Girón, Santander empleando el método de compactación dinámica. Para conocer el mejoramiento del suelo se realizó la comparación de los resultados obtenidos de ensayos en laboratorio y en campo antes y después de la compactación del suelo. Inicialmente se realizó una evaluación preliminar sobre las condiciones iniciales en las que se encuentra el área donde se realizara el ensayo, las características geotécnicas del suelo y del perfil estratigráfico, una vez se conoce que la compactación dinámica es viable en el terreno se realizan los ensayos de laboratorio y en campo con el fin de conocer las propiedades iniciales del suelo.

Se definió la altura de la caída de la placa que se diseñó en concreto reforzado con dimensiones de 1x1x0.3 m, impactando el suelo en repetidas ocasiones .La compactación dinámica se realizó sobre una grilla de dimensiones conocidas con anterioridad, finalmente se realizaron los ensayos de laboratorio y de campo post compactación y se procede a determinar las comparaciones y concluir la mejora en las propiedades geotécnicas del suelo.

Este documento presenta una resumida pero contundente comparación sobre el diseño de una zapata cuadrada para condiciones de un suelo compactado y una zapata para el mismo suelo antes de ser compactado y así demostrar las ventajas de aplicar el método de compactación dinámica con el fin no solo de mejorar las propiedades del suelo sino ahorrar tiempo y costos en una construcción.

1. GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Haciendo frente a la problemática observada en la actualidad de cuidar y preservar el medio ambiente y reducir costos en busca de nuevas técnicas de densificación de los suelos, la compactación dinámica es una gran opción, basándose en esta condición este trabajo de grado tiene como función evaluar y demostrar el mejoramiento presente en un suelo luego de ser compactado, mediante ensayos realizados antes y después de la compactación para poder reconocer las variaciones que se presentan en las propiedades geotécnicas de dicho terreno.

Dependiendo de las características particulares del suelo y de los requisitos estructurales, el tratamiento por compactación dinámica resulta muy económico comparado con los sistemas tradicionales. En algunos casos los costos de cimentación pueden ser reducidos tres a cuatro veces cuando se trata de cimentaciones profundas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

La compactación dinámica es una técnica de mejoramiento del suelo, cuyo propósito principal es el de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos inestables, densificándolos e incrementando su capacidad portante, esto se logra gracias a la creación de ondas de compresión y de corte de muy alta energía. Esta técnica se presenta como una nueva tecnología que se puede emplear en suelos finos y granulares, ahorrando tiempo y costos en obras civiles.

En Colombia, aún se utilizan métodos convencionales y son pocos los casos donde se ha utilizado la compactación dinámica como solución al mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo, es una técnica que se está estudiando para implementarla con más auge, ya que se ha visto implementado en construcciones a nivel mundial, dando excelentes resultados.

Uno de los principales problemas que se presentan en obra es que el suelo de fundación no cumpla con las condiciones esperadas relacionado con capacidad portante (última o de servicio) deformabilidad, compresibilidad o resistencia al corte para cimientos y muros, para esto se implementó el método de compactación dinámica buscando mejorar las propiedades mecánicas del suelo (rigidez, densidad y resistencia al corte) siendo una solución eficaz y moderna.

1.3 ALCANCE

Con este proyecto se busca estimar las mejoras en las propiedades de suelo estudiado luego de aplicar la técnica de compactación dinámica.

Se implementó la técnica de mejoramiento de suelos denominada compactación dinámica, para evaluar el aumento de la resistencia al esfuerzo cortante y el incremento en el grado de compactación del suelo estudiado, adicionalmente se realizará una comparación entre el efecto de la compactación dinámica en un cimiento superficial antes y después del mejoramiento del suelo para encontrar las diferencias en costos.

El tipo de suelo en el que se centró la realización del proyecto es un suelo previamente conocido de arenas arcillosas y limosas, se estudiarán detalladamente los componentes básicos para el adecuado desarrollo de esta técnica como también materiales, equipos, ensayos y controles.

El trabajo de grado se desarrolló en un predio de propiedad privada ubicado en Bajo Ruitoque, en el municipio de Girón, para generar energía de compactación, se emplea una placa en concreto reforzada construida por los investigadores y una grúa de capacidad mínima de 4 toneladas con brazo de 6 metros de altura. La placa y la grúa son de menor tamaño comparado con la energía de compactación empleadas en aplicaciones típicas de compactación dinámica y por ende las comparaciones de costos deben ser consideradas indicativas.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL.

Implementar la técnica de mejoramiento de suelos denominada compactación dinámica, para evaluar el mejoramiento de la resistencia al esfuerzo cortante y el incremento en el grado de compactación del suelo estudiado.

2.2. OBJETIVOS SECUNDARIOS

- Demostrar la viabilidad en el uso de la técnica de compactación dinámica en un suelo previamente conocido de tipo limo arenoso, ubicado en un predio privado en Bajo Ruitoque.
- Establecer el nivel de mejoramiento del suelo después de implementar el método de compactación dinámica, mediante implementación de ensayos de laboratorio realizados al suelo objeto del estudio antes y después del procedimiento de compactación.
- Analizar y concluir comparando este tipo de mejoramiento con un método tradicionalmente empleado en la industria colombiana como inclusión de elementos rígidos, cimientos profundos y reemplazo del suelo.

3. MARCO TEORICO

3.1. CASOS HISTORICOS DE MEJORAMIENTO DEL SUELO POR MEDIO DE LA COMPACTACIÓN DINÁMICA EN COLOMBIA

3.1.1. Puente de Siberia 2010

Las aproximaciones al puente fueron construidas con terraplenes apoyados directamente sobre el suelo compactado dinámicamente con mejoramiento hasta 12 m de profundidad y con sobre ancho del costado Sur hasta 5 m de profundidad, por medio de compactación dinámica. En el costado norte, los constructores no dejaron hacer el mejoramiento de 5 m de sobre ancho, debido a problemas de acceso de la carretera en operación; los problemas de no tener sobre ancho se resolvieron con grupos de pilotes a lo largo de la zona crítica para contener los efectos laterales del terraplén. Como era de esperarse, los asentamientos del costado norte fueron mayores a los del costado sur, pero finalmente el sistema está en operación sin problemas subsiguientes [1].

La fatiga del terraplén fue de 11.9 ton/m² en la zona crítica y los asentamientos del costado Sur del orden de 3 cm [1].

En este trabajo se utilizó una pesa de 10 toneladas con caídas de 15 m.

3.2 GENERALIDADES TECNICAS

Dentro de las primeras etapas de un proyecto en construcción existe una etapa importante que se refiere al adecuado conocimiento de las condiciones del subsuelo, en particular de su estratigrafía y propiedades, para determinar si es adecuado o requiere de mejoramiento. [2] Entre las mejoras que muchas veces se requieren en un suelo están el aumento de su compacidad (en el caso de los granulares) y la reducción de susceptibilidad a cambios volumétricos (en los suelos arcillosos). Todo proceso de mejoramiento implica una doble acción sobre la estructura de los suelos: un rompimiento y cambio de la estructura original que el suelo tenía y la modificación del arreglo o acomodo de sus partículas. [2]

3.3 METODOS DE MEJORAMIENTO

3.3.1 Precargas

Consisten en aplicar al terreno de cimentación cargas previas a las normales de operación de las estructuras en proyecto. Tienen como objetivo principal disminuir

la compresibilidad e incrementar la resistencia de los suelos cohesivos blandos. Las precargas usuales son terraplenes o plataformas de materiales térreos; en ocasiones se ha usado el abatimiento del nivel freático para proporcionarlas, pero esto es muy costoso por la necesidad de bombeo continuo. [3]

La precarga con plataformas es de uso frecuente internacionalmente en zonas donde se cuenta con suficiente tiempo para realizar esta actividad y por su facilidad de ejecución, aunque tiene la desventaja de requerir mayor área de trabajo y en algunos casos, en los que no se usa el material con el que se aplicó, un costo mayor. Para tanques de almacenamiento la precarga puede proyectarse en dos etapas: la primera la constituye el terraplén estructural del propio tanque, construido con las especificaciones propias para ese fin y la segunda es propiamente la precarga que por facilidad y economía se forma con materiales colados al volteo y bandeados hasta la elevación máxima prevista.[3]

La precarga se inicia con el desmonte y descapote del área, seguido del tendido en capas del material de precarga. Para conocer el comportamiento del subsuelo y el efecto de la precarga se instala instrumentación geotécnica como piezómetros, inclinómetros y placas de asentamiento.

El propósito de dicha instrumentación es observar la respuesta de la cimentación bajo el programa de precarga, construcción y pruebas hidrostáticas. Consiste principalmente en realizar nivelaciones de precisión en bancos superficiales para determinar los hundimientos generados y en instalación de piezómetros que permitan conocer la evolución de la presión de poro en el subsuelo.[3] La Figura 1 muestra un ejemplo típico del procedimiento de precarga.

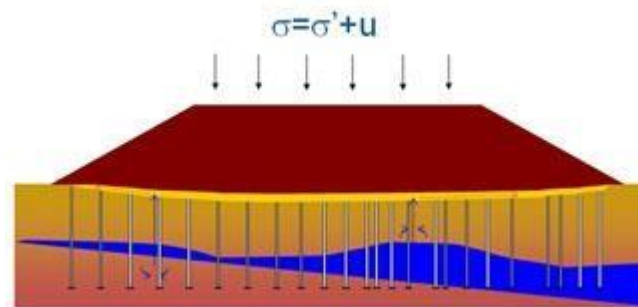


Figura 1 - Esquema típico de mejoramiento por precarga. Fuente: Documento recuperado [4]

3.3.2 Mejoramiento por Vibrado

Entre los procedimientos de mejoramiento por vibración se encuentra la vibro compactación, la vibro flotación, la vibro sustitución y el vibro hincado cuyos aspectos relevantes son los siguientes:

VIBROCOMPACTACIÓN

El método se ha aplicado con éxito hasta 10 - 15 m de profundidad, pero pueden alcanzarse 20 m con un vibrador poderoso. Se debe verificar la densificación del material después de que el suelo ha sido vibrado; para ello se realizarán sondeos de penetración estándar o de cono, comparando sus resultados con determinaciones iniciales en la misma área. En la aplicación de este método se ha observado lo siguiente:

- a) los primeros 1 - 2 m generalmente no quedan densificados y deben compactarse después con un equipo de compactación superficial;
- b) si el suelo contiene capas limosas o arcillosas éstas no se logran compactar
- c) la resistencia de punta en sondeos de cono puede incrementarse entre 50% y 100%;
- d) la compacidad relativa requerida (de 60 a 80 %, y en algunos casos 100 %) se puede alcanzar; y el suelo se asienta de 7 a 10 %. [5]

El grado de densificación alcanzado dependerá de la intensidad de la vibración generada y de las propiedades del suelo, en particular su composición y forma de los granos. El método es más efectivo en arenas limpias. Se han logrado mejoramientos a profundidades de 30 m, pero las típicas son de 9 a 15 m.[5] La Figura 2 muestra los equipos típicamente empleados en la vibro compactación.



Figura 2 - Equipos de vibrocompactación. Fuente: Geotecnia y Cimentaciones [6]

El mejoramiento que se logra depende del tipo de suelo, además del espaciamiento de los puntos de vibro compactación y del tiempo de mejora. Los asentamientos

medidos en suelos granulares alcanzan del 5 a 15% de la profundidad tratada [5]. Se ha visto que el procedimiento es más eficiente en materiales granulares con contenido de finos no mayor de 10 a 15%.

El efecto de la densificación disminuye conforme aumenta la distancia horizontal respecto al vibrador. La licuación inducida durante el tratamiento es total hasta distancias de 30 a 50 cm del vibrador, siendo nulo el efecto a 2.5 m debido al amortiguamiento del propio terreno. [5]

VIBROFLOTACIÓN

El dispositivo principal del sistema es el llamado “Vibroflot” (según la patente americana), que consiste en un vibrador de grandes dimensiones, dotado con boquillas para lanzar agua a presión. La densificación se logra mediante la acción combinada de vibración y del viento. El método consiste en hincar en el terreno el vibrador, que puede tener 40 cm de diámetro, 183 cm de longitud y 2 t de peso. [5]

Con su masa excéntrica interna, el vibrador puede desarrollar una fuerza horizontal de 10 t a 1800 rpm, desplazándose lateralmente del orden de 2 cm. Para facilitar su hincado y en general su funcionamiento, tiene chorros de agua tanto en su parte inferior como superior, con los cuales puede suministrar agua a razón de 4 a 5 lts/seg (60 a 80 gpm) con una presión de 4 a 6 kg/cm² (60 a 80 psi). Los huecos dejados por el vibrador se van rellenando con material granular (Figura 3). [5]

Con este procedimiento se forman columnas de 2.4 a 3.0 m (8 a 10 pies) de diámetro en cada penetración del vibrador. El grado de compactación es máximo al centro de la columna y decrece radialmente. La experiencia indica que el método también es más eficiente en suelos arenosos limpios, de preferencia gruesos. Dado que se introduce suficiente agua en el terreno en la zona por tratar, para asegurar la saturación del material, la ubicación del nivel freático no afecta la aplicabilidad del método. [5]

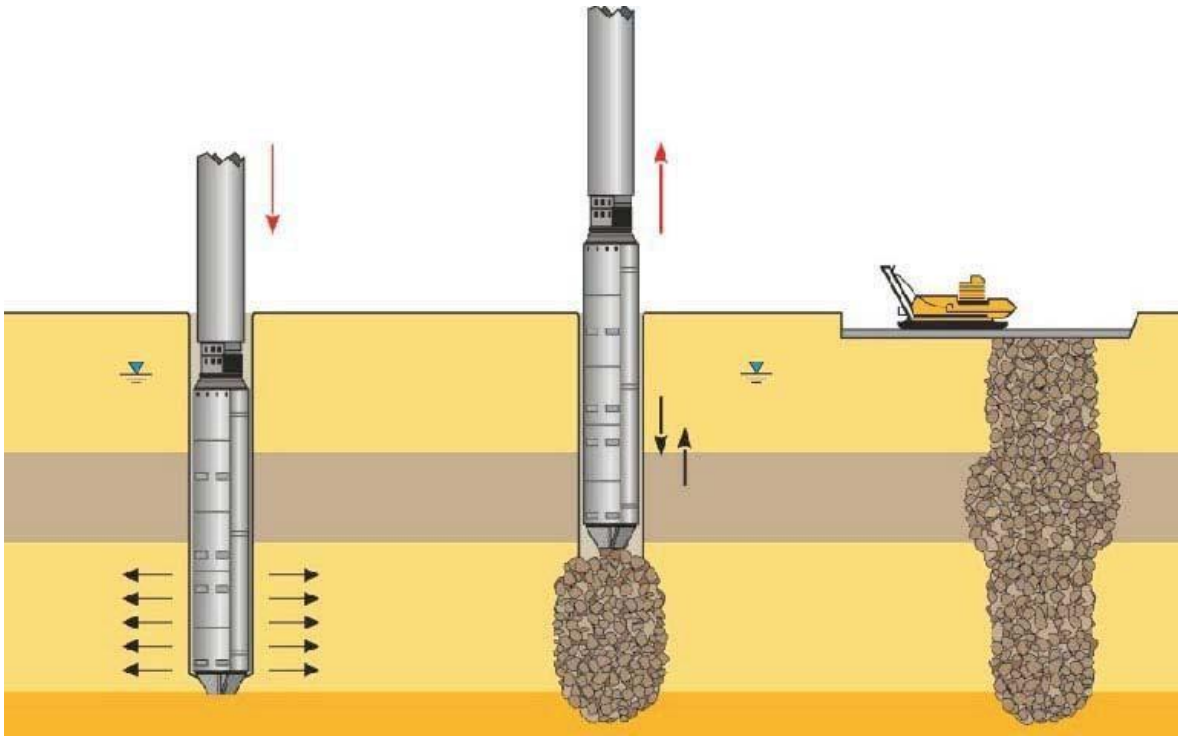


Figura 3 - Esquema típico de vibroflotación. Fuente: Construcción Geotécnica [7]

VIBROSUSTITUCIÓN

En suelos cohesivos blandos y en depósitos orgánicos se han usado con éxito columnas de grava formadas por Vibro flotación. Esto es una variante del proceso original y se le conoce también como vibro sustitución (Figura 4). En este método el Vibroflot forma una perforación vertical a través de un terreno blando, el cual posteriormente es llenado con grava o piedra triturada, además de ser compactado por el propio vibrador. [8]

El método permite incrementar la densidad del suelo y proporcionar drenaje para disipación de la presión de poro. Al introducir un elemento rígido se ocasiona una disminución de esfuerzos en el suelo, ya que habrá una mayor concentración en los elementos rígidos, además de una deformación limitada.

