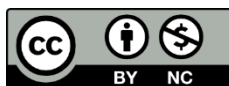


**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
EVALUAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO PARA EL MÉTODO DE
COMPACTACIÓN ESTÁTICO VARIANDO LA VELOCIDAD DE CARGA EN
ESPECÍMENES ELABORADOS CON SUB-BASE GRANULAR DE 5 A 25
MM/MINUTO**



Por:
Alejandro Pinto Borja
Luisa Fernanda Pulido De Antonio



**UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
EVALUAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO PARA EL MÉTODO DE
COMPACTACIÓN ESTÁTICO VARIANDO LA VELOCIDAD DE CARGA EN
ESPECÍMENES ELABORADOS CON SUB-BASE GRANULAR DE 5 A 25
MM/MINUTO**



Por:
Alejandro Pinto Borja
Luisa Fernanda Pulido De Antonio

Documento final presentado como opción de grado para optar al título profesional
de ingeniero civil

Aprobado por:
Ing. Luis Fernando Díaz Cruz, Mg.
Director

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
VILLAVICENCIO
2020

AUTORIDADES ACADÉMICAS

Fray José Gabriel Mesa Ángulo, O.P.
Rector General

Fray Eduardo González Gil, O.P.
Vicerrector Académico General

Fray José Antonio Balaguera Cepeda, O.P.
Rector Sede Villavicencio

Fray Rodrigo García Jara, O.P.
Vicerrector Académico Sede Villavicencio

Julieth Andrea Sierra Tobón
Secretaria de División Sede Villavicencio

Ing. Manuel Eduardo Herrera Pabon, Mg
Decano Facultad de Ingeniería Civil

Nota de aceptación

Ing. Manuel Eduardo Herrera Pabón
Decano Facultad Ingeniería Civil

Ing. Luis Fernando Díaz Cruz
Director Trabajo de Grado

Ing. Erika Lorena Becerra Becerra
Jurado

Villavicencio, 23 de enero de 2020

DEDICATORIA

El presente proyecto investigativo lo dedicamos principalmente a nuestros padres, quienes a pesar de las dificultades que hemos afrontado nos han apoyado incondicionalmente en estos años de formación personal y profesional, brindándonos su amor, paciencia y esfuerzo. De igual forma, a la Universidad Santo Tomás de Villavicencio y al cuerpo docente, por su apoyo y orientación académica.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos inicialmente a Dios, por permitirnos realizar este trabajo y alcanzar un logro más en nuestras vidas que llena de orgullo a nuestras familias. Asimismo, al Ingeniero Luis Fernando Díaz Cruz por su colaboración, apoyo y acompañamiento como director de esta investigación, a nuestros compañeros de pregrado por la ayuda proporcionada en diferentes etapas del proyecto, a la empresa REX Ingeniería quienes nos proporcionaron el material necesario para realizar los ensayos de laboratorio, y a cada una de las personas que de forma directa e indirecta hicieron parte de este proceso.

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el comportamiento mecánico que presenta un espécimen fabricado con material de Sub-Base Granular proveniente de la cantera del río Guayuriba en la ciudad de Villavicencio, elaborado con el método de compactación estático denominado volumen constante presión variable, en el cual se aplica una fuerza estática por medio del equipo Loader Master 5030 que permite controlar la distancia y la velocidad del recorrido del pistón de compactación. Para la realización de los ensayos se fabricó un molde metálico de acero galvanizado A36 en el que se elaboraron un total de 25 especímenes de 50 mm de diámetro por 100 mm de altura con velocidades de carga de 5, 10, 15, 20 y 25 mm/min y fuerza de compactación de máximo 36 KN.

Los resultados obtenidos del equipo Loader Master indicaron que el material granular al ser sometido a la mínima velocidad de compactación que fue 5 mm/min, alcanzaron una mayor fuerza de compactación por el pistón, mientras que a la mayor velocidad de 25 mm/min la fuerza de compactación fue menor. En el ensayo Proctor se obtuvo una densidad seca de 2.11 gr/cm^3 y en los especímenes fabricados por el método de compactación estático se hallaron densidades mayores a esta, siendo 2.32 gr/cm^3 la máxima e indicando que la muestra obtuvo un peso unitario de un 3% mayor. Así mismo, en el ensayo de velocidad de onda se analizaron dos factores de homogeneidad en los especímenes, la oscilación de la onda y la velocidad en que esta tarda en recorrer la briqueta del punto inicial al final. Se pudo evidenciar que a todos los especímenes analizados las oscilaciones en las ondas se muestran muy dispersas, lo que indica que contienen porosidad en su parte interna debido a que es un material que tiene mínimas cantidades de finos, por lo que este no fue un factor válido para el análisis, mientras que por medio de la velocidad de recorrido de onda es muy claro que las muestras con menor velocidad de compactación presentan un recorrido mucho más rápido que con mayores velocidades, lo que indica que son muestras más homogéneas.

Los resultados indican que el método es práctico y favorable para ser utilizado con velocidades de compactación bajas, pero sugiere que el método de compactación estático no sea aplicado con materiales granulares sino con materiales que contengan mayor cantidad de finos.

Palabras Clave: compactación estática, comportamiento mecánico, velocidad de carga, espécimen, densidad seca.

ABSTRACT

In this investigation the mechanical behavior having a specimen made of material granular subbase from the quarry the Guayuriba river Villavicencio, prepared by the method of static compaction called constant volume variable pressure was evaluated, in which a static force applied by the team Loader 5030 Master which controls the distance and speed of travel of the piston compaction. For carrying out the tests a metal mold galvanized steel A36 in which a total of 25 specimens of 50 mm diameter were produced by 100 mm high with loading rates of 5, it was made 10, 15, 20 and 25 mm/min and maximum compaction force of 36 kN.

The results of the team Loader Master indicated that the granular material being subjected to high compaction speed was 5 mm/min, achieved a greater compaction force by the piston, while the greater speed of 25 mm/min the compaction force was lower. In the Proctor dry density of 2.11 g/cm³ and the specimens manufactured by the method of static compaction is achieved higher densities they were found to this, being 2.32 g/cm³ maximum and indicating that the samples obtained density than 3% higher. Likewise, in the test wave velocity two factors homogeneity were analyzed specimens, the oscillation waves and the speed at which this takes to travel briquette start point to the end.

The results indicate that the method is practical and favorable to be used at slow compaction, but suggests that the static compaction method is not applied with granular materials but with materials containing greater amount of fines.

Key Word: static compaction, mechanical behavior, load speed, specimen, dry density.

CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	13
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
3.	JUSTIFICACIÓN.....	15
4.	OBJETIVOS.....	16
4.1.	OBJETIVO GENERAL	16
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5.	ALCANCE.....	17
6.	MARCO DE REFERENCIA	18
6.1.	MARCO TEÓRICO	18
6.1.1.	Ensayo proctor modificado.....	18
6.1.2.	Método de compactación estático.....	21
6.1.3.	Especificaciones para sub-base granular (INVIAS)	22
6.1.4.	Anisotropía en materiales granulares.....	24
6.1.5.	Ensayo de velocidad de onda pundit.....	25
6.2.	MARCO CONCEPTUAL	28
6.2.1.	Compactación de suelos	28
6.2.2.	Comportamiento mecánico	28
6.2.3.	Densidad máxima seca y humedad óptima.....	28
6.2.4.	Granulometría	28
6.3.	ESTADO DEL ARTE.....	29
6.4.	MARCO NORMATIVO.....	32
7.	METODOLOGÍA	34
7.1.	FASE PRELIMINAR.....	35
7.2.	FASE I: ANTECEDENTES	35
7.3.	FASE II: ESTUDIOS PREVIOS	36
7.3.1.	Caracterización del material granular	36
7.3.2.	Definición de las velocidades para el ensayo.....	36
7.3.3.	Elaboración del molde para el ensayo de compactación estático	37
7.4.	FASE III: ENSAYOS DE LABORATORIO	37
7.4.1.	Fabricación y maduración de briquetas.....	37
7.4.2.	Control de calidad a especímenes fabricados.....	37
7.4.3.	Ensayo de velocidad de onda	37
7.5.	FASE IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	38
8.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	39
8.1.	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR.....	39
8.1.1.	Ensayos de laboratorio.....	39
8.2.	FABRICACIÓN DE BRIQUETAS.....	44
8.2.1.	Material para elaboración de briquetas	45
8.2.2.	Cuantificación del material granular	45
8.2.3.	Preparación de las briquetas.....	46
8.2.4.	Compactación	48
8.2.5.	Resultados del equipo loader master 5030	50
8.3.	ENSAYO DE VELOCIDAD DE ONDA.....	50

9.	RESULTADOS E IMPACTOS	60
9.1.	RESULTADOS	60
9.2.	IMPACTOS	60
10.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	61
10.1.	CONCLUSIONES	61
10.2.	TRABAJOS FUTUROS.....	62
	BIBLIOGRAFÍA	64
	ANEXOS	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 6.1. Métodos de compactación Proctor modificado	20
Tabla 6.2. Tipos de Sub-Base Granular	22
Tabla 6.3. Requisitos de calidad para agregados en construcción de Sub-Bases	22
Tabla 6.4. Valores típicos de las propiedades de tipos de suelos	23
Tabla 6.5. Ensayos empleados para el proyecto.....	32
Tabla 7.1. Ensayos para la caracterización del material granular	36
Tabla 8.1. Determinación del tamaño de las partículas del suelo por tamizado	40
Tabla 8.2. Relaciones de soporte para el material granular	42
Tabla 8.3. Relación de soporte para el esfuerzo máximo	43
Tabla 8.4. Determinación de los valores para CBR y densidad seca	44
Tabla 8.5. Resultados del ensayo de Velocidad de Onda con el equipo PUNDIT	56
Tabla 8.6. Pesos unitarios alcanzados por los especímenes fabricados.....	58
Tabla 9.1. Resultados, indicadores y objetivos del proyecto	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 6.1. Compactación de material granular.....	18
Figura 6.2. Curva de compactación Proctor estándar y modificado (método A) para un suelo limo arcilloso	19
Figura 6.3. Máquina Loader Master 5030	21
Figura 6.4. Efecto del grado de saturación sobre el módulo resiliente	25
Figura 6.5. Representación del espectro de ondas	25
Figura 6.6. Comportamiento típico de una onda longitudinal	26
Figura 6.7. Equipo para pruebas de ultrasonido Pundit Lab	27
Figura 7.1. Descripción metodológica	34
Figura 8.1. Planta de producción de materiales pétreos REX Ingeniería S.A	39
Figura 8.2. Muestra de material para ensayo de Límites de Atterberg	40
Figura 8.3. Curva Granulométrica de Material en Estudio.....	41
Figura 8.4. Relación humedad-Densidad Seca Máxima	42
Figura 8.5. Curva Penetración – Esfuerzo	43
Figura 8.6. Valores de CBR vs Densidad seca para 10, 25 y 56 golpes	44
Figura 8.7. Material granular para elaboración de especímenes.....	45
Figura 8.8. Muestra de material húmedo.....	45
Figura 8.9. Molde metálico para el método de compactación estático	46
Figura 8.10. Extracción de espécimen del molde.....	47
Figura 8.11. Molde fabricado para el método de compactación estático.....	48
Figura 8.12. Compactación estática del material granular	49
Figura 8.13. Especimen compactado y extraído del molde.....	49
Figura 8.14. Comportamiento de espécimen compactado por el método estático a diferentes velocidades	50
Figura 8.15. Velocidad de onda de espécimen compactado a 5 mm/min	51
Figura 8.16. Velocidad de onda de espécimen compactado a 10 mm/min	52
Figura 8.17. Velocidad de onda de espécimen compactado a 15 mm/min	53
Figura 8.18. Velocidad de onda de espécimen compactado a 20 mm/min	54
Figura 8.19. Velocidad de onda de espécimen compactado a 25 mm/min	56
Figura 8.20. Resultados del ensayo de velocidad de onda	57
Figura 8.21. Pesos unitarios alcanzados por especímenes elaborados a diferentes velocidades de compactación.....	58
Figura 8.22. Velocidades de onda obtenidas a diferentes velocidades de compactación	59