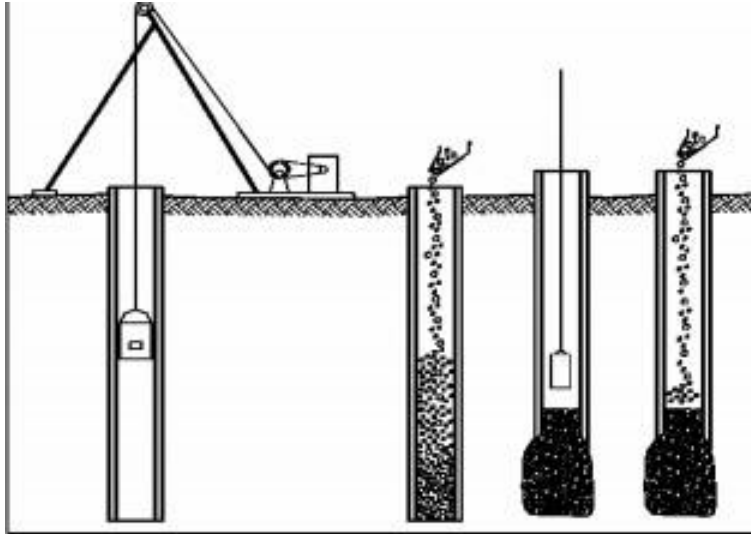


Figura 4 - Esquema típico de vibrosustitución Fuente: Construcción Geotécnica [7]

Al no ser totalmente rígidas, las columnas de piedra tienden a experimentar cierta deformación lateral cuando se aplican cargas, transmitiendo presiones laterales al suelo que las circunda. Tiene como limitante su costo que puede ser elevado. [8] La zona de influencia del drenaje por los drenes es limitada aproximadamente a un diámetro desde el centro de los drenes. La grava debe ser bien gradada para prevenir la obstrucción de los poros y para que se tenga drenaje eficiente. [8]

VIBROHINCADO

Utiliza un martillo vibratorio con un elemento metálico columnar que se va introduciendo verticalmente en cada sitio prefijado, siguiendo un patrón establecido (Figura 5). El método es aplicable en suelos granulares y saturados con tamaños comprendidos entre 7,5 cm. (3") y la malla 40, con contenido de finos menor de 25%. Se recomienda no emplear este método en depósitos de arenas gruesas y grava con coeficiente de permeabilidad, $k > 10^{-2}$ m/s). [2]

En caso necesario puede añadirse agua para garantizar la saturación. Las vibraciones transmitidas al elemento columnar son básicamente verticales, por lo que el hincado se realiza normalmente sin ayuda de chiflones de agua. Al terminar de densificar una zona, la superficie del terreno desciende y para restituir el nivel debe agregarse nuevo material o bien puede colocarse previamente antes de efectuar el tratamiento del terreno.[2] No se requiere agregar simultáneamente el material que ocupe el espacio extra ganado, ya que esto puede realizarse antes o después del tratamiento.

En suelos parcialmente saturados el reacomodo de las partículas se dificulta. A mayor contenido de finos la eficiencia del método se reduce; así, para suelos con contenido de finos mayor de 20%, el mejoramiento que se obtiene es muy pobre. Además, en suelos con compacidad mayor del 70% es difícil obtener un mejoramiento y en depósitos de arena que contengan lentes de limo o arcilla se disminuye el efecto de densificación. [2]



Figura 5 - Esquema de vibro sustitución. Fuente: Geotecnia y Cimentaciones [6]

3.3.3 Inyección de Compactación

Consiste en la inyección a presión de una mezcla de cemento de alta consistencia y arena, formando bulbos de mortero que comprimen, desplazan y compactan el suelo (Figura 6). Las bombas y equipos a emplear son clave dada la poca trabajabilidad de la mezcla empleada. Los equipos utilizados cuentan con registro de los parámetros de inyección. [2] El proceso de inyección se rige por el volumen de mortero por fase, el caudal, la presión de inyección y la viscosidad del mortero. Algunas limitantes del método son:

- a) el volumen de inyección es variable, por lo que se tienen que realizar pruebas previas,
- b) la longitud máxima del tramo de tratamiento puede ser un impedimento para su uso en suelos y
- c) cuando la inyección se realiza en presencia de aguas subterráneas circulando, puede existir una excesiva dilución o pérdida total de lechada.

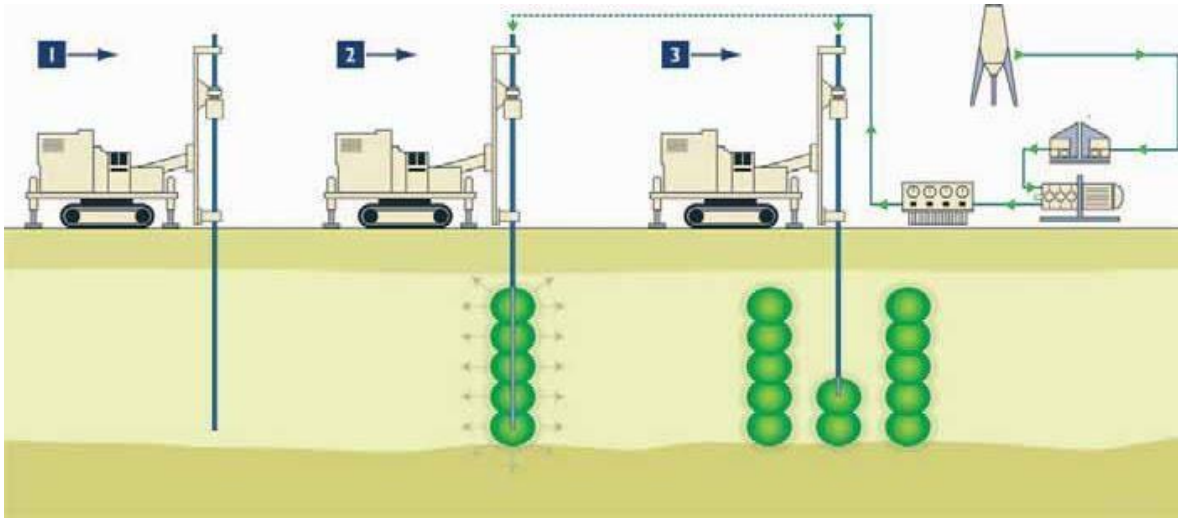


Figura 6 - Esquema de inyección de compactación. Fuente: Micropilotes General [9]

3.3.4 Inclusiones Rígidas.

Es una técnica que permite controlar los hundimientos en suelos blandos debido al peso de las estructuras y de los abatimientos piezométricos. Son elementos cilíndricos no conectados con la estructura, que pueden incluirse en el suelo recurriendo a diferentes técnicas. [10]

Sus ventajas son la disminución de los asentamientos debido a la transferencia de una parte importante de los esfuerzos soportados por el suelo a estos elementos, la facilidad de colocación y la mínima interacción con la estructura. La limitante que presenta es la complejidad para evaluar la interacción inclusión-suelo. [10]

La Figura 7 muestra un ejemplo de inclusiones rígidas.

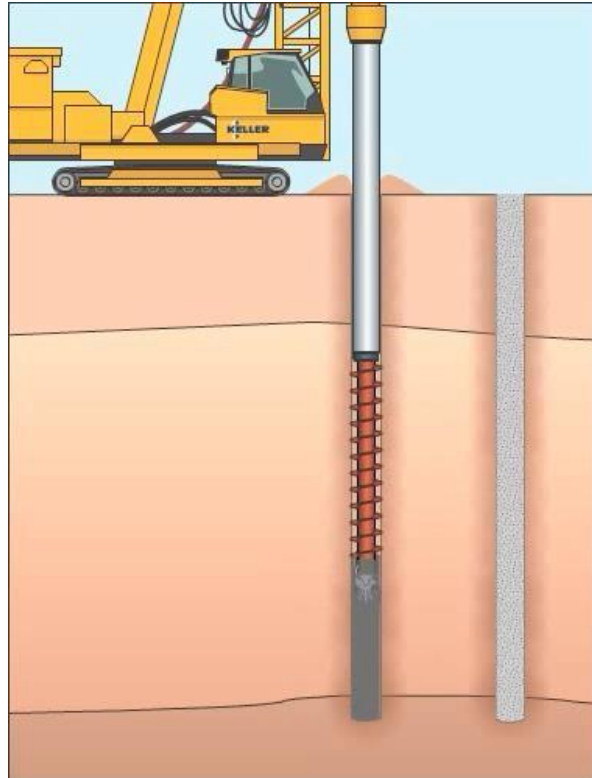


Figura 7 - Inclusiones rígidas. Fuente: “Construcción Geotécnica” [7]

Jet Grouting

El procedimiento consiste en cortar, excavar y mezclar, el material “in situ”, a través de energía hidráulica a alta velocidad y reemplazarlo por una mezcla de suelo – cemento (Figura 8). Es adecuado para un rango amplio de suelos desde aglomerados hasta arcillas de alta plasticidad. [8]

Sin embargo, cuando se incrementa la resistencia del suelo, la profundidad de penetración disminuye y a mayor permeabilidad del mismo aumenta la profundidad de penetración. [8] Por lo anterior, el tiempo requerido para la máxima penetración es mayor en suelos cohesivos.

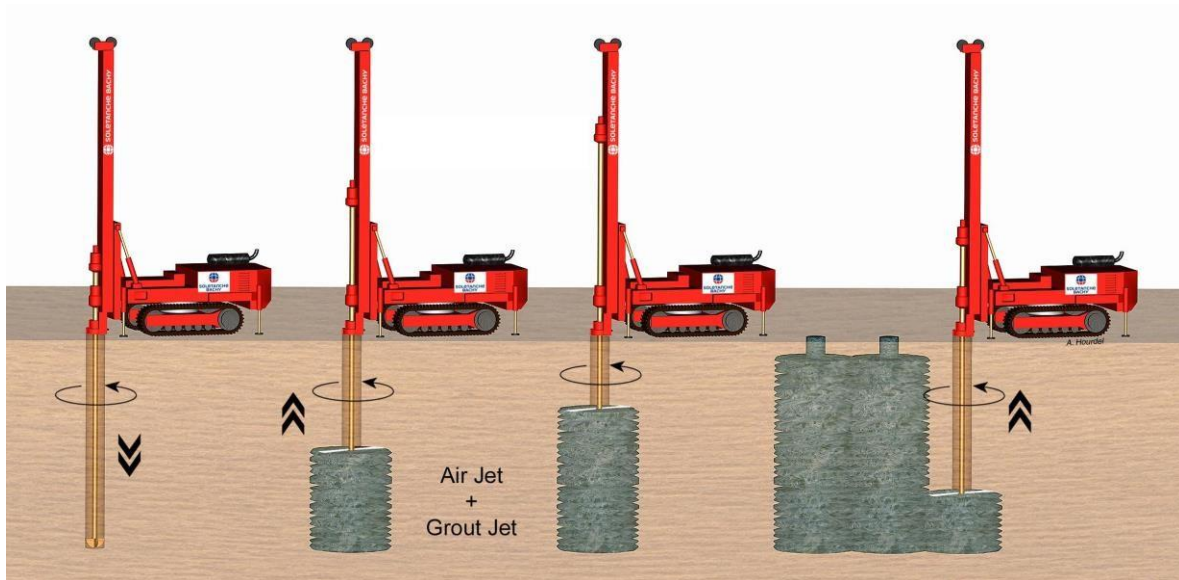


Figura 8 - Procedimiento del Jet-grouting. Fuente: BACHY-SOLETANCHE [8]

El volumen de suelo afectado es mayor que el diámetro de la perforación y se incrementa al aumentar el tamaño de partículas. En arcillas, limos y arenas con finos, la profundidad de penetración máxima se alcanza con una saturación del 100% y la penetración mínima con un grado de saturación de 40 a 50%. [8].

3.3.5 Compactación Dinámica.

La compactación dinámica es una técnica cuyo fin es mejorar las propiedades mecánicas del suelo mediante impactos de alta energía causados por la caída de pesos de 10 a 35 toneladas. Esta técnica fue inventada por Louis Menard a finales de los años 60. [11]

El principio básico de la técnica de compactación dinámica consiste en la transmisión de ondas de compresión y de corte de muy alta energía con el fin de mejorar las propiedades mecánicas e incrementar la capacidad de carga y cortante del suelo, siendo empleada generalmente en suelos granulares. Para aplicaciones de gran tamaño, se usan grúas hasta de 120 toneladas de capacidad y una altura de caída de 10 a 30 m con el fin de aumentar el espesor tratado.[11]

La Figura 9 muestra el procedimiento típico de aplicación de la técnica.

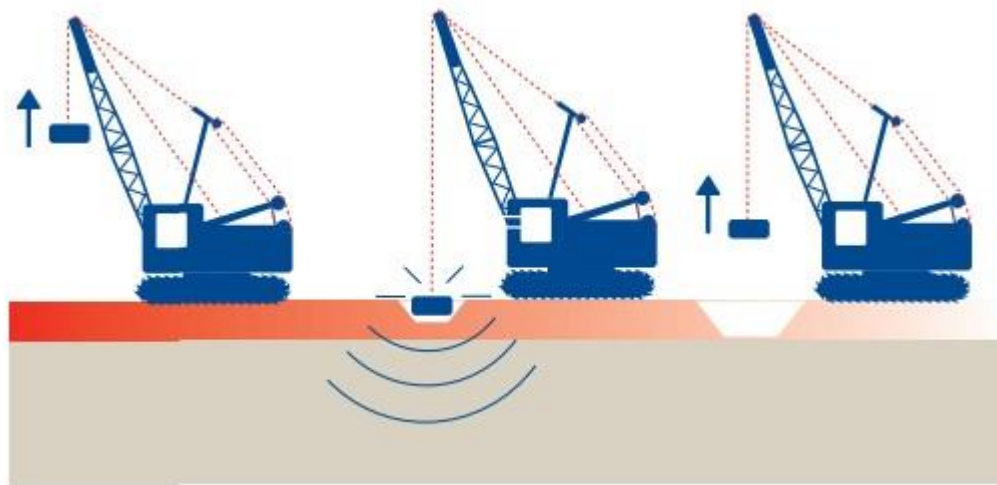


Figura 9 - Procedimiento del ensayo. Fuente: “International Symposium: Rigid Inclusions in Difficult Soft Soil Conditions” [11]

Durante y después de los impactos, se producen los siguientes fenómenos dentro del suelo (Figura 10):

- Aplicación de energía: esto ocurre inmediatamente con cada impacto y se acumula de acuerdo a la masa empleada en los golpes
- Deformación en el suelo: con cada golpe se genera una reducción inmediata de la relación de vacíos del suelo y por consiguiente un asentamiento inmediato
- Licuación del suelo: en algunos casos, se puede generar un aumento en la presión de poros en suelos saturados y causar licuación local del suelo. Después de esto, la presión elevada de poros se disipa y el suelo se reestructura a un estado más compacto aumentando su resistencia al corte

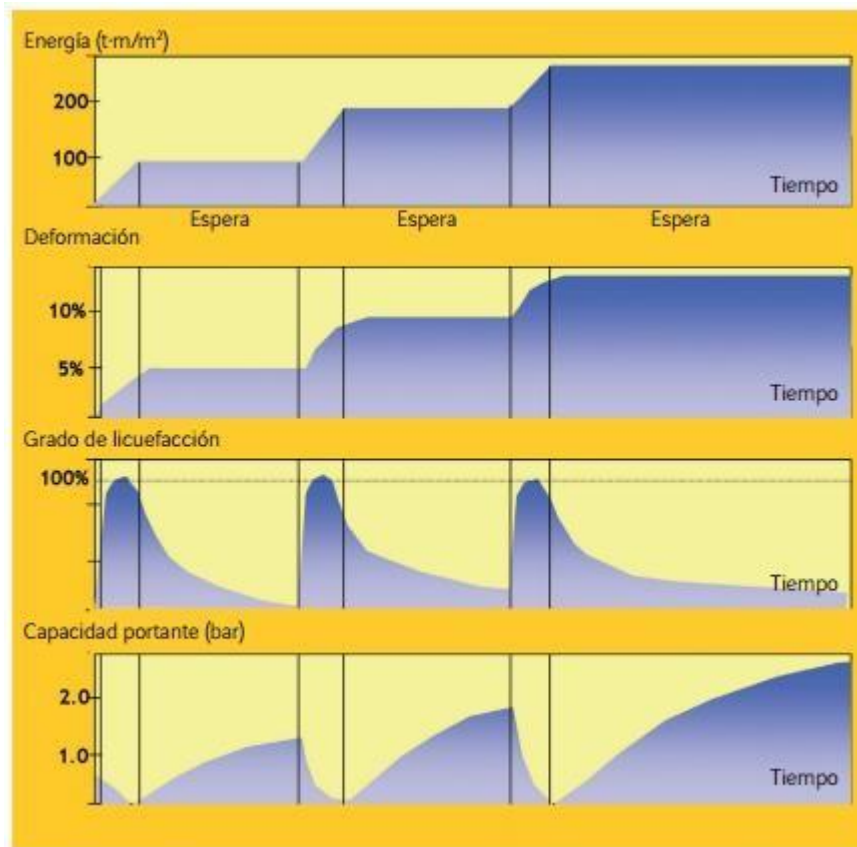


Figura 10 - Efectos de la compactación dinámica en el suelo.