1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la Ingeniería Civil, la compactación es uno de los diferentes procedimientos para mejorar un suelo que se está interviniendo en un proceso de construcción. Este se define como un método mecánico en los procedimientos de tratamiento de terreno, que se basa en la reducción del índice de vacíos a contenido de agua constante de un suelo.

La compactación de suelos es aplicada en la construcción de rellenos artificiales como terraplenes, presas, vías, entre otros, y en algunas ocasiones en terrenos naturales como en el caso de cimentaciones sobre arenas sueltas. Tener conocimiento de las propiedades mecánicas de los materiales compactados y de las condiciones en que trabajan en una estructura que se está construyendo es importante para poder dimensionarla y asegurar su estabilidad. Esto ha permitido que se generen numerosos trabajos de investigación de los suelos compactados por la dificultad que implica la aplicación de la mecánica de suelos tradicional a los problemas geotécnicos que estos evidencian. [1]

Se utilizan comúnmente tres tipos de compactación: dinámico, estático y vibratorio. El método de compactación que se utiliza generalmente en laboratorio es el ensayo dinámico a través del ensayo Proctor (1930) en el cual se determina la humedad óptima para una determinada energía de compactación específica que genera la máxima densidad seca, utilizada en el control de los procesos de compactación en campo, sin embargo, en este ensayo los datos pueden variar según la cantidad y la naturaleza de la energía de compactación suministrada en la prueba.

Como resultado de la compactación en campo y el ensayo con metodología Proctor, hay evidencia que demuestra que el material después de compactado presenta una muy baja resistencia al corte, esto se debe a que la energía que se le suministra al suelo puede ser excesiva, por ende, se puede fracturar la estructura del suelo y consecuentemente el agua incluida en los poros es liberada. [2]

El método de compactación estático es un ensayo de laboratorio que se está implementado desde el año 1993, en este se aplica una fuerza de compresión constante mediante el uso de un molde estático para diseñar briquetas con ciertas a partir de diferentes cantidades de energía, la cual depende de las características y condiciones de cada tipo de suelo.

En este escenario, la presente investigación estudiará el método de compactación estático, haciendo una evaluación del comportamiento mecánico del material con variaciones de velocidad para verificar su uniformidad. Actualmente, en Colombia pocas investigaciones se han desarrollado sobre el método de compactación estático, siendo este un antecedente para realizar estudios como aporte a temáticas de Ingeniería Civil.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En la actividad de construcción de carreteras, una de las etapas más importantes es la compactación de los suelos que se usa para mejorar sus propiedades mecánicas, densificándolos e incrementando su capacidad portante. Los estudios referentes a este tema inician a mediados de 1933 con la publicación del ingeniero Ralph R. Proctor, un ensayo empírico de compactación dinámica en el cual se determina la densidad máxima seca de un suelo y la humedad óptima necesaria para alcanzarla bajo una energía determinada, y de esta forma, proveer un suelo cuyo comportamiento mecánico sea adecuado a las solicitaciones requeridas y perdure a lo largo de la vida útil de la estructura de pavimento.

Actualmente, existen dos métodos principales de compactación en laboratorio que son: el estudio de presión estática y la prueba estándar de Proctor con presión dinámica, este último presenta algunos patrones de variación que generan incertidumbre en la determinación de la densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo, como es la aplicación de energía estándar para todas las categorías de suelos sin distinción y ambigüedad en cuanto a la precisión ya que, los resultados dependen de la persona que realice el ensayo pues los datos pueden diferir entre laboratoristas con la misma muestra de suelo y sumado a esto, la energía de compactación se aplica de forma diferente a las capas de suelo debido a que, la transferencia de energía es mayor en las capas intermedias e inferiores lo que genera un efecto de densificación en secciones de la muestra.

De esta manera, las pruebas llevadas a cabo en campo para la determinación de la densidad seca máxima con la humedad óptima de compactación, presentan variación respecto a los resultados obtenidos en laboratorio que son complejos de obtener en su totalidad [3]. A partir de este concepto se ha implementado un método de compactación estático en laboratorio para los suelos, del cual por medio de investigaciones se han obtenido resultados satisfactorios de los valores de resistencia al corte y mayores densidades en varios tipos de suelos, lo anterior se comprueba por medio de graficas de densidad seca vs contenido de humedad, en las cuales el método estático obtiene rangos superiores de densidad seca máxima con una cantidad considerablemente menor de energía aplicada respecto al método dinámico Proctor.

En Colombia el ensayo de compactación en laboratorio para el estudio de suelos se rige por la norma 141 y 142 de la sección 100 del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) con el ensayo de Proctor normal y modificado.

3. JUSTIFICACIÓN

Para las obras de infraestructura vial es necesario la implementación de materiales que garanticen en la estructura un buen comportamiento mecánico y durabilidad a lo largo de su vida útil, para el caso de Colombia estos materiales se rigen bajo las especificaciones generales y normas de ensayo que establece el INVIAS, como es, el método de compactación dinámica en laboratorio para la descripción, caracterización y análisis de las propiedades mecánicas para muestras de suelo (Proctor). La compactación que se produce in situ se realiza estáticamente debido a que brinda al suelo un proceso de compactación más homogéneo y se reducen considerablemente los tiempos para lograr la misma densidad, mientras que la compactación en laboratorio se realiza con el ensayo de Proctor, pero en este, los resultados de California Bearing Ratio (CBR) en las pruebas de laboratorio no reflejan la simulación del comportamiento del suelo en el sitio [1].

Este método dinámico aplica la energía de compactación de forma diferente en la misma muestra, pues a medida que se van agregando las capas esta energía se va transfiriendo como extra a las que se encuentren intermedias y en la parte inferior, del tal forma que, la primera capa en colocarse va a recibir el esfuerzo aplicado por el pistón más los esfuerzos generados por la capas impuesta de forma posterior, de esta manera, se produce un efecto de compactación adicional que difiere la homogeneidad de las muestras.

Por otra parte, las pruebas de presión estática se diseñan como un ensayo de compactación en laboratorio a través de un molde al cual se le aplica la cantidad de energía en función de las condiciones y características del tipo de suelo por unidad de unidad de volumen. La fuerza estática se aplica de forma ascendente al suelo mediante una bomba hidráulica con criterios específicos para asegurar curvas de compactación similares con las del Proctor. De esta manera, se pueden obtener briquetas de material granular más homogéneas y se puede usar posteriormente en pruebas de compresión no confinada, ensayo triaxial, columna resonante, entre otros. [4]

Es por esto que, el método de compactación estático en laboratorio permite la fabricación de especímenes de estudio más homogéneos, con la aplicación uniforme de energía en toda la muestra de suelo, su elaboración de forma práctica por medio de un equipo y procedimiento mecánico, y permitiendo realizar un estudio más preciso al analizar las propiedades mecánicas y dinámicas de los materiales usados para la construcción. Esto permite a largo plazo mejorar la resistencia del suelo, definir de forma más eficiente el diseño de la estructura de pavimento al disminuir los espesores de los granulares y llevar a cabo el proceso constructivo acorde a los datos obtenidos en laboratorio y así, evitar a largo plazo deterioros y manteamientos en las capas que la conformen. [1]

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento mecánico para el método de compactación estático variando la velocidad de carga en un rango de 5 a 25 mm/min en especímenes elaborados con Sub-Base Granular proveniente del río Guayuriba.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el material de Sub-Base Granular para el ensayo estático de compactación con las especificaciones establecidas por el Instituto Nacional de Vías 2013 (INVIAS) en el capítulo 3, artículo 320-13.
- Fabricar un molde en acero galvanizado de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura para la elaboración de los especímenes de Sub-Base Granular.
- Elaborar 25 especímenes de Sub-Base Granular mediante el método estático de compactación variando la velocidad de carga entre 5 a 25 mm/min.
- Evaluar la uniformidad del comportamiento mecánico de un espécimen fabricado mediante el método estático de compactación por medio de la velocidad de onda longitudinal.

5. ALCANCE

Inicialmente se contempló para esta investigación, caracterizar el material para Sub-Base Granular obtenido de la cantera de explotación de REX Ingeniería cuyo material proviene del río Guayuriba, esto mediante los siguientes ensayos establecidos en la sección 100 del INVIAS: determinación de los tamaños de las partículas del suelo (análisis por tamizado), determinación del límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad, relación de humedad – peso unitario seco (ensayo modificado de compactación) y CBR de suelo compacto en laboratorio.

Lo anterior, fue necesario para la elaboración de especímenes con material que pasaba el tamiz N° 4 (4.76 mm) en un molde fabricado en acero galvanizado compuesto por una base, un collar ($h=10$ cm) y una extensión ($h=7.6$ cm), con un diámetro de 5 cm que se estableció teniendo en cuenta las dimensiones de la celda de carga del equipo Loader Master 5030, con el que se llevó a cabo la compactación estática con variación de velocidad. Seguido a esto, se evaluó el comportamiento mecánico de las briquetas fabricadas por medio del ensayo de Onda longitudinal con el equipo Pundit PL-200, y de esta forma, realizar un comparativo de los resultados obtenidos en este ensayo con la construcción de curvas de compactación que permitan evaluar la uniformidad de las briquetas y el efecto de la velocidad de compactación implementada.