Fuente: International Symposium: Rigid Inclusions in Difficult Soft Soil Conditions” [11]

Típicamente, la compactación dinámica se usa para mejorar los siguientes tipos de suelo [12]

- Suelos naturales sueltos como depósitos aluviales
- Rellenos hidráulicos
- Rellenos sanitarios
- Escombros de construcción
- Desperdicios mineros
- Rellenos arcillosos parcialmente saturados sobre el nivel freático
- Suelos colapsables
- Formaciones con grandes vacíos
- Arenas o limos sueltos para reducir potencial de licuación

Para la evaluación de un proyecto de compactación dinámica, [12] recomienda seguir los siguientes pasos:

- 1 **EVALUAR EL TIPO DE SUELO:** propiedades, capas y espesor del suelo blando. Esto se determina por perforaciones, apiques, ensayos CPT o geofísica. De acuerdo a los resultados de la investigación geotécnica, el depósito se califica como favorable, no favorable o intermedio para compactación dinámica
- 2 **EVALUAR LAS RESTRICCIONES DEL SITIO:** debe evaluarse si las vibraciones y deformaciones laterales a producirse con la compactación dinámica pueden tener algún efecto negativo en propiedades vecinas. Esto es particularmente importante en sitios donde puentes o edificios se encuentren próximos al sitio a mejorar.
- 3 **DETERMINAR REQUERIMIENTOS DE DISEÑO:** si el proyecto desea una reducción en asentamientos, las deformaciones antes y después de la compactación dinámica deben evaluarse y compararse con los asentamientos máximos tolerables por la estructura a construir.
- 4 **ESIMAR COSTOS:** un cálculo preliminar de costos de la compactación dinámica debe hacerse. El costo es necesario para comparar con otras alternativas de mejoramiento.

El procedimiento de compactación dinámica es generalmente llevado a cabo en tres fases:

- Compactación profunda con pesos y alturas de caída grandes, □
Compactación de capas intermedias
- Compactación de capas superficiales.

Estas fases se muestran en la Figura 11. De acuerdo a las características del suelo a compactar, la tercera fase puede ser realizada con pesos menores o con equipo de compactación superficial, como compactadoras de rodillo vibratorio. [11]

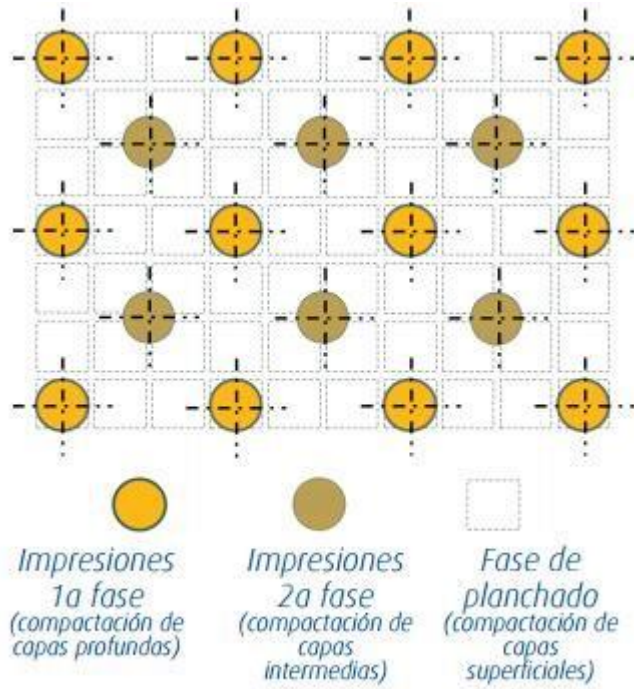


Figura 11 – Fases de compactación dinámica. Fuente: International Symposium: Rigid Inclusions in Difficult Soft Soil Conditions” [11]

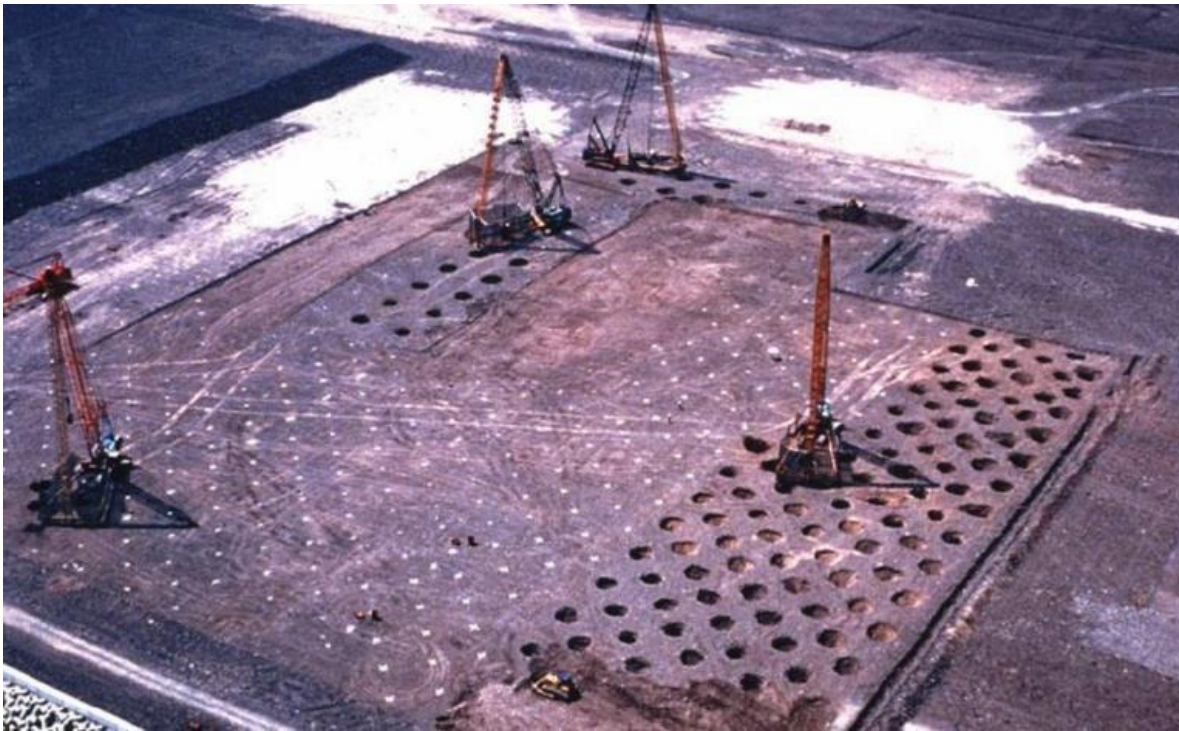


Figura 12 - Aplicación típica de impactos. Fuente: Geotecnología SAS [13]

Durante la compactación dinámica, los suelos se densifican al contenido de humedad natural del suelo. En muchos casos, los suelos a densificar se encuentran saturados. Para que la compactación sea eficiente, el depósito de suelo debe ser relativamente permeable para que el exceso de presión de poros generado durante los impactos se pueda disipar relativamente rápido, permitiendo que las partículas de suelo se muevan o reacomoden a un estado más denso de configuración.[12] La

Figura 13 muestra los rangos de partículas de suelo a los cuales se recomienda aplicar esta metodología.

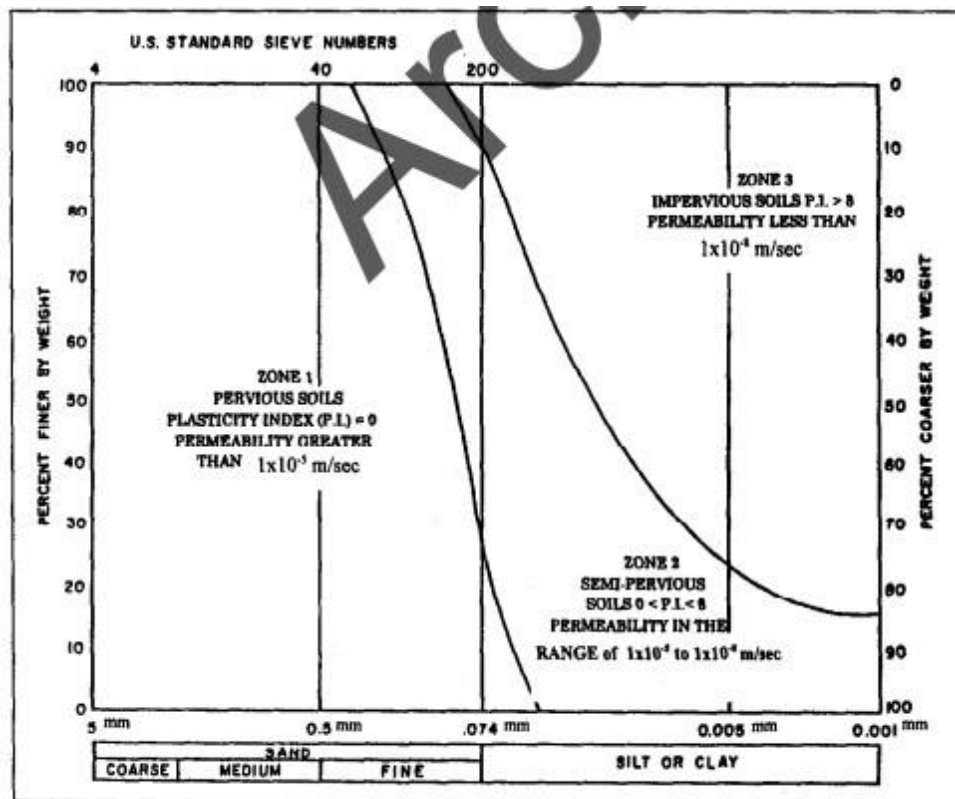


Figure 5. Grouping of soils for dynamic compaction.⁽³²⁾

Figura 13 - Recomendaciones de suelos mejorables con compactación dinámica. Fuente: Federal Highway Administration "Dynamic Compaction" [12]

En casos donde se requiera la compactación en suelos impermeables (permeabilidad menor a 10^{-7} m/s), esta técnica es utilizable, siempre y cuando se instalen drenes verticales y permita suficiente tiempo entre fases de impacto para que la presión de poros se logre disipar.

Es importante destacar que para la investigación en curso tras la exploración en campo no se encontró el nivel freático.

Con los golpes de la compactación dinámica, se producirán desplazamientos laterales en el suelo. La información revisada para la elaboración de este trabajo de grado no permitió encontrar un procedimiento de estimación de esta deformación. Los estudios del FHWA para la elaboración del manual de compactación dinámica en 1995 midieron mediante inclinómetros instalados a diferentes distancias del punto de aplicación valores de hasta 400 mm de desplazamiento lateral a una distancia de 3 m del punto de aplicación, y 76 mm a una distancia de 6 m de la aplicación de la carga (Figura 14).[12] Esto indica que los desplazamientos laterales pueden afectar ductos enterrados vías, cimentaciones profundas y hasta taludes que se encuentren cerca del sitio del mejoramiento.

En el terreno donde se realizó el ensayo de compactación dinámica se presenta un talud de 12 metros de altura y 50 metros de longitud aproximadamente, este talud no se vio afectado una vez terminado los estudios en el terreno vecino. [12]

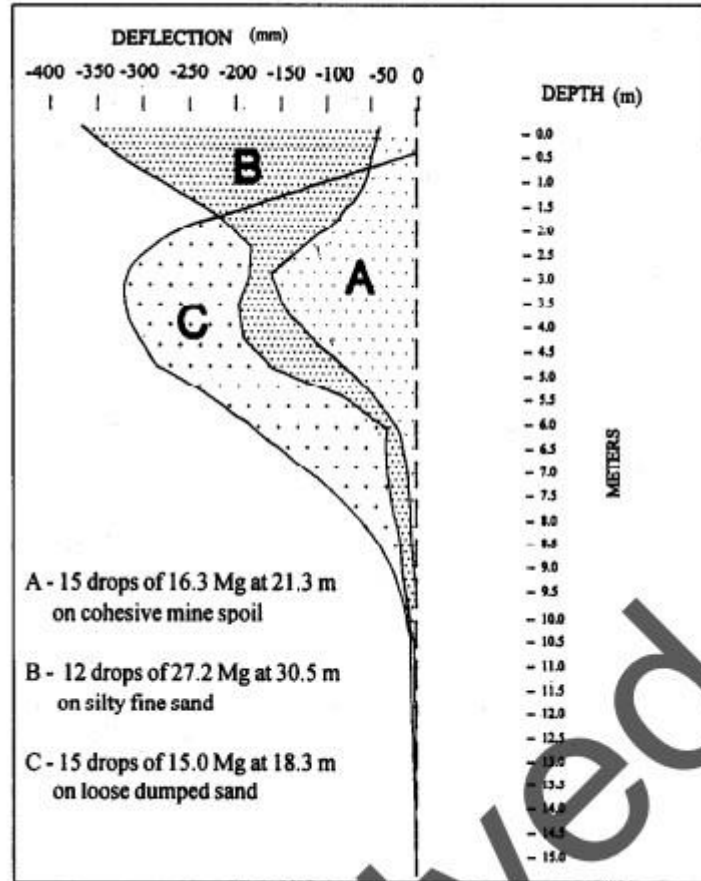


Figure 8. Lateral movements 3 m from drop point.⁽³²⁾

Figura 14 - Desplazamientos laterales medidos por FHWA Fuente: Federal Highway Administration (FHWA), 1995, "Dynamic Compaction"[12]

4. METODOLOGIA DEL PROYECTO DE GRADO.

La metodología usada en la elaboración de esta investigación consistió en las siguientes actividades:

- Selección del sitio de ensayo
- Caracterización geotécnica del sitio antes del ensayo
- Diseño y ejecución del ensayo
- Caracterización geotécnica post-ensayo
- Análisis de resultados

4.1. SELECCIÓN DEL SITIO

El sitio seleccionado es un lote ubicado en el Km 6 Ruitoque Bajo-Villa Nancy, la vereda la Hormiga del municipio Girón (Figura 15), sobre un área plana.



Figura 15 – Ubicación general del sitio de estudio. Fuente: Imagen tomada de Google Earth.

El sitio fue seleccionado de acuerdo a los siguientes criterios:

- Se necesitaba un sitio de fácil acceso; para los equipos de compactación (área, espacio para su desplazamiento)
- El área libre de obstáculos disponible para la ejecución del ensayo debería ser de por lo menos 1,000 m²
- Debe permitir acceso de equipo y materiales
- Debe tener suelos sueltos o blandos superficiales que permitan mostrar los resultados de la compactación dinámica

4.2. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA DEL SITIO DE ENSAYO

Según la zonificación geotécnica del sitio realizada por INGEOMINAS (2001), el sitio de estudio se encuentra ubicado sobre suelos de la formación Órganos en la Zona 4B, la cual corresponde al “Miembro Órganos Afectado por Procesos Erosivos” (Figura 16).

De acuerdo a la información de la zonificación geotécnica, los suelos que caracterizan la zona son de tipo limo-arenoso con gravas y cantos aluviales típicos de flujos aluviotorrenciales de la formación Órganos. En el sitio de estudio se observó poca presencia de gravas y cantos, con presencia de las unidades finas de esta formación.

Morfológicamente, el sitio de estudio se encuentra sobre una ladera de pendiente suave, la cual fue cortada aproximadamente 10 m para generar una plataforma plana donde se proyecta construir una cancha.