Se asumió de forma experimental un rango para la variación de velocidad comprendida desde 5 hasta 25 mm/min, para lo cual se estableció cinco (5) variaciones de 5 mm/min en cada ensayo. Además, se realizó la publicación en una revista científica de Ingeniería un artículo científico que contiene los resultados obtenidos en la presente investigación.

6. MARCO DE REFERENCIA

6.1. MARCO TEÓRICO

La construcción de estructuras ingenieriles requiere de suelos que tengan buenas características de resistencia y capacidad portante que generalmente no son las que corresponden a las características de este, por lo que es necesario mejorar sus propiedades a partir de los métodos de compactación.

La compactación de suelos se utiliza para eliminar la cantidad de espacios vacíos presentes en su estructura con ayuda de la adición de una cantidad de energía mecánica y es evaluada por su peso unitario seco. Es necesario de ensayos de laboratorio para conocer la curva de compactación de la que es obtenido el contenido de humedad óptimo para alcanzar un peso unitario seco. Estos ensayos son normalizados y conocidos como ensayo Proctor Estándar y Proctor Modificado, los cuales son aplicados sobre muestras de materiales finos y en materiales gruesos.

6.1.1. Ensayo proctor modificado

La compactación de suelos se lleva a cabo con la aplicación momentánea de cargas provistas de maquinaria y equipo para mejorar de forma artificial características como el aumento de la resistencia al corte, aumento de la densidad, disminución de compresibilidad y permeabilidad. Este proceso se mejora al agregar una cierta cantidad de agua en el suelo que actúa como un lubricante entre sus partículas y permite un estado más denso de la misma. [5]

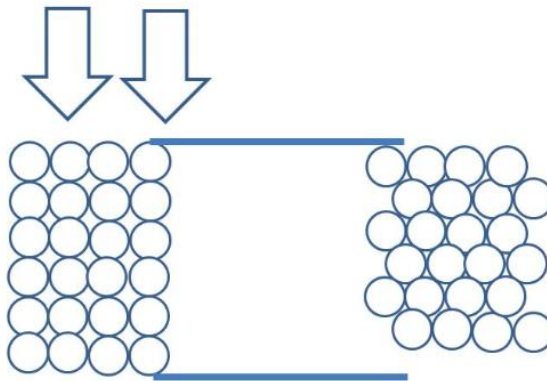


Figura 6.1. Compactación de material granular
Fuente: Buenfil Berzunza, 2007

De esta manera, en laboratorio es necesario determinar las características de compactación del suelo que permiten conseguir valores de densidad seca máxima

y humedad óptima de compactación para obtener el mejor resultado al momento de llevar a cabo la colocación en obra del material. En Colombia el ensayo de Proctor es una de las pruebas más estandarizadas para el estudio y el control de la calidad de la compactación de un material en la construcción de carreteras. Para esto, se determina la densidad máxima que es posible alcanzar en relación a su grado de humedad del material por medio de una gráfica que relacione estas variables y permita evaluar con mínimo cinco datos su valor en el punto máximo de una curva similar a una parábola.

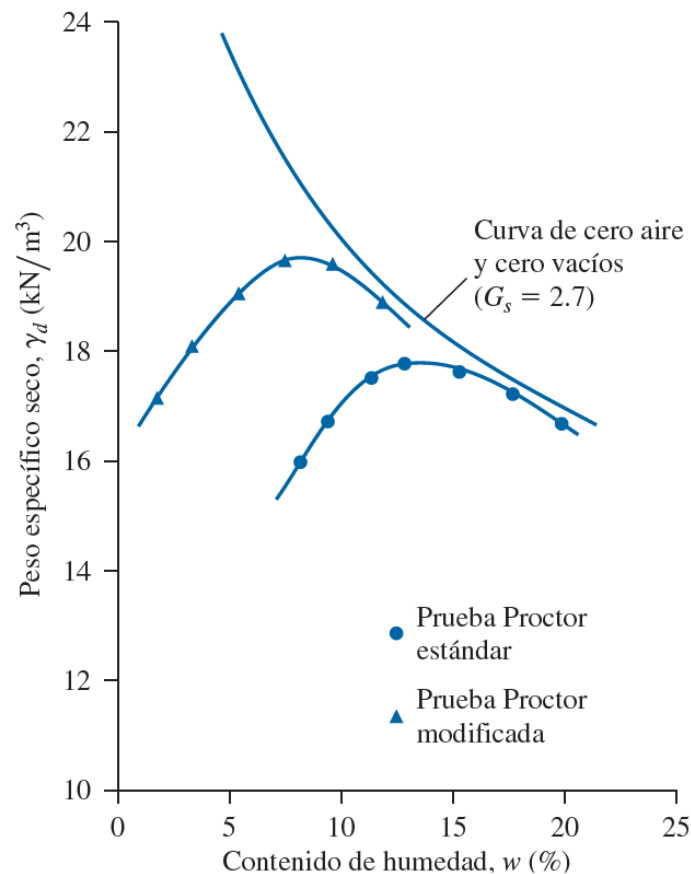


Figura 6.2. Curva de compactación Proctor estándar y modificado (método A) para un suelo limo arcilloso

Fuente: Fundamentos de Ingeniería de cimentaciones, Braja M. Das

El documento 142-13 del INVIAS establece los parámetros mínimos para llevar a cabo el ensayo de Proctor modificado con un martillo de 44.48 N que cae a una altura de 457.2 mm y las capas de preparan aproximadamente iguales con un determinado número de golpes distribuidos con el martillo operado manual o mecánicamente. Las especificaciones de cada método se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6.1. Métodos de compactación Proctor modificado