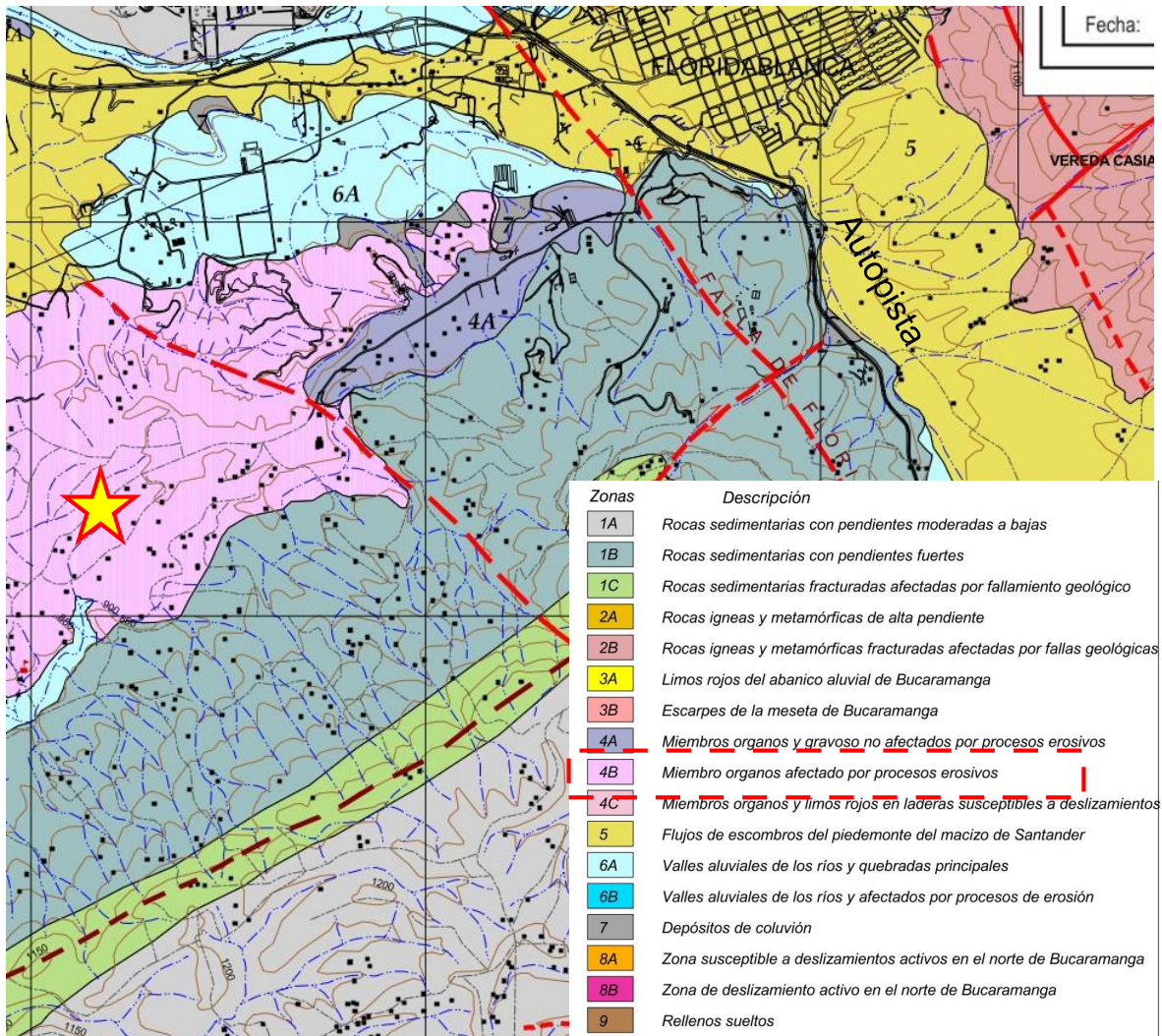


Figura 16 – Localización del área de estudio en la microzonificación sísmica.
Fuente: INGEOMINAS (2001) [14]

La Figura 17 y Figura 18 muestran las características del área de trabajo, el corte, el suelo que aflora y las características principales del sitio del ensayo.



Figura 17 – Vista del talud en corte y plataforma de trabajo

Sobre el corte se observa un contacto entre un estrato superior de arena arcillosa o limosa con gravas finas a medias, subyacido por un estrato areno arcilloso con menor presencia de gravas.

Sobre la plataforma de trabajo se encontraron materiales sueltos y secos de ambas formaciones, posiblemente estos son provenientes del corte y fueron dejados sobre la superficie sin compactación alguna.



Figura 18 – Vista aérea del área de trabajo

4.3. ENSAYOS DE CAMPO PRE- COMPACTACION

La caracterización geotécnica superficial del sitio se realizó mediante las siguientes actividades:

- Apiques manuales: se realizaron 2 apiques a 0,7 m de profundidad, donde se elaboraron registros del perfil de suelo y tomaron muestras alteradas para ensayos de laboratorio. La Figura 19 y Figura 20 muestran los sitios de los apiques realizados.

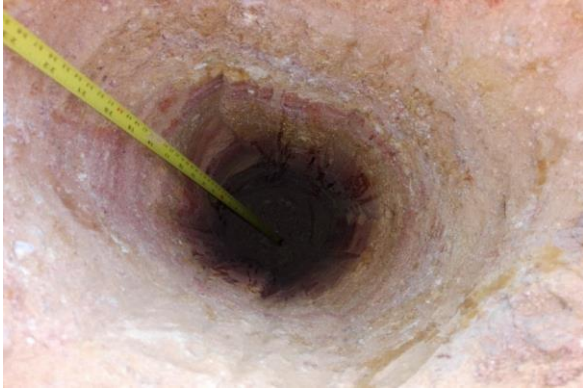


Figura 19 – Realización Apique 1



Figura 20 – Realización Apique 2





Figura 21 – Muestras tomadas en Apique 1

- De los apiques se obtuvieron los siguientes perfiles (Figura 22 y Figura 23):
- 0 a 0.06 m: Arena pobremente grada con limo, color amarillo con pintas blancas, humedad baja, consistencia blanda.
 - 0.06 a 0.24 m: Arena pobremente grada con limo, de grano medio, con colores amarillos, rojizos y blancos. Consistencia media, humedad baja.
 - 0.24 a 0.36 m: Arena limosa, color rojizo, consistencia media, humedad baja.
 - 0.36 a 0.57 m: Arena arcillosa, Humedad media, consistencia medaalta, color rojo con pintas amarillas y blancas.
 - 0.57 a 0.68 m: Arena arcillosa color habano con pintas blancas, humedad media, consistencia media-alta, con presencia de gravas.
 - Muestra superficial 1: Arena arcillosa, color amarilloso.
 - Muestra superficial 2: Arena arcillosa color habano con pintas oscuras
 - Muestra superficial 3: Limo arenoso color habano, con pintas negras y amarillas.

LOCALIZACION	Vereda L a Hormiga Giron S/der
NUMERO APIQUE	1 (Plataforma)
FECHA	27/01/2017

Prof. (m)		Clasificación	Descripción del Material	Límites			Granulometría			Humedad (%)
De	Hasta			SUCS	LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gravas (%)	Arenas (%)	
0	0,06	SP-SM	Arena pobremente grada con limo , color amarillo con pintas blancas, humedad baja, consistencia blanda	30,49	16,14	14,35	5,1	87,13	7,78	9,61
0,06	0,24	SP-SM	Arena pobremente grada con limo, de grano medio, con colores amarillos, rojizos y blancos. Consistencia media, humedad baja.	35,14	10,19	24,95	5,15	87,71	7,15	8,76
0,24	0,36	SM	Arena limosa, color rojizo, consistencia media, humedad baja.	43,29	29,33	13,96	5,29	74,56	20,15	15,81
0,36	0,57	SC	Arena arcillosa, Humedad media, consistencia medaalta, color rojo con pintas amarillas y blancas.	40,91	15,54	25,37	1,9	64,11	33,99	14,54
0,57	0,68	SC	Arena arcillosa color abano con pintas blancas, humedad media, consistencia media-alta, con presencia de gravas.	35,83	20,61	15,22	3,43	51,61	44,95	15,82

Figura 22 – Registró Apique 1

LOCALIZACION	Vereda L a Hormiga Giron S/der
ubicación	talud
FECHA	27/01/2017

Clasificación	Descripción del Material	Limites			Granulometría			Humedad (%)
		LL (%)	LP (%)	IP (%)	Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)	
SC	Arena arcillosa, color amarilloso.	31,29	10,59	20,70	5,3	77,28	17,42	4,01
SC	Arena arcillosa color habano con pintas oscuras	29,14	20,16	8,98	28,55	46,69	24,76	2,36
ML	Limo arenoso color habano, con pintas negras y amarillas.	38,02	30,15	7,87	0,18	30,12	69,7	4,41

Figura 23 – Registró Apique 2

Se realizaron ensayos de cono de arena (NORMA INV E-161-07) para conocer la densidad y humedad de campo en varios puntos antes de la compactación dinámica. La Tabla 1 muestra los resultados de estos ensayos.

Tabla 1 - Ensayos cono de arena

MUESTRA	Prof. (m)	Densidad Húmeda (g/cm ³)	Humedad (%)	Densidad Seca (g/cm ³)
1	0,2	1,363	5,078	1,297
2	0,3	1,665	5,670	1,576
3	0,4	1,680	8,302	1,551

Tabla 2- **Ensayos proctor modificado**

Muestra	Prof. (m)	SUCS	Humedad Óptima (%)	Densidad Seca Max (g/cm ³)
1	0,06	SP-SM	9.0	2.09
2	0,24	SP-SM	10.50	2.06
3	0,36	SM	8.70	2.06
4	0,57	SC	7.50	1.97
5	0,68	SC	12.20	2.01

Las densidades fueron tomadas superficialmente, entre 0,2 y 04 m de profundidad respecto al terreno natural. Las densidades tienen un valor promedio de 1,475 gr/cm³ con una humedad natural promedio de 6,35%.

La Figura 24 muestra la elaboración del ensayo cono de arena en campo.



Figura 24 – Ensayos de cono de arena, condiciones pre-compactación

Adicionalmente, se realizaron seis ensayos de Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC, NORMA INV E – 172-07) realizados en el área a ensayar (Figura 25). Estos alcanzaron una profundidad máxima entre 600 y 800 mm y fueron realizados con equipo PDC tipo INVIAS propiedad de la UPB. La tabla 3 resume las características de los ensayos.



Figura 25 – Ensayos de PDC, condiciones pre-compactación

Tabla 3 - Resumen ensayos PDC

Ensayo No.	INVIAS / ASTM	Profundidad máxima (m)
PDC-1	INVE 172	0,57
PDC-2		0,50
PDC-3		0,55
PDC-4		0,58
PDC-5		0,54
PDC-6		0,67

La Figura 26 muestra un resumen de los seis ensayos PDC realizados en condiciones pre-compactación. De estos ensayos se puede observar que la penetración en mm/golpe varía entre 10 y 20 en los primeros 10 cm de profundidad en el perfil analizado, para luego mejorar a valores entre 5 y 15 mm/golpe entre 10 y 60 cm de profundidad.

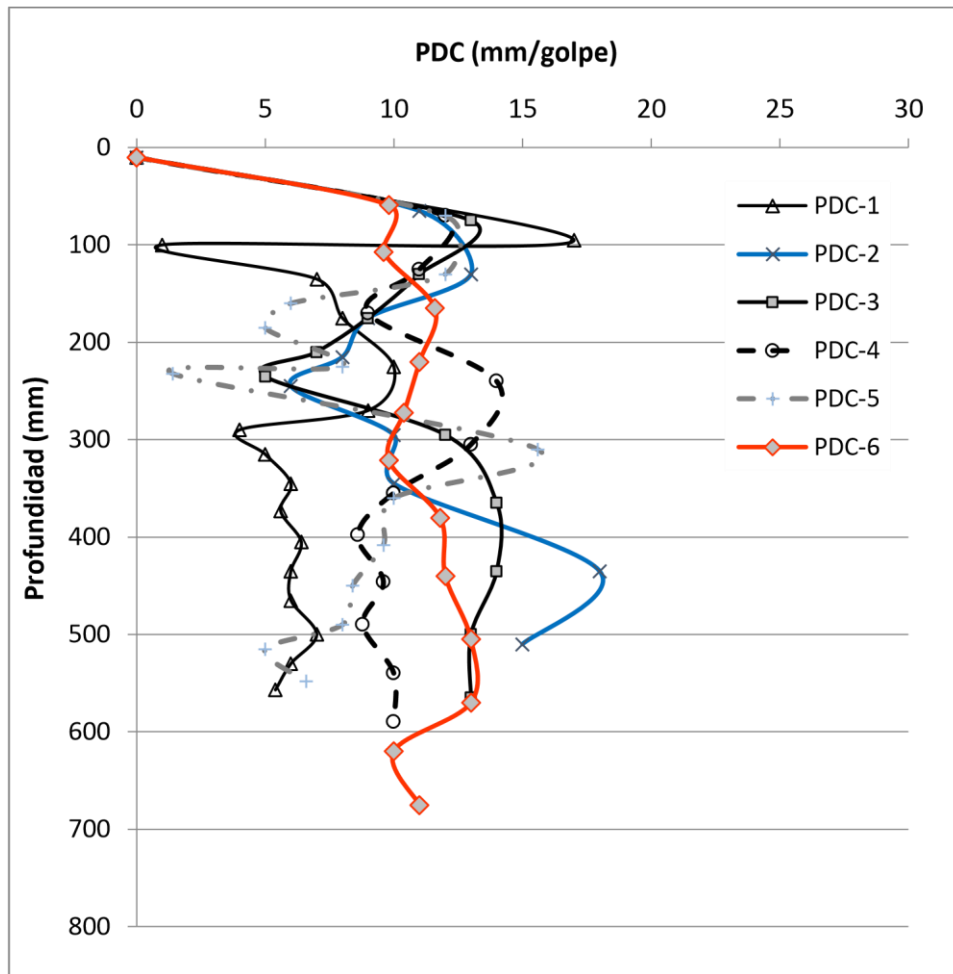


Figura 26 - Resumen ensayos PDC en condiciones pre-compactación. Fuente: Elaboración propia.

El PDC es una herramienta útil para caracterizar condiciones geotécnicas de subrasante para diseño de pavimentos. De este ensayo se puede correlacionar el valor de California Bearing Ratio (CBR) de acuerdo a la siguiente fórmula (INVIAS, 2013).

$$CBR = \frac{292}{(PDC)^{1.12}}$$

El valor de CBR correlacionado para los ensayos se muestra en la Figura 27. Se puede observar que los PDCs, tienen un comportamiento variable en los primeros 30 cm de suelo y toman un valor promedio entre 5 y 10 mm/golpe por debajo de esta profundidad. La variación en la capa superficial puede deberse a alteración durante la excavación de la plataforma, desecación y cambios en humedad por ciclos de lluvia-sequía.

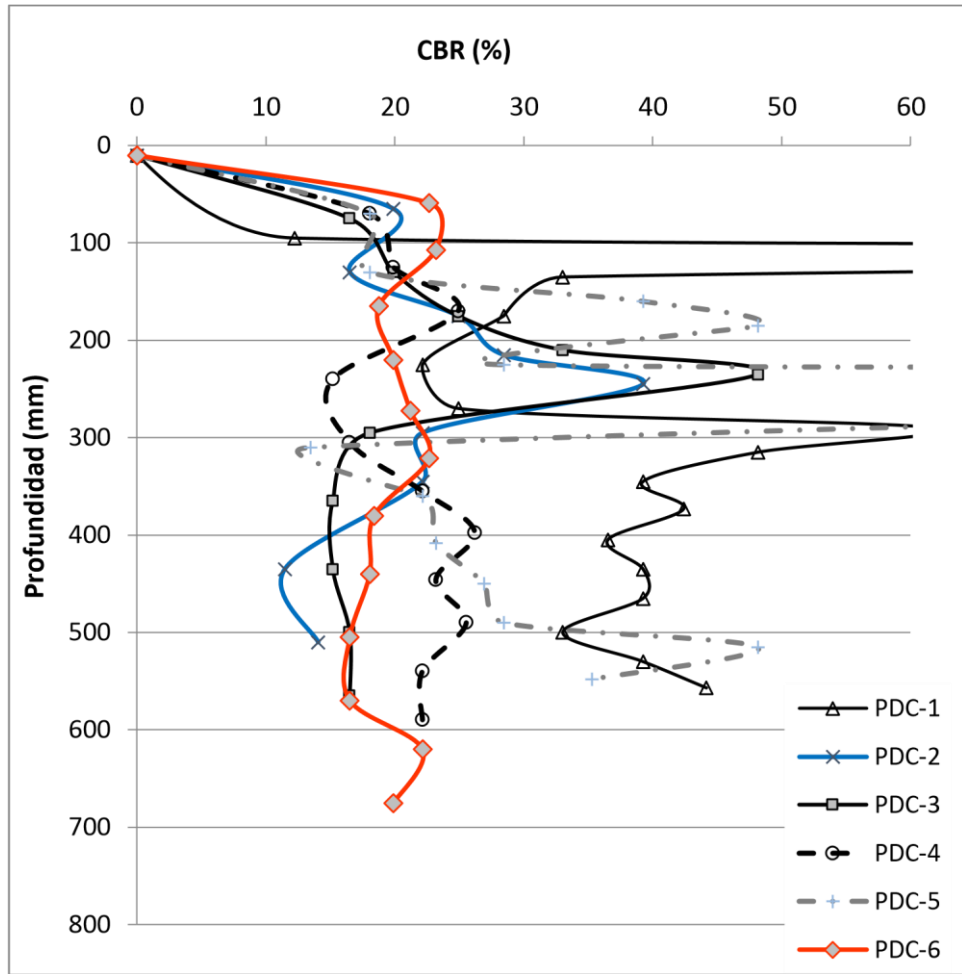


Figura 27 - CBR correlacionado de los PDCs en el sitio de ensayo, condiciones pre-compactación

El Anexo A presenta en detalle los ensayos de campo realizados en condiciones pre-compactación dinámica.

A continuación se muestra el plano en planta donde se visualiza el terreno a compactar y los puntos donde se realizaron los ensayos de PDC y cono y arena para determinar la densidad del suelo en campo.

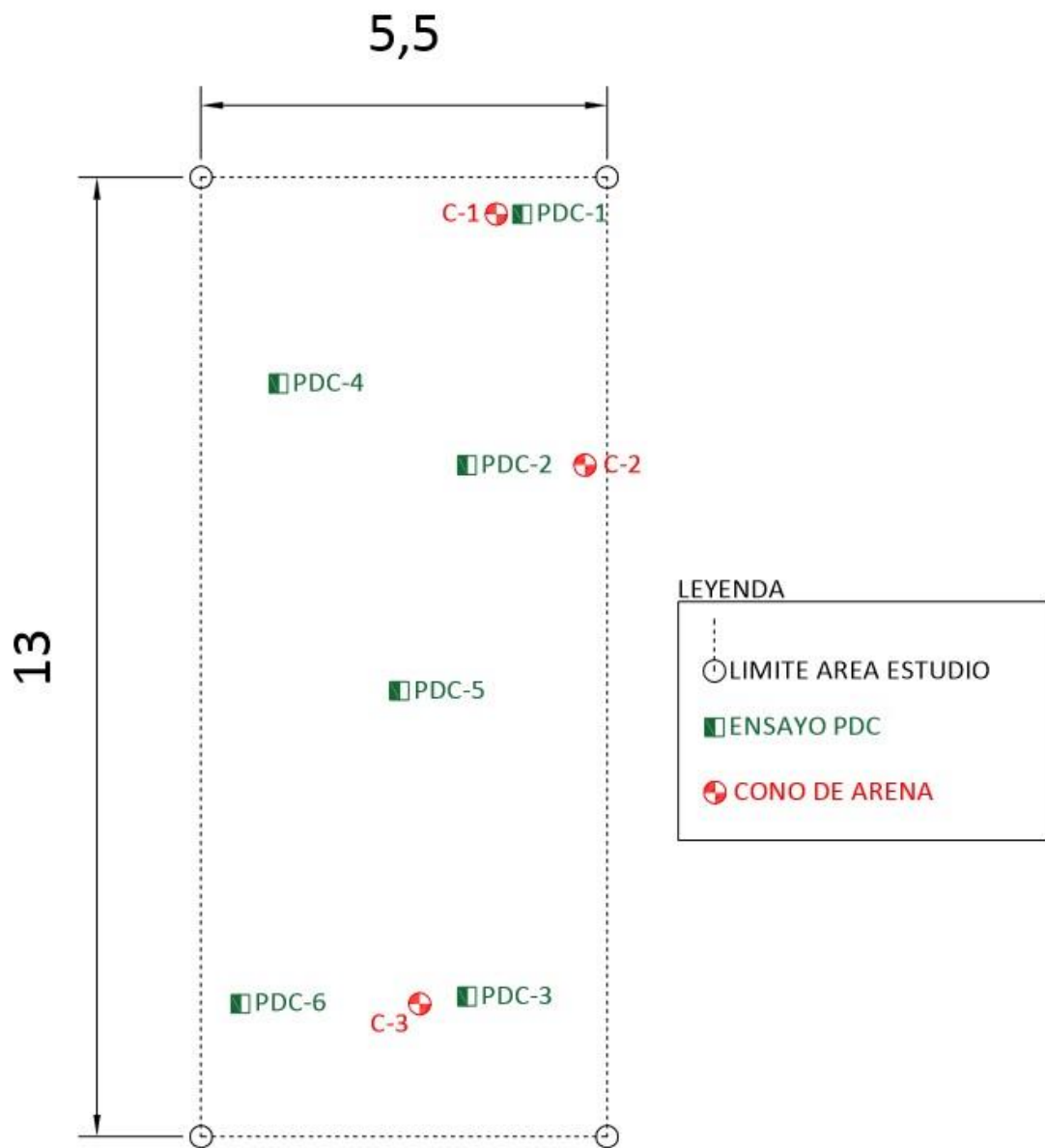


Figura 28 - Planta del área de ensayo y localización de pruebas de campo

Se seleccionaron estas ubicaciones de ensayos para repartir las pruebas de manera relativamente uniforme en el área a compactar.

4.4. ENSAYOS DE LABORATORIO PRE-COMPACTACIÓN

La Tabla 2 muestra los ensayos de laboratorio realizados en condiciones previas a la compactación dinámica.

Tabla 2 - Ensayos realizados de laboratorio pre-compactación

Ensayo	INVIAS	Número de Ensayos
Humedad Natural	NORMA INV E-122-07	5
Granulometría	NORMA INV E -123-07	5
Límite líquido	NORMA INV E- 125-07	5
Límite plástico	NORMA INV E-126-07	5
Proctor modificado	NORMA INV E 142-07	5
Compresión simple	NORMA INV E 152-07	2
Peso específico	NORMA INV E-128-07	5

Los ensayos realizados se dividen en pruebas índice (humedad, granulometría, límites, humedad natural), los cuales aportan información básica de las características del suelo, pero no de su resistencia al corte. Otros ensayos realizados para evaluar las características mecánicas del suelo fueron compresiones simples. La Tabla 3 resume los resultados de estos ensayos.

Tabla 3 - Resumen de ensayos de laboratorio, condiciones pre-compactación dinámica

Muestra	Prof. (m)	SUCS	Humedad (%)	% Grava	% Arena	% Finos	LL (%)	IP (%)
1	0,06	SM	9,6	5.1	87.1	7.8	30.49	14.35
2	0,24	SM	8,8	5.15	87.71	7.15	35.14	24.95
3	0,36	SC	15,8	5.29	74.56	20.15	43.29	13.96
4	0,57	SC	14,5	1.9	64.11	33.99	40.91	25.37
5	0,68	SC	15,8	3.43	51.61	44.95	35.83	15.22
6	Superficial	SM	4,0	5.3	77.28	17.42	31.29	20.7
7	Superficial	SM	2,4	28.55	46.69	24.76	29.14	8.98
8	Superficial	ML	4,4	0.18	30.12	69.7	38.02	7.87

De acuerdo a la tabla 4, se observa que los suelos son predominantemente granulares, con contenidos de finos. Esto hace que sea posible la aplicación del método y concuerde esta clasificación con información dada por la geología.

Las granulometrías se resumen en la Figura 29. Los suelos ensayados fueron predominantemente arenosos, con contenido de finos entre 10 y 35%, con dos muestras con 45 y 70% de finos.

Gráfico de Análisis Granulométrico por Tamizado

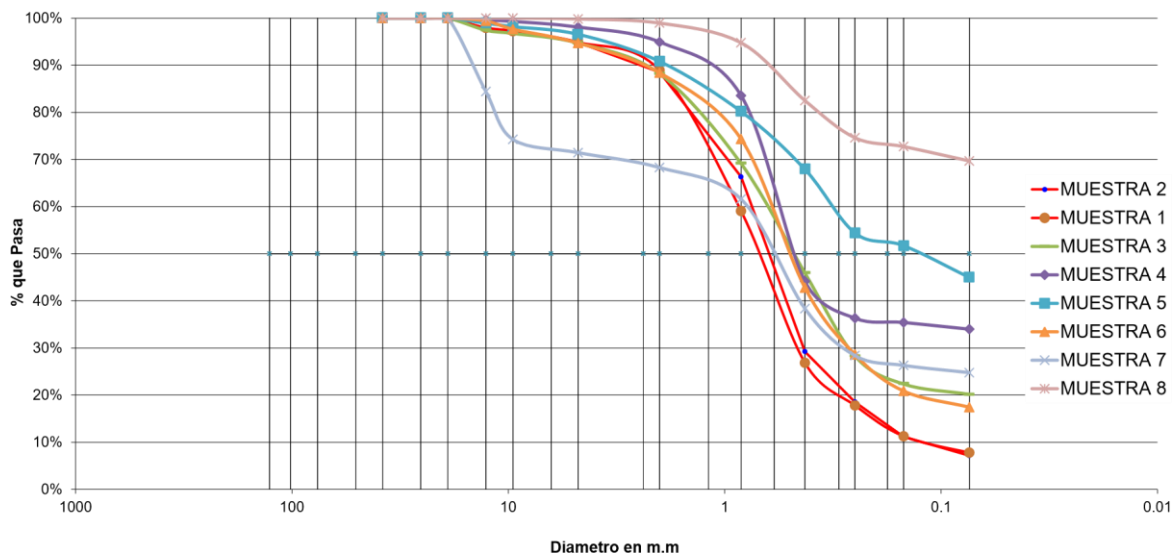


Figura 29 – Granulometrías realizadas a las muestras recolectadas en los apiques

En la figura 29 observamos la distribución granulométrica del suelo y su composición de material; arenas y finos.

Los ensayos de Proctor se muestran a continuación:

Tabla 4 - Ensayos de Proctor

Muestra	Prof. (m)	SUCS	Humedad Óptima (%)	Densidad Seca Max (g/cm ³)
1	0,06	SM	9.0	2.09
2	0,24	SM	10.50	2.06
3	0,36	SC	8.70	2.06
4	0,57	SC	7.50	1.97
5	0,68	SC	12.20	2.01

Los ensayos de límite plástico y límite líquido se muestran a continuación (Tabla 5 y Figura 30):

Tabla 5 - Resultados de límites de Atterberg

MUESTRA	LL (%)	LP (%)	IP (%)
1	30,49	16,14	14,35
2	35,14	10,19	24,95
3	43,29	29,33	13,96
4	40,91	15,54	25,37
5	35,83	20,61	15,22
6	31,29	10,59	20,70
7	29,14	20,16	8,98
8	38,02	30,15	7,87

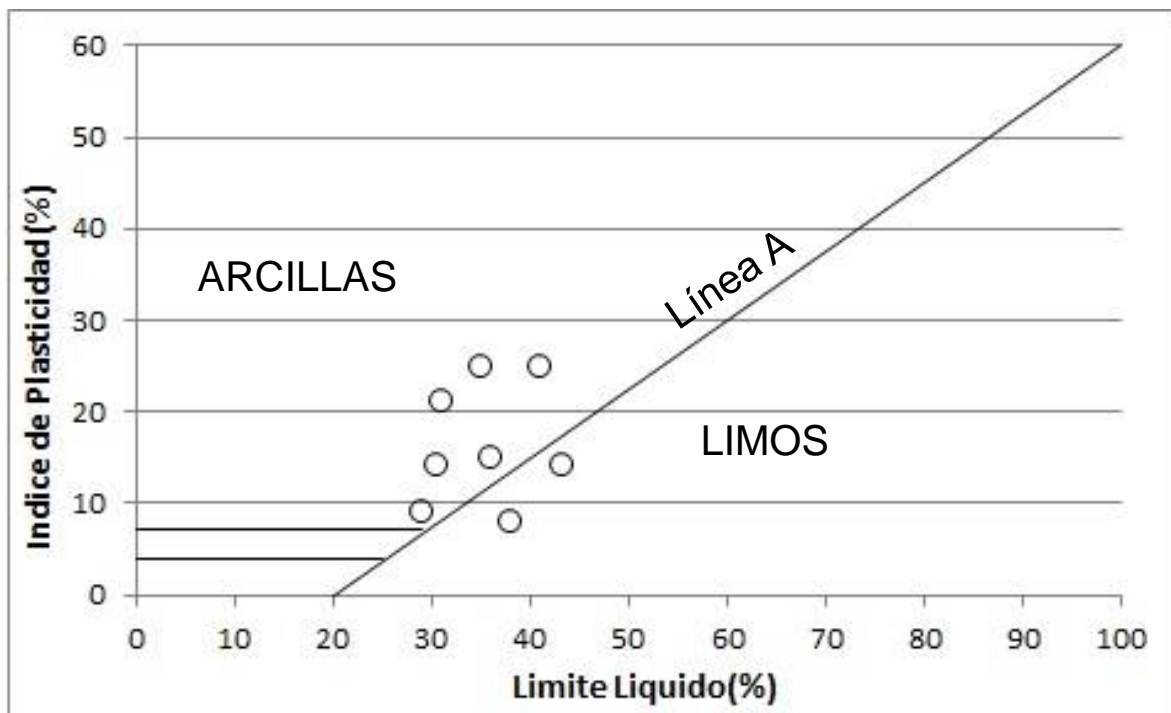


Figura 30 – Límites de Atterberg

Los resultados de ensayos de laboratorio se muestran en detalle en el Anexo C.

4.5. DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL ENSAYO DE COMPACTACIÓN DINÁMICA

Los siguientes pasos fueron seguidos para la planeación y ejecución del ensayo:

- Construcción de la masa de impacto
- Cálculo de profundidad de influencia, esfuerzos de impacto esperados

- Diseño de matriz de aplicación
- Diseño de sistema de izaje y caída
- Diseño del sistema de monitoreo y medición de resultados

4.5.1. Construcción de la Placa de Ensayo

Por facilidad de construcción y manejo, se optó por la construcción de una placa en concreto reforzado para la aplicación de los esfuerzos durante la compactación dinámica. La Figura 31 muestra el diseño de la placa de aplicación de los esfuerzos dinámicos.

La placa cuenta con dimensiones de 1 m de altura, 1 m de ancho y 0.3 m de espesor, para un volumen de 0.3 m³. Los siguientes insumos fueron empleados en la placa:

- 0.3 m³ de concreto de 3,741 psi de resistencia compresiva
- 11.952 kg de acero de refuerzo, en barras de 1/2 de pulgada distribuidas cada 19 cm en ambos sentidos. Dos parrillas de refuerzo fueron instaladas
- Un gancho de sujeción en varilla de 5/8"
- Formaleta en madera
- Acelerante tipo ZIKA L

La placa fue fundida en el sitio del ensayo de compactación dinámica por los investigadores el 6/02/2017. Se tomaron dos (2) cilindros testigo para su ensayo en laboratorio, arrojando las siguientes resistencias a la compresión:

CILINDRO	Fecha Ensayo	Días Transcurridos	Resistencia a la Compresión (psi)
1	22/02/2017	16	3751
2	22/02/2017	16	3732

Entre la fundida de la placa y el ensayo de compactación transcurrieron 10 días. La inclusión de Acelerante permitió que el concreto en la placa alcanzara una resistencia promedio de 3741 PSI, considerada aceptable para los impactos y altura esperada.

La Figura 32 y Figura 33 muestran imágenes de la construcción de la placa y ensayos de compresión, respectivamente. Los formatos de laboratorio empleados se muestran en el Anexo B.

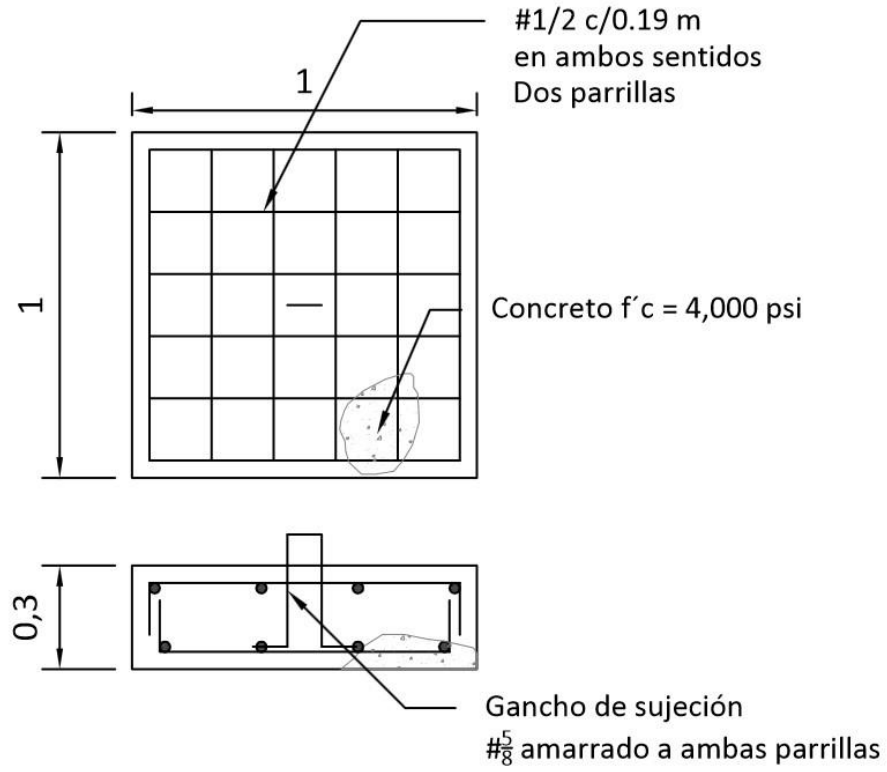


Figura 31 - Placa de aplicación de cargas dinámicas. Fuente: Elaboración Propia.