ESPECIFICACIONES	MÉTODO		
	A	B	C
DIÁMETRO DEL MOLDE	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
MATERIAL PASA EL TAMIZ N°	4.75 mm	9.5 mm	19.0 mm
CAPAS	5	5	5
GOLPES	25	25	56

Fuente: Artículo 142-07 INVIAS, 2014

Al elegir el método de compactación y definir los parámetros, es necesario calcular la humedad y la masa unitaria seca (ecuación 1 y 2) del suelo compactado, con el fin de calcular la humedad óptima de compactación.

$$W = \frac{A - B}{B - C} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$\delta d = \frac{\delta h}{w + 100} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde:

W: porcentaje de humedad de la muestra respecto a la masa seca del suelo

A: masa del recipiente y del suelo húmedo

B: masa del recipiente y del suelo seco

C: masa del recipiente

δd : masa unitaria seca (Kg/m^3)

δh : masa unitaria húmeda (Kg/m^3)

La energía dinámica específica se calcula mediante la ecuación 3, con la cual se pueden hacer diferentes ensayos mediante la combinación de cantidad de capas, golpes o tamaño del martillo.

$$Ee = \frac{N * n * W * h}{V} \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

N= Numero de capas

n= Número de golpes por capa

W= Peso del pistón

h= Altura de caída del pistón

V= Volumen del molde

6.1.2. Método de compactación estático

El método de compactación estático se realiza con la máquina “Master Loader” que se utiliza principalmente para medir los valores de resistencia al corte de muestras de material que pasan el tamiz N° 4 y debe ser como mínimo un 1/10 del diámetro de la muestra. El material es confinado en un molde a humedad constante y la compactación se lleva a cabo por un movimiento gradual de un pistón que produce una reducción rápida del índice de vacíos. Por esto se produce una deformación permanente en la estructura del suelo que modifica sus propiedades originales, su densificación, mayor rigidez, aumento de la permeabilidad y resistencia mecánica. [6]



Figura 6.3. Máquina Loader Master 5030
Fuente: <http://www.avantech.in>

La energía de compactación estática se calcula a través de la ecuación 4, la cual es la integración lineal entre la fuerza y el desplazamiento dando como resultado la ecuación 5.

$$\text{Trabajo} = \int_a^b \text{Fuerza} * \text{desplazamiento} \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$E_e = \frac{\text{Trabajo (kJ)}}{\text{Volumen (m}^3\text{)}} \quad \text{Ecuación (5)}$$

6.1.3. Especificaciones para sub-base granular (INVIAS)

En el artículo 320-13 del INVIAS se establece los tres tipos de Sub-Base Granular (A, B y C) en función de la calidad de los agregados y nivel de tránsito del proyecto.

Tabla 6.2. Tipos de Sub-Base Granular

CLASE DE SUB-BASE GRANULAR	NIVEL DE TRÁNSITO
CLASE C	NT1
CLASE B	NT2
CLASE A	NT3

Fuente: Artículo 320-13 INVIAS, 2013

Además, debe satisfacer unos requisitos mínimos de calidad de los agregados para la construcción Sub-Bases:

Tabla 6.3. Requisitos de calidad para agregados en construcción de Sub-Bases

ENSAYO	ESTADO	MÉTODO	NT1	NT2	NT3
Desgaste máquina de los Ángeles (500 revoluciones)	seco	INV. E-218, 2019	40% máx	44% máx	35% máx
	saturado		55% máx	55% máx	50% máx
Micro Deval	-	INV. E-238	-	30% máx	25% máx
10 % de finos	seco	INV. E.-224	-	70 kN mín	90 kN mín
	húmedo/sec o		-	75% mín	75% mín
Pérdida en solidez	Sulfato de sodio	INV- E-220	12% máx	12% máx	12% máx
	Sulfato de magnesio		18% máx	18% máx	18% máx
Limite líquido	-	INV. E-125	25% máx	-	-
Índice de plasticidad	-	INV. E-126	3% máx	0	0
Equivalente de arena	-	INV. E -133	30% mín	30% mín	30% mín
Azul de metileno	-	INV. E-235	10% máx	10% máx	10% máx
Terrones de arcilla y partículas deleznales	-	INV. E-211	2% máx	2% máx	2% máx
Partículas fracturadas	1 cara	INV. E-227	50% mín	70% mín	100% mín
	2 caras		-	50% mín	70% mín
Índice de aplanamiento	-	INV. E-230	35% máx	35% máx	35% máx

ENSAYO	ESTADO	MÉTODO	NT1	NT2	NT3
Índice de alargamiento	-		35% máx	35% máx	35% máx
Angularidad del agregado fino	-	INV. E-239	-	35% mín	35% mín
CBR	-	INV- E-148	80% mín	80% mín	95% mín

Fuente: Artículo 320-13 INVIAS, 2013

Los materiales granulares bien gradados que contengan finos no plásticos permiten alcanzar altas densidades en campo y facilitan el proceso de compactación debido a que los finos llenan los espacios entre las partículas de mayor tamaño [7]. La siguiente tabla muestra los valores típicos de las propiedades de tipos de suelos clasificados de acuerdo con Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS):