Figura 32 – Construcción de placa para impacto



Figura 33 – Ensayo de control de calidad al concreto de la placa

4.5.2. Determinación de Energía de Impacto, Altura de Caída

De acuerdo a Lukas (1994) [13] , el patrón de aplicación de golpes puede tener efectos adversos en construcciones vecinas y producir aumentos repentinos en niveles freáticos locales. Es por eso que la distribución de impactos, energía de aplicación y número de repeticiones debe ser cuidadosamente estudiada para minimizar los impactos negativos en la zona.

Para estimar la profundidad de influencia, Federal Highway Administration (FHWA) [13]

Recomienda usar la siguiente fórmula:

$$D = n * \sqrt{W * H}$$

Donde

D es la profundidad de influencia, en m

W es el peso de la masa, en toneladas H es la altura de caída en metros n es un coeficiente que varía de 0.3 a 0.6 en función del tipo de suelo ensayado.

La Tabla 6 muestra las recomendaciones del coeficiente n de acuerdo a diferentes tipos de suelo.

Tabla 6 - Valores de n. Fuente: Federal Highway Administration (FHWA) [13]

Tipo de Suelo	Estado de Saturación	Valor de n
Granular permeable (arenas, gravas)	Alta	0.5
Granular permeable (arenas, gravas)	Baja	0.5 – 0.6
Semipermeable (IP<8)	Alta	0.35 - 0.4
Semipermeable (IP<8)	Baja	0.4 – 0.5
Impermeable (IP>8)	Alta	No recomendado
Impermeable (IP>8)	Baja	0.35 – 0.4 si humedad es menor al límite plástico

El espaciamiento y número de golpes se estima con la siguiente ecuación:

$$AE = \frac{N * W * H * P}{\text{espaciamiento}^2}$$

Donde

AE es la energía aplicada (Tabla 7)

N es el número de caídas o golpes

P el número de pasadas

W es la masa del bloque usado en el ensayo

H es la caída del bloque

Para resolver esta ecuación, se selecciona un espaciamiento entre 1.5 y 2.5 veces el diámetro de la masa de impacto, se usa W y H de la ecuación de profundidad de influencia y el AE de la Tabla 2 para calcular el producto de N*P. Generalmente 15 caídas o impactos de la masa se hacen en cada punto. Si los cálculos indican valores muy superiores a 25 golpes, o menos de 7, se debe ajustar el espaciamiento de la grilla.

Tabla 7 - Energía Aplicada Fuente: Federal Highway Administration (FHWA) [13]

Tipo de suelo	Unidad de aplicación de energía (kJ/m ³)	Porcentaje de energía del proctor
Gruesos, permeables, Zona 1 de la Figura 13	200 – 250	33 – 41
Suelos finos semipermeables, Zona 3 de la Figura 13	250 – 350	41 – 60
Rellenos	600 - 1100	100 - 180
Nota: energía del proctor estándar es de 600 kJ/m ³		

Los parámetros de aplicación de carga para el ensayo se resumen a continuación:

- n se toma como 0.5 (suelos arenosos)
- W es 0.72 Toneladas (usando una densidad del concreto de 2.4 T/m³)
- H se toma como 5 m
- La resultante profundidad de influencia es de 0.95 m
- AE se toma como 200 kJ/m³
- P se toma como 2 pasadas por cada punto de compactación
- El espaciamiento se toma como 2 m entre bordes de placa
- El resultante número de impactos es de 23 por punto de aplicación. Este valor se encuentra cerca del límite recomendado de impactos por cada punto; no obstante se emplearon estos valores debido a las limitaciones económicas de una grúa para levantar una mayor altura la masa de la placa y el costo de varios días de ensayo.

Con estos valores, el ensayo consiste en la aplicación de una carga de 720 kg con una altura de caída libre superior a los 5 m, un mínimo de 23 veces en cada punto de impacto. Los puntos de impacto se encuentran separados 2 m en un patrón tresbolillo en el lote estudiado. La Figura 34 muestra el patrón de aplicación de cargas.

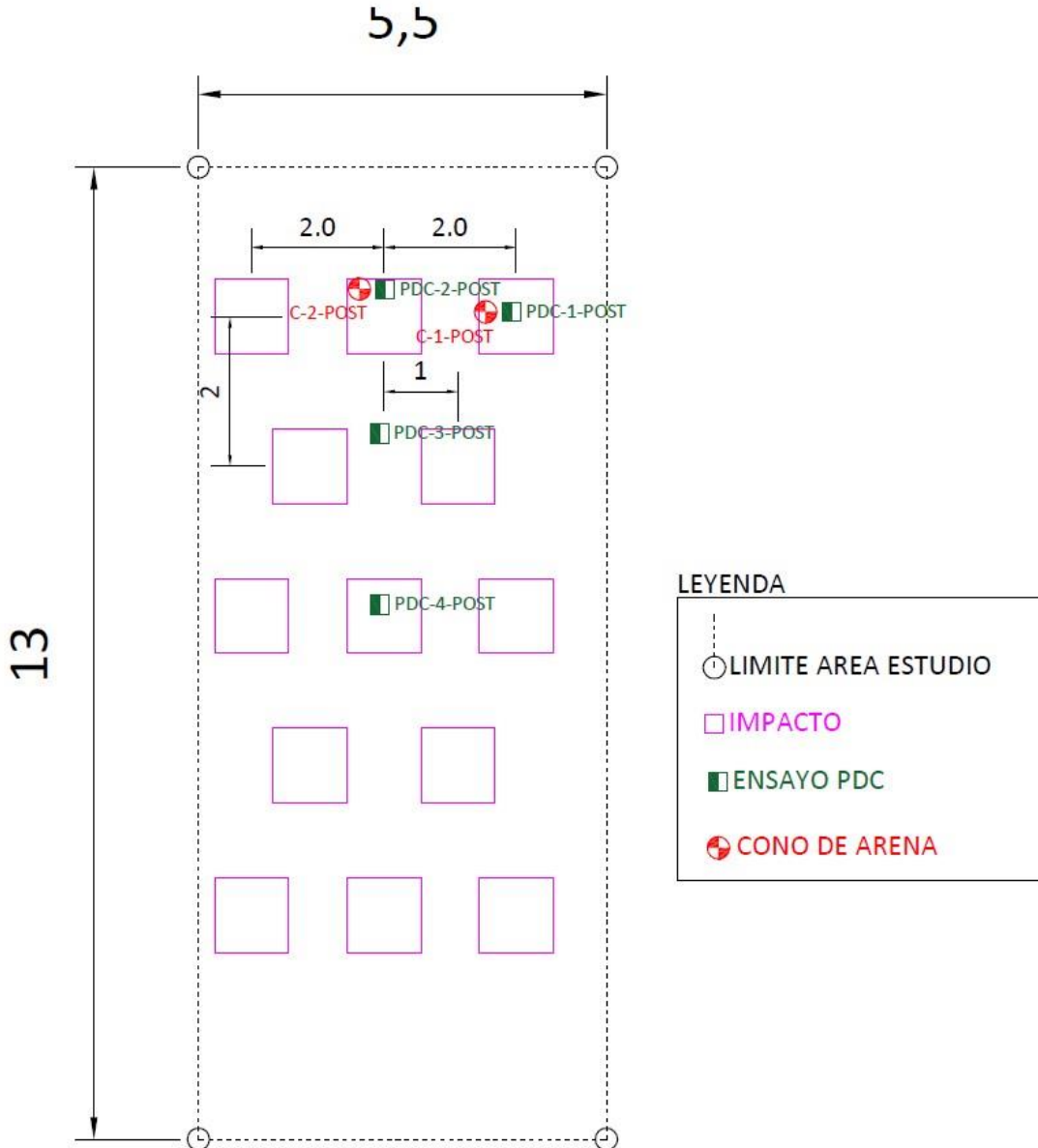


Figura 34 – Patrón de aplicación de impactos y ensayos post-compactación

La aplicación de cargas siguió un patrón en tresbolillo, con un espaciamiento de 2 m entre centros de caída de la placa. Debido al posicionamiento de la grúa el punto de impacto variaba ligeramente entre impactos pero se procuró respetar el espaciamiento diseñado. Esto puede ser debido a la forma cuadrada de la masa de impacto, la cual tendía a moverse bastante durante el izaje; con masas circulares como las observadas en la revisión bibliográfica el movimiento puede ser menor y la precisión de los impactos mayor.

De igual manera, en los puntos inferiores de la figura el número de impactos no fue el deseado, ya que las guayas empleadas en el proceso de izaje empezaron a

mostrar señales de deterioro y por ende se optó por reducir el número de impactos en esta zona.

4.6. PROCEDIMIENTO REALIZADO EL DIA DEL ENSAYO DE COMPACTACION DINAMICA

A continuación se resume el procedimiento seguido para la elaboración del ensayo de compactación dinámica:

- **ELABORACIÓN DE ENSAYOS PRE COMPACTACION:** para estimar las propiedades básicas del suelo a mejorar mediante la compactación
- **MARCACION DE LAS AREAS A IMPACTAR:** empleando cal sobre el suelo a compactar, se definieron los puntos aproximados de impacto de la masa de concreto.
- **LLEGADA DE LA GRUA AL SITIO DE ENSAYO:** la grúa empleada fue una torre-grúa propiedad de la policía nacional, desde su sede en Ruitoque Bajo cerca de la Autopista Florida-Piedecuesta. La grúa fue operada por personal de la policía, quienes idearon un sistema de poleas para permitir descolgar la masa de impacto en caída libre desde por lo menos 5 m de altura
- **COMPACTACION:** la compactación se realizó mediante impactos sucesivos de la masa de concreto reforzado en caída libre usando una altura de mínimo 5 m. Un mínimo de 20 impactos fueron usados para cada punto
- **ENSAYOS POST COMPACTACION:** una vez terminadas las actividades de compactación y la grúa abandonó el sitio de trabajo, se llevaron a cabo ensayos de campo y laboratorio para estimar la diferencia y calcular los cambios en las propiedades del suelo antes y después de la compactación.

4.7. RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPACTACIÓN DINÁMICA

El ensayo se realizó el día 16 de Febrero de 2017. Para el izaje y caída del bloque de concreto dentro del área de estudio (5.5 m x 13 m) se empleó una grúa de la Policía Nacional, la cual mediante un sistema de poleas permitió alzar la placa y soltarla en caída libre a una altura de 5 m.

La Figura 35 muestra el sistema empleado y los puntos de impacto. Algunos de estos fueron abandonados ya que la grúa tuvo dificultades accediendo a la parte trasera del lote.

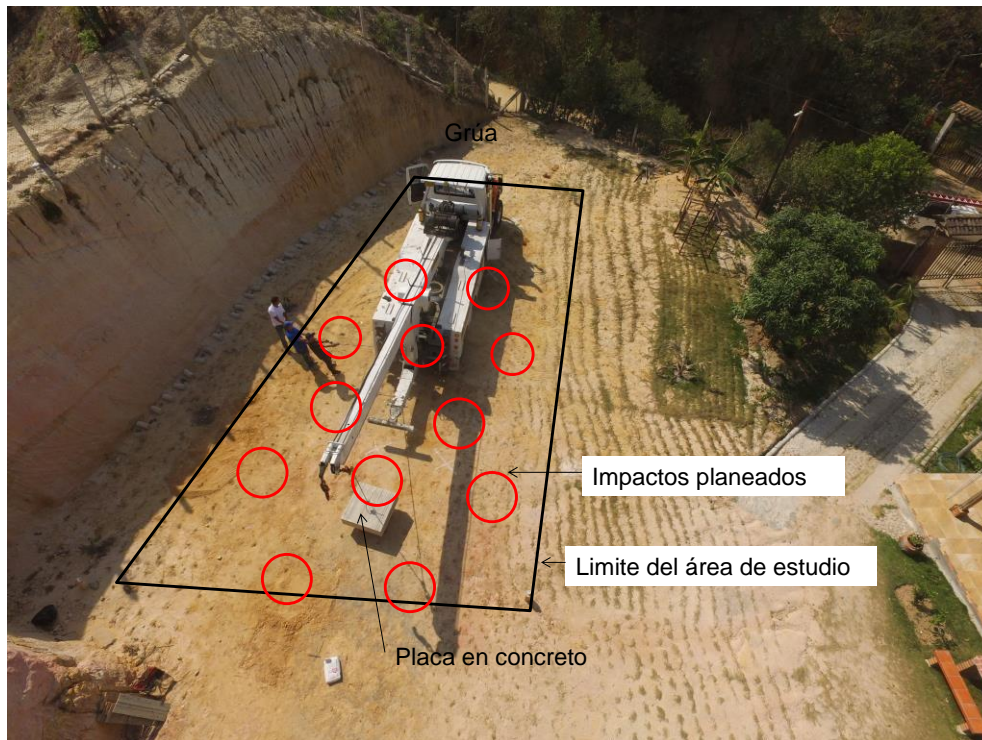


Figura 35 - Grúa empleada y patrón de impactos

4.8. CARACTERIZACIÓN POST-COMPACTACIÓN DINÁMICA

Para evaluar la efectividad de la compactación dinámica y la energía aplicada, se realizaron las siguientes pruebas:

- Cuatro ensayos PDC adicionales
- Dos ensayos de cono de arena

Con estos se procuró tener una base de comparación con los resultados del programa de caracterización pre-ensayo y así poder evaluar los cambios producto de la compactación.

La Tabla 8 muestra los resultados de los ensayos de cono de arena posteriores a la compactación.

Tabla 8 - Ensayos cono de arena post-compactación

MUESTRA	Prof. (m)	Densidad Húmeda (g/cm³)	Humedad (%)	Densidad Seca (g/cm³)
4	0,2	2,028	10,282	1,839
5	0,3	2,008	6,631	1,883

Esta tabla resume los resultados de los dos ensayos de densidad con cono de arena realizados en condiciones post-compactación. Las densidades fueron tomadas superficialmente, entre 0,2 y 0,3 m de profundidad respecto al terreno natural. Las densidades tienen un valor promedio de 1,861 gr/cm³ con una humedad natural promedio de 8,5 %.

No se incrementó a la mayor densidad del proctor sin embargo si se observa una mejora que demuestra efectividad del ensayo. Se presentó un aumento en el porcentaje de densidad del suelo del 26%.

Adicionalmente, se realizaron cuatro ensayos de Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) realizados en el área ensayada (Tabla 9). Estos alcanzaron una profundidad máxima de 1 m.

Tabla 9 - Resumen ensayos PDC post-compactación

Ensayo No.	INVIAS / ASTM	Profundidad máxima (m)
PDC-1	INVE 172	0,49
PDC-2		0,52
PDC-3		0,59
PDC-4		0,72

La Figura 36 muestra un resumen de los seis ensayos PDC realizados postcompactación. Se observa que la variabilidad presentada en los ensayos precompactación se ha uniformado y el valor promedio se encuentra alrededor de los 2 a los 5 mm/golpe para las condiciones post-ensayo. La serie PDC-3 presenta un valor excesivamente alto en su último intervalo de mediciones, la cual puede ser asociada con errores en la toma de las lecturas manuales.

El valor de CBR correlacionado para los ensayos se muestra en la Figura 37. Se puede observar que estos valores han aumentado considerablemente con respecto a las condiciones pre-ensayo. En la serie PDC-4 se evidencia un valor bastante alto,

el cual puede ser producto de un fragmento de roca encontrado por el cono a esa profundidad.