Tabla 6.4. Valores típicos de las propiedades de tipos de suelos

GRUPO	TIPO DE SUELO	RANGO DE DENSIDAD SECA MÁXIMA (kN/m ³)	RANGO DE HÚMEDAD ÓPTIMA (%)	RANGO DE CBR (%)
GW	Gravas limpias bien gradadas, mezcla de grava y arena	20-22	8 a 11	40 a 80
GP	Gravas limpias pobremente gradadas, mezcla de grava y arena	19-20	11 a 14	30 a 60
GM	Gravas limosas, gravas limo arenosas pobremente gradadas	19-22	8 a 12	20 a 60
GC	Grava arcillosa, grava arcillo arenosa pobremente gradadas	18.5-11.5	9 a 14	20 a 40
SW	Arenas limpias pobremente gradadas, arena gravosa	17.5-11.5	9 16	20 a 40
SP	Arenas limpias bien gradadas, mezcla de arenas y gravosas	16-19	12 a 21	10 a 40
SM	Arenas limosas pobremente gradadas	17.5-20	11 a 16	10 a 40
SM-SC	Arenas limo arcillosas con algo de finos plásticos	17.5-20	11 a 15	5 a 30
SC	Arenas arcillosas, mezcla de arena y arcilla pobremente gradadas	17-20	11 a 19	5 a 20
ML	Limos inorgánicos y limo arcillosos	15-19	12 a 24	15 o menos

Tabla 6.4. Valores típicos de las propiedades de tipos de suelos

GRUPO	TIPO DE SUELO	RANGO DE DENSIDAD SECA MÁXIMA (kN/m ³)	RANGO DE HÚMEDAD ÓPTIMA (%)	RANGO DE CBR (%)
ML-CL	Mezcla de limos y arcillas inorgánicos	16-19	12 a 22	
CL	Arcillas con plasticidad de baja a media	15-19	12 a 24	15 o menos
OL	Limos y arcillas orgánicos de baja plasticidad	13-16	21 a 33	5 o menos
MH	Limos arcillosos de alta plasticidad	11-15	24 a 40	10 o menos
CH	Arcillas de alta plasticidad	12-16.5	19 a 36	15 o menos
OH	Suelos orgánicos de alta plasticidad	10-16	21 a 45	5 o menos

Nota: Densidades (Proctor estándar) y CBR (Proctor modificado)

Fuente. Viveros Rosero Livaniel, 2014

6.1.4. Anisotropía en materiales granulares

Dentro de los factores que influyen en el comportamiento resiliente de material granular el principal corresponde a la magnitud del esfuerzo aplicado y otros factores que afectan son la anisotropía y la humedad. [7]

Para una capa de Sub-Base en pavimento flexible, los materiales granulares presentan anisotropía debido a sus diferentes formas y tamaños de partículas como consecuencia del efecto de compactación y carga en diferentes direcciones. Se establece con ensayos triaxiales cíclicos, que en los materiales granulares la rigidez lateral es menor en comparación con la vertical. [7]

El comportamiento anisotrópico en materiales granulares permite disminuir los errores en las simulaciones para predecir fenómenos como el agrietamiento por fatiga y el ahuellamiento en estructuras con capas asfálticas delgadas. [7]

La presencia de agua en un material granular genera un efecto lubricante entre sus partículas, incrementando la deformación y disminuyendo la rigidez del material. Además, se estima que existe un valor óptimo en el contenido de agua para el que la rigidez es máxima por la succión entre partículas. Si el contenido de agua aumenta con respecto al óptimo, la succión entre las partículas se pierde y genera un incremento en la presión de poros que disminuye la rigidez del material. [7]

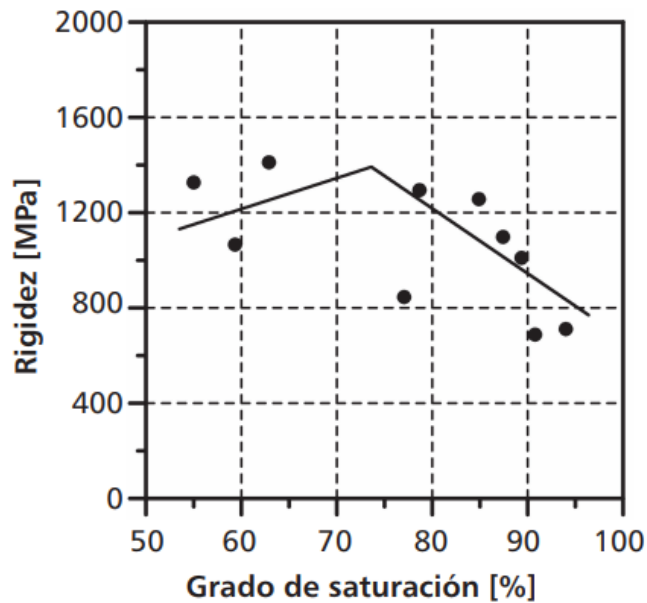


Figura 6.4. Efecto del grado de saturación sobre el módulo resiliente
Fuente: Magnúsdóttir & Erlingsson, 2002

6.1.5. Ensayo de velocidad de onda pundit

Las técnicas ultrasónicas consisten en generar una onda con frecuencias comprendidas entre los 0.5 MHz y 15 MHz, y pasar este impulso a través de la zona del elemento que se desea inspeccionar, desde el punto de generación hasta el punto donde se registra la llegada de la onda. El objetivo de este ensayo, es medir el tiempo que tarda una onda en recorrer el elemento desde el emisor hasta el receptor. [8]