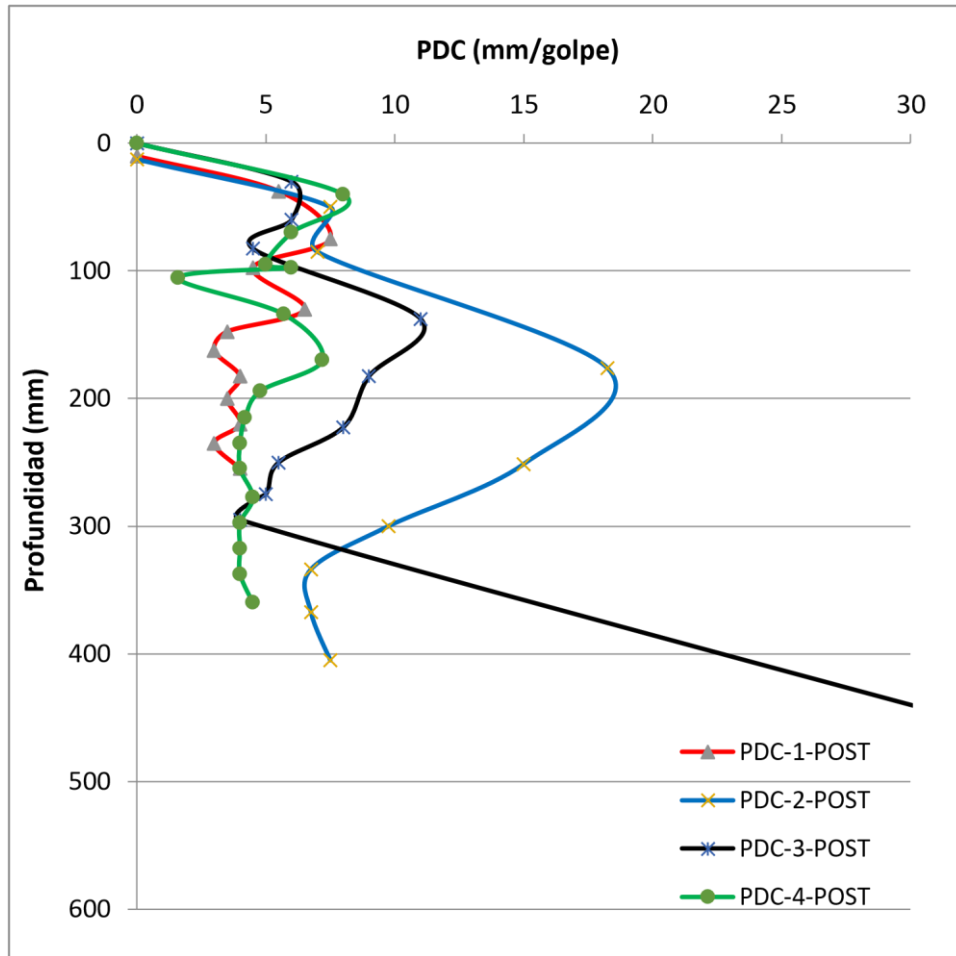


Figura 36 - Resumen ensayos PDC en condiciones post-compactación

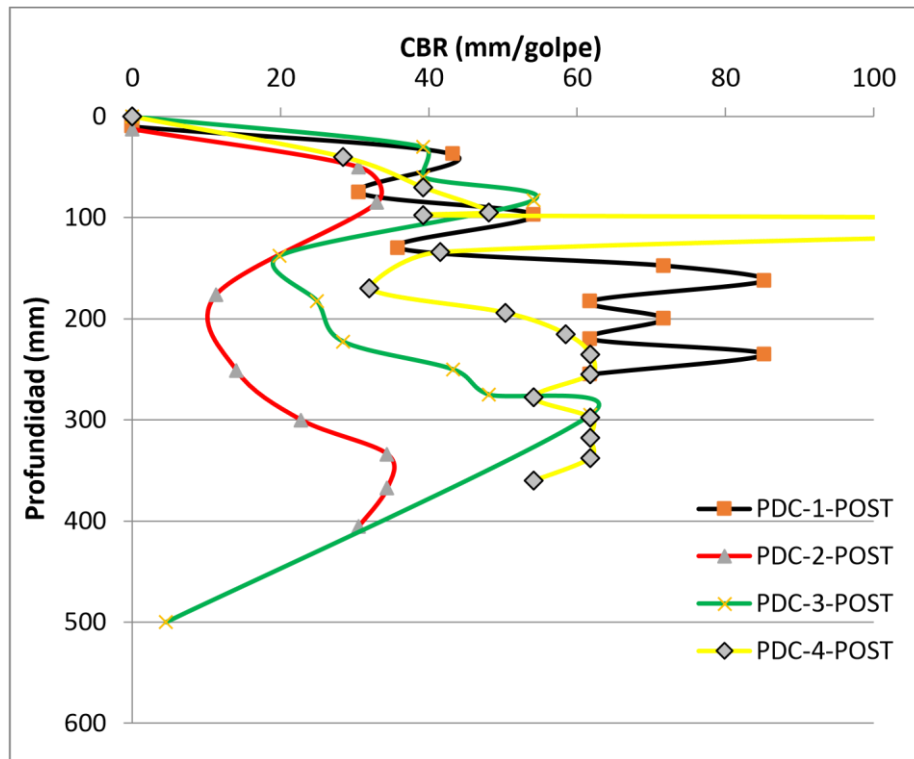


Figura 37 - CBR correlacionado de los PDCs en el sitio de ensayo, condiciones post-compactación

La Figura 38 muestra las seis series de PDC pre-ensayo, y las cuatro series obtenidas post-ensayo. Las series pre-ensayo se recrearon en tonos grises para un contraste con aquellas post-ensayo. En esta figura se observa la mejora del suelo y como la variabilidad inicialmente observada en las pruebas pre-ensayo tendió a desaparecer con la compactación dinámica.

Se puede inferir que este método de compactación incrementaría la capacidad de soporte del suelo para el caso de proyectos viales, resultando en menores espesores requeridos de las capas que componen la estructura de pavimento.

Empleando correlaciones de CBR se puede observar que el suelo de soporte ha mejorado comparado con los valores de CBR determinados con el PDC inicial.

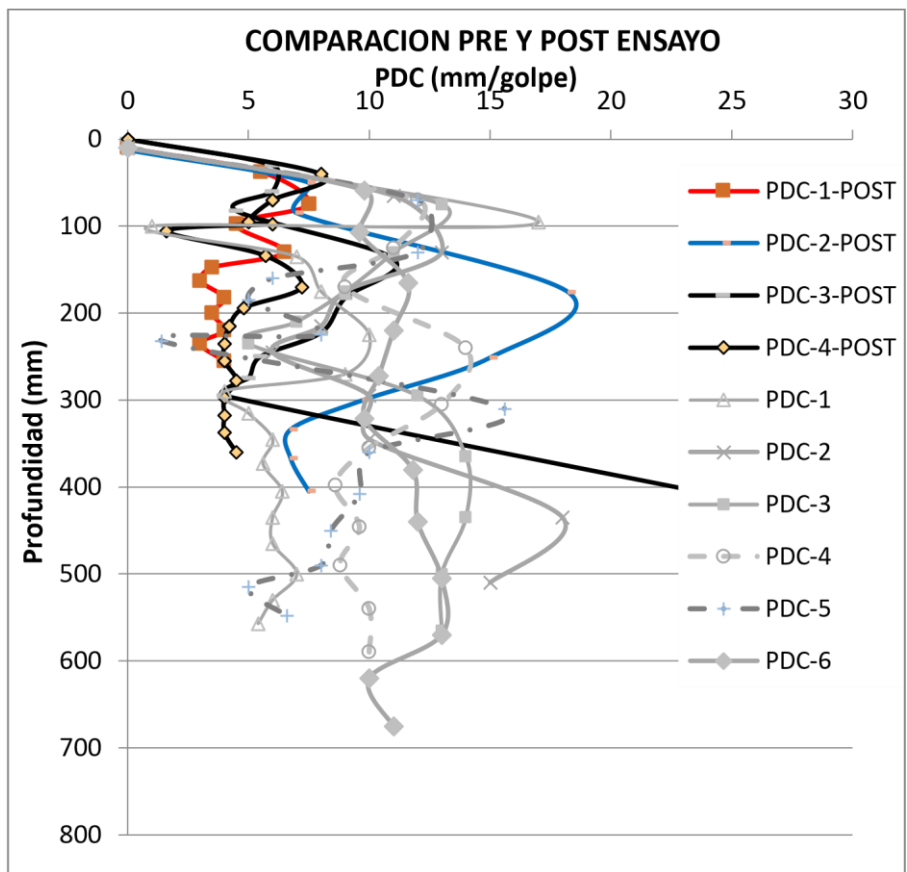


Figura 38 - Resumen ensayos PDC en condiciones pre y post compactación

El Anexo B presenta en detalle los ensayos de campo realizados en condiciones post-compactación dinámica.

4.9. MEDICIÓN DE LA EFECTIVIDAD DE LA COMPACTACIÓN

No existe una normativa que regule el mejoramiento del ensayo de compactación dinámica. Por el contrario, la medición de la efectividad de esta actividad se realiza mediante parámetros de resistencia de suelo ‘objetivo’; es decir, el ensayo se diseña y realiza para obtener un valor de resistencia de suelo (por ejemplo, capacidad portante) que cumpla con los requerimientos de un proyecto.

Para esto se deben tomar medidas antes y después del ensayo en puntos cercanos y siguiendo la misma técnica de medición, y se comparan los valores obtenidos. Típicamente se emplean las siguientes metodologías:

- Ensayo de penetración estándar (SPT): con el reconocido SPT se obtiene una resistencia de suelo en términos de número de golpes para penetrar el muestreador de cuchara partida una profundidad de 18 pulgadas. Al realizar

este ensayo antes y después del ensayo en sitios cercanos, se obtendrá la diferencia en penetración estándar del suelo a las mismas profundidades. Estos valores se pueden usar para correlacionar propiedades de capacidad portante y resistencia al corte. Por ende, si se tiene una capacidad portante de diseño, el ensayo se diseña para que el valor SPT de penetración correlacionado a la capacidad portante deseada sea obtenido después del ensayo a la profundidad deseada.

- Ensayo de Penetrómetro dinámico de Cono (PDC): con este ensayo se obtiene un perfil continuo de resistencia relativa del suelo a aplicación de carga dinámica, y se puede observar el mejoramiento del suelo superficial – hasta 1 m de profundidad – que puede ser correlacionado con propiedades de subrasante y capacidad portante
- Ensayo de penetración de Cono (CPT): este ensayo electrónico realizado antes y después de la compactación dinámica mostraría el aumento en resistencia de punta y de fuste del suelo mejorado, del cual se pueden correlacionar propiedades de resistencia al corte, capacidad portante, licuación y otras propiedades.
- Otros ensayos: dilatómetro, presurómetro y placa de carga

Debido a dificultades presupuestales, no se contó con ensayos SPT en esta prueba de campo. Por consiguiente, se recurrió a la comparación de valores de densidad y PDC para evaluar los cambios en las propiedades del suelo con la compactación dinámica.

Los cambios en la densidad del suelo se muestran a continuación en la figura 41.

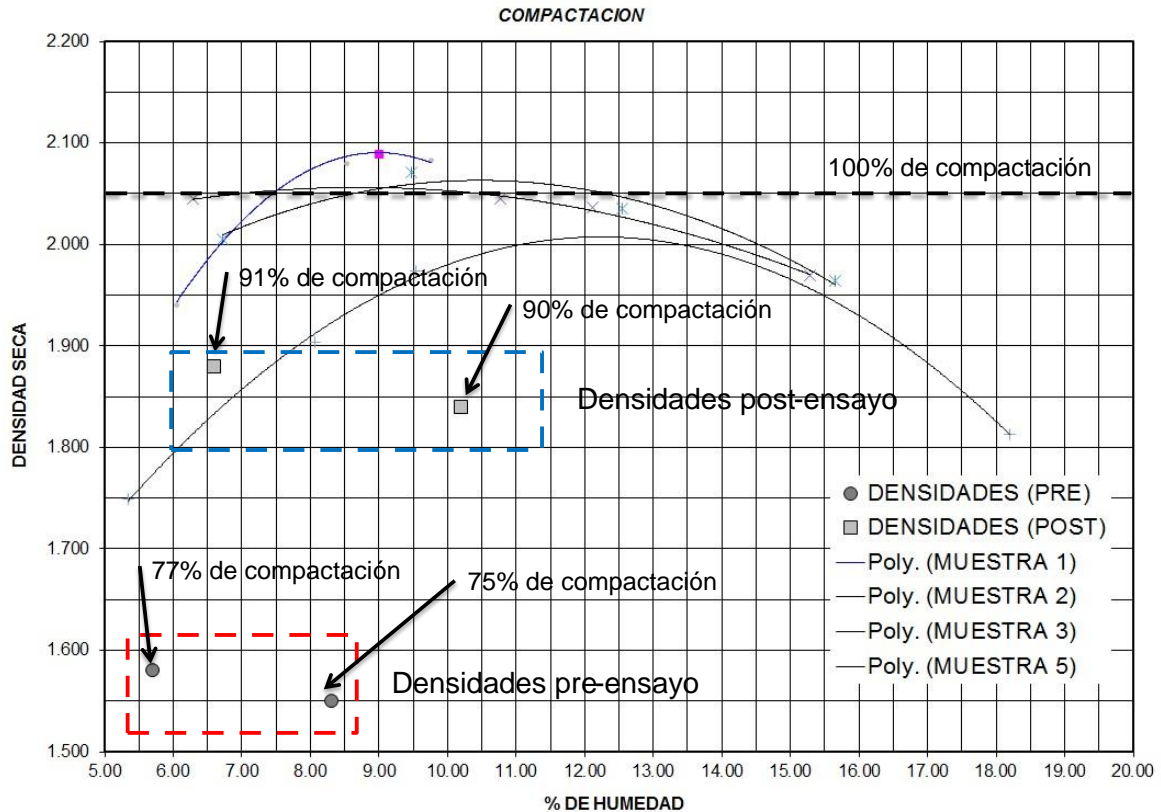


Figura 39 – Cambios en la densidad del suelo

Adicionalmente a la comparación de PDC, la Figura 39 muestra el cambio en valores de densidad seca para las condiciones pre y post-compactación. Esta figura muestra los valores obtenidos en el contexto de la compactación máxima obtenida mediante los ensayos de Proctor realizados en la caracterización del suelo.

Según esta figura, las condiciones pre-ensayo se encontraban entre 63 y 75% del valor de densidad seca máxima para un valor de densidad máxima promedio de 2.05 g/cm^3 . Al evaluar las densidades post-compactación con el mismo proctor, estas se encuentran entre el 90 y 91% de la densidad máxima obtenida en el ensayo Proctor.

Esto demuestra que mediante la compactación dinámica se logró un aumento superficial en densidad seca que se traduce en menor relación de vacíos en el suelo, y mejores condiciones de resistencia y capacidad portante.

Resultados compresión simple

Finalmente, se emplean los datos de compresión inconfiada para estimar la mejora del suelo en términos de resistencia no drenada (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

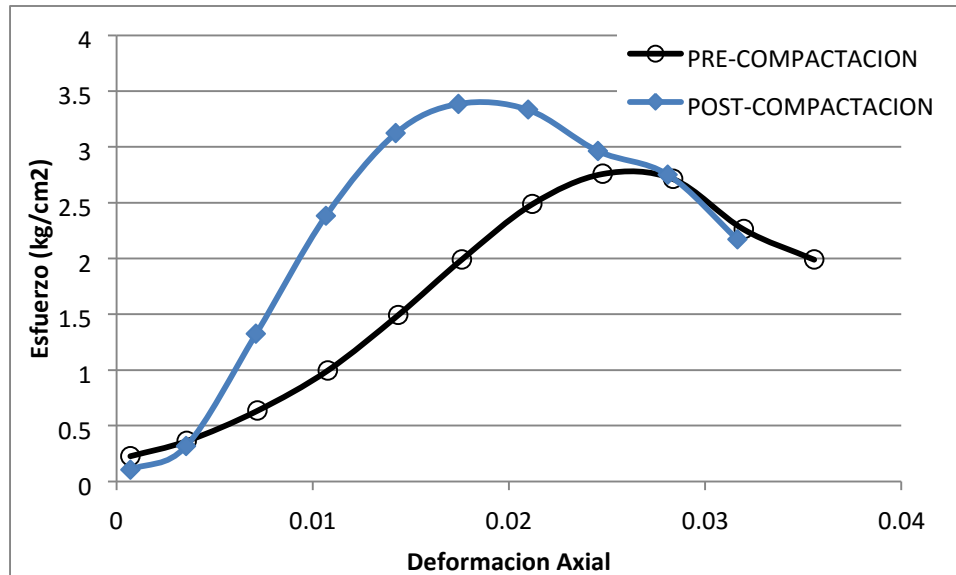


Figura 42 – Aumento en resistencia a la compresión inconfiada

Compresión simple Pre-compactación

qu	2,76	Kg/cm2
Cohesión	1.38	Kg/cm2
Cohesión	135	Kg/cm2

Compresión simple Post-compactación

qu	3,39	Kg/cm2
Cohesion	1.69	Kg/cm2
Cohesion	166	Kg/cm2

En condiciones pre-compactación se obtuvo un valor pico de compresión inconfiada de 2.76 kg/cm² y para post-compactación de 3.39 kg/cm². Esto se traduce a valores de cohesión de 130 kPa (1.38 kg/cm²), y de 166 kPa, o 1.69 kg/cm² para pre- y post-compactación, respectivamente es decir (un 25% de aumento) aumento en los valores de resistencia al corte, los cuales se traducen en un aumento

de la capacidad portante del estrato de suelo superficial. La sección siguiente presenta.

Las diferencias en capacidad portante y efectos en el diseño de una zapata superficial con este cambio en resistencias no drenadas.

Para estimar las deformaciones en el suelo producto de la compactación dinámica, se empleó un escáner láser (LiDAR, por sus siglas en inglés) para generar nubes de puntos antes y después de la compactación. Las siguientes figuras muestran la nube de puntos antes del ensayo (Figura 40), y la comparación antes y después del ensayo (Figura 41) en planta.

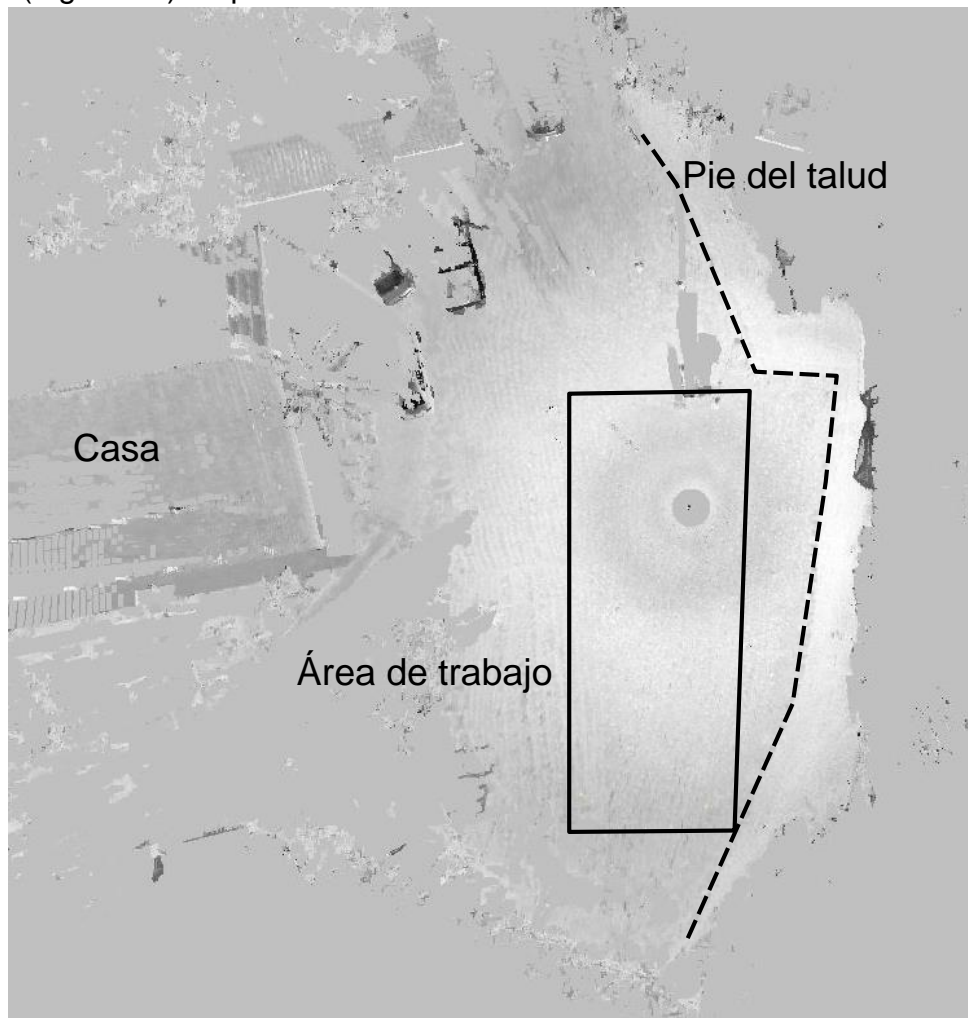


Figura 40 – Nube LiDAR antes del ensayo

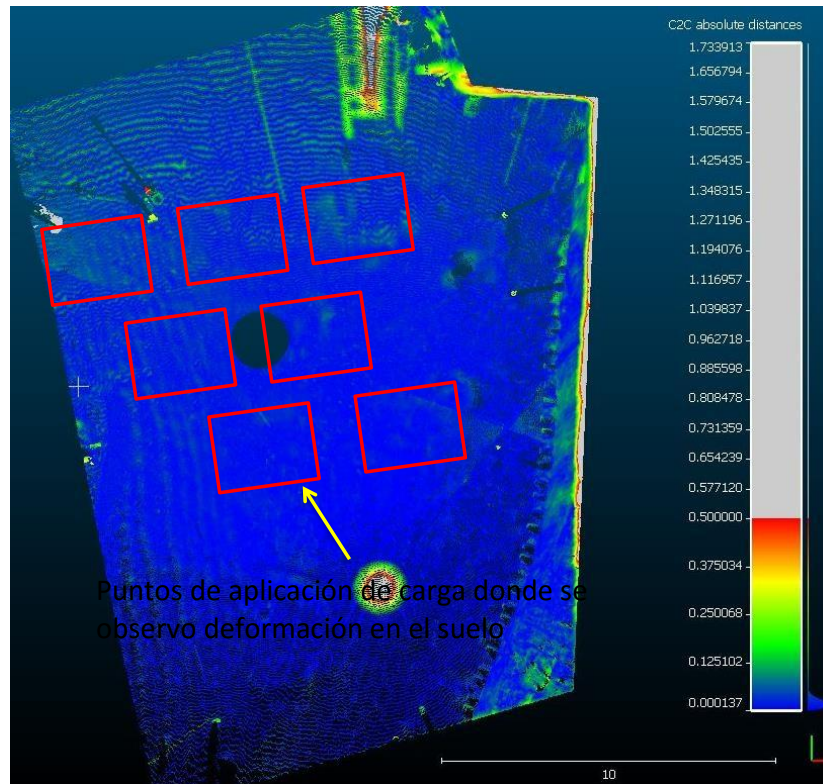


Figura 41 – Comparación de nubes LiDAR antes y después del ensayo

De estas figuras se puede observar que el ensayo no dejó una clara huella marcada en cada punto de impacto, tal como se observa en ejemplos típicos en la literatura disponible, sino que generó una deformación entre 0 y 5 cm generalizada en el área de trabajo. Esto puede estar relacionado a los siguientes factores:

- El suelo no presentaba condiciones muy sueltas antes del inicio de la prueba
- La grúa empleada arrastraba un elemento de anclaje que pudo haber eliminado el ahuellamiento dejado por los impactos al moverse de punto a punto

4.10. ANÁLISIS DE DATOS PARA UN CIMIENTO

La mejora mediante la compactación dinámica se pone en contexto en este capítulo mediante un diseño de un cimiento superficial hipotético, evaluando las diferencias en el tamaño de la cimentación para las condiciones de suelo natural no mejorado, y aquellas resultantes de la compactación dinámica.

4.11 DISEÑO DE ZAPATA CUADRADA

Tomando como referencia una hoja Excel estructurada para el diseño de zapatas cuadradas empleando el método de Meyerhoff, se obtuvieron los siguientes parámetros de diseño para una zapata asumiendo la condición del suelo pre compactación y otra zapata para el suelo post-compactación.

Se define obtener un factor de seguridad de 3 como objetivo del diseño, se asume una carga puntual de 30 toneladas y las dimensiones obtenidas para cada zapata fueron las siguientes:

Zapata Pre-compactación

C (KN/m²)	130,00	B/L	1,00
		F.S	3,00
□ (°)	0,00	L=	1,0
B (m)	1,73		
L (m)	1,73		
B/L	1,00		
Área (m²)	2,99		
Df (m)	0,50		
□□ (KN/m³)	15,00		
□□ (KN/m³)	15,00		
Nc	5,14		
Nq	1,00		
N□	0,00		
Fcs	1,19		
Fcd	1,12		
Fqs	1,00		
Fqd	1,00		
F□s	0,60		
F□d	1,00		
Qu (KN/m²)	897,98		
Qadm (KN/m²)	299,33		
Padm (KN)	895,8		
Carga (t)	30,00		

Presion (T/m²)	10,0
Presion (kN/m²)	98,2
Factor de Seguridad	3,0

Zapata Post-compactación

C (KN/m²)	180,00	B/L	1,00
		F.S	
□ (°)	0,00		3,00
		L=	1,0
B (m)	1,45		

L (m)	1,45
B/L	1,00
Área (m²)	2,10
Df (m)	0,50
□□ (KN/m³)	18,00
□□ (KN/m³)	18,00
Nc	5,14
Nq	1,00
N□	0,00
Fcs	1,19
Fcd	1,14
Fqs	1,00
Fqd	1,00
F□s	0,60
F□d	1,00
Qu (KN/m²)	1266,6
Qadm (KN/m²)	422,2
Padm (KN)	887,8
Carga (t)	30,00
Presion (T/m²)	14,3
Presion (kN/m²)	139,8
Factor de Seguridad	3,05

El análisis de las zapatas muestra que con las propiedades mejoradas existen dos diferencias fundamentales en el suelo y la zapata:

- La capacidad portante admisible en condiciones pre-compactación es de 299 kPa, mientras que post-compactación este valor incrementa a 422 kPa, un 41% de aumento.

- La dimensión de la zapata cuadrada para el suelo no mejorado es de 1.73 m, mientras que para alcanzar el mismo factor de seguridad después del mejoramiento esta dimensión es de 1.45 m
- Para una zapata cuadrada de 0.5 m de espesor, el volumen de concreto sin mejoramiento es de 1.5 m^3 ($1.73 \times 1.73 \times 0.5$), mientras que para las condiciones mejoradas es de 1.05 m^3 ($1.45 \times 1.45 \times 0.5$), lo cual traduce en un ahorro en concreto de 0.45 m^3 por zapata.
- Con el suelo mejorado la zapata presenta una mayor capacidad frente a las cargas estimadas, ahorro en el costo de construcción, una zapata más pequeña aplicaría al terreno una mayor carga, notando que el área de la zapata en condiciones pre- compactación es mayor que el área de la zapata diseñada para condiciones post-compactación y la zapata para esta condición soporta mayor carga.

5. CONCLUSIONES

La compactación dinámica es una técnica mundialmente reconocida para el mejoramiento de suelos en condiciones desfavorables para una cimentación. En esta investigación se realizó un ensayo a escala real en un sitio con condiciones geotécnicas aceptables, y se procuró cuantificar los beneficios de esta técnica

mediante el diseño hipotético de un cimiento superficial con las características del suelo antes y después de la compactación dinámica.

Las conclusiones principales de la investigación fueron:

- El ensayo consistió en aplicar repetidos impactos sobre el suelo, empleando un mínimo de 20 impactos sobre cada punto. Para esto, se empleó una placa de 720 kg de peso y una altura de caída de 5 m.
- Se logró un aumento promedio del 26% en los valores de densidad del suelo superficial
- Se observó una mejora considerable en los valores de resistencia PDC, al pasar de 10-20 mm/golpe a 5-10 mm/golpe. Esto se traduce a mejoras en la capacidad portante superficial para pavimentos y cimentaciones sencillas
- Se observó un aumento del 25% en la compresión inconfiada del suelo ensayado. Esto se traduce en un 40% de aumento en la capacidad portante al aplicar una metodología convencional de diseño de zapata aislada para una carga típica.
- Este aumento en capacidad portante se traduce en un ahorro de aproximadamente 20% del concreto en la zapata, para alcanzar un factor de seguridad de 3.0.
- Las condiciones del suelo antes de la compactación eran aceptables, es decir, no se ensayó un suelo demasiado blando o suelto y por ende los porcentajes de aumento en las propiedades no superan el 50%
- El suelo ensayado varió entre arena arcillosa a arena limosa con contenidos variables de finos.
- No se pudo establecer la profundidad máxima de influencia de la compactación debido a que no se realizaron ensayos SPT, sin embargo, según los resultados de los PDC, esta supera los 70 cm de profundidad.
- Se observaron deformaciones en el suelo del orden de 5 cm después de la compactación. Sin embargo, no se observó un claro ahuellamiento en el sitio de cada impacto sino una deformación general en el área de la prueba.

Con las observaciones y pruebas realizadas como parte de esta investigación se concluye que la compactación dinámica es una técnica efectiva para mejorar las condiciones de suelo para cimentaciones.

6. RECOMENDACIONES

- Realizar el ensayo en suelos con propiedades mecánicas poco favorables para obtener resultados más notorios en el mejoramiento de dichas propiedades.

- Utilizar una placa con dimensiones mayores para aumentar su peso y lograr mayor compactación al suelo, así mismo emplear mayor altura en los impactos ya que a mayor altura mayor energía.
- Emplear una grúa que no tenga elementos de anclaje ya que estos pueden eliminar el ahuellamiento dejado por los impactos al moverse de punto a punto.
- Emplear otros ensayos para medir la efectividad de la compactación, como SPT o pruebas de placa de carga superficial.

7. REFERENCIAS

[1] SOTO ANDRADE, JAIME. Mejoramiento Del Suelo Cohesivo Por Medio De La Compactación Dinámica, Bogotá 2014. Tesis (Maestría En Ingeniería Civil Con Énfasis En

Geotecnia), Escuela Colombiana De Ingeniería Julio Garavito, Facultad De Ingeniería Civil. [En Línea]. Available:

<http://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/190/1/CFMaestria%20Ingenier%C3%ADa%20Civil-7720885.pdf>.

- [2] ARRIAGA, DARÍO, 2006, “Aspectos Constructivos de la Técnica de Compactación Dinámica para Mejoramiento Masivo de Suelos”, Tesis para Optar por el Grado de Maestro en Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. [En línea]. Available:
http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/910/ARRIAG_AVAZQUEZ.pdf?sequence=1.

- [3] STAMATOPULOS, ARIS C , KOTZIAS, PANAGHIOTIS C. “Mejoramiento de Suelos por precarga” Editorial Limusa 1990. pp 18-42. [En Línea]. Available:
<http://catalogo.unimilitar.edu.co/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=25>.

- [4] Zetas Zemin Teknolojisi, 2017. [En línea] Available: <http://www.zetas.com.tr/>.

- [5] VIEITEZ UTESA, LUIS “Mejoramiento masivo de suelos” Sociedad Mexicana Mecánica de Suelos, A.C.1979 pp 7-10,41-99,117-155. [En línea]

- [6] VALLEJO LARREA, JOSÉ FIGUEROA “Geotecnia y Cimentaciones (Geocisa), 2017” [En Línea]. Available : <http://geosisa.ec/>.

- [7] KELLER CIMENTACIONES DE LATINOAMERICA “Construcción Geotécnica”. [En Línea]. Available: www.keller.com.mx

- [8] BACHY-SOLETANCHE, 2017, [En Línea]. Available:
<http://www.soletanchebachy.com.mx>.

- [9] MICROPILOTES GENERAL, (2017) “Cimentaciones Especiales”. [En Línea] Available:
www.gmicropilotes.com/inyeccion.php.

[10] R. DE SANTIAGO RUZAFÁ,(2006). *“Mejora de suelo con columnas de grava en vía seca”* Jornadas Técnicas AETESS 6ª Sesión Técnicas de Mejora del Terreno. [En línea].

[11] MENARD Mexico, 2017, “International Symposium: Rigid Inclusions in Difficult Soft Soil Conditions”. [En Línea]. Available:
http://www.menard.es/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=44.

[12] Federal Highway Administration (FHWA), 1995, *“Dynamic Compaction”*,
Publicación FHWA-SA-95-037, NITS PB96-146105.

[13] Geotecnología SAS, 2017. [En Línea]. Available: www.erosión.com.co.

[14] INGEOMINAS, 2001, *“Estudio de Microzonificación Sismogeotécnica del Área Metropolitana de Bucaramanga”*, Informe Principal y Planos.

”.