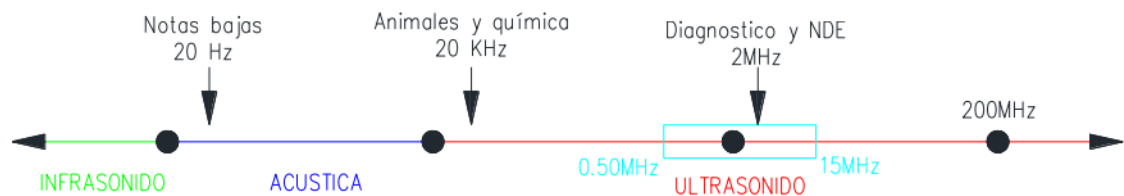


Figura 6.5. Representación del espectro de ondas
Fuente: Rimoldi & Mundo, 2012

Se establecen diferentes tipos de ondas de acuerdo a la dirección, velocidad y energía transportada, una de estas son las ondas longitudinales o de compresión (V_p) que se propagan perpendicularmente al plano y pueden ocurrir en cualquier medio material (sólido, líquido o gaseoso), las partículas más cercanas al generador de onda sufren un movimiento alternativo que genera una compresión en el sentido que avanza la onda seguido de una extensión de las partículas. [9]

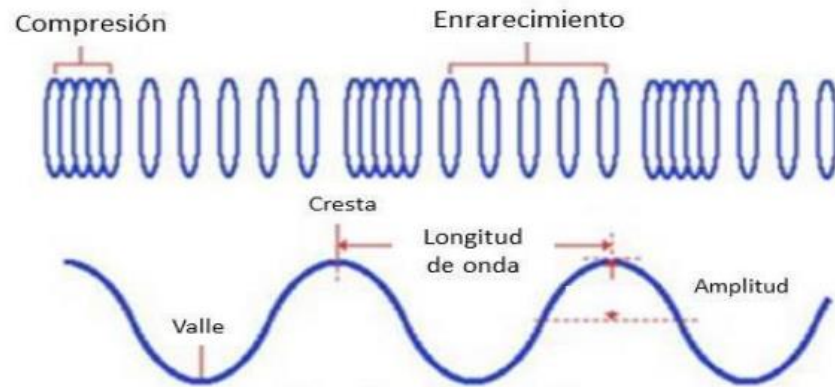


Figura 6.6. Comportamiento típico de una onda longitudinal
Fuente: Rimoldi & Mundo, 2012

Por otra parte, en las ondas transversales o de cortante (V_s) las partículas sufren una oscilación en dirección transversal a la dirección de propagación y solo puede realizarse en materiales en estado sólido. [9]

La velocidad de propagación para ondas longitudinales (Ecuación 6) y ondas transversales (Ecuación 7) se expresa de la siguiente manera:

$$V_p^2 = \frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)} \quad \text{Ecuación (6)}$$

$$V_s^2 = \frac{G}{\rho} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Donde:

E : módulo elástico

ρ : densidad

ν : relación de Poisson

G : módulo de rigidez

Sin embargo, Steven Kramer en 1996 [10] estableció una correlación entre la velocidad de onda longitudinal (V_p), velocidad de onda transversal (V_s) y el módulo de Poisson (ν) por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2 - 2\nu}{1 - 2\nu}} \quad \text{Ecuación (8)}$$

El equipo ultrasónico PUNDIT es ampliamente usado en laboratorio y en campo para el análisis de elementos de hormigón, dentro de sus funciones está la medición

tradicional de duración de recorrido, medición de longitud de recorrido, profundidad de grieta vertical y velocidad superficial., además, la forma de la onda puede visualizarse directamente en la pantalla de un PC. Este ensayo se usa generalmente para evaluar el estado del elemento en concreto, evaluar las fisuras y/o grietas presentes, ubicación de los refuerzos, entre otros. [11]



Figura 6.7. Equipo para pruebas de ultrasonido Pundit Lab
Fuente: G.I.S Ibérica S.L

6.2. MARCO CONCEPTUAL

6.2.1. Compactación de suelos

Las bases conceptuales del proceso de compactación de suelos son bien conocidas y derivan de la publicación pionera de Proctor (1933). Una vez definido un procedimiento de compactación y una energía del mismo, se comprueba que la densidad alcanzada por el suelo varía con la humedad, de manera que se encuentra, en general, una densidad máxima u óptima para una humedad inferior a la de saturación, humedad que suele corresponder a grados de saturación de 0.8-0.9. [12]

El estado de compactación queda así definido por dos variables de estado: la densidad seca, γ_d , y la humedad, w . En la práctica, el resto de propiedades de interés del suelo compactado (rigidez, respuesta frente a cambios de humedad, resistencia al esfuerzo cortante) quedarían esencialmente determinadas por los dos valores (γ_d , w) que se consiguen durante la compactación. Este cuadro general, establecido por Proctor, ha permanecido vigente durante décadas y sigue siendo el planteamiento en el que se apoyan las normas o pliegos de prescripciones de compactación de rellenos y terraplenes. [12]

6.2.2. Comportamiento mecánico

Las propiedades mecánicas pueden definirse como aquellas que tienen que ver con el comportamiento de un material bajo fuerzas aplicadas. Las propiedades mecánicas se expresan en términos de cantidades que son funciones del esfuerzo o de la deformación o ambas simultáneamente [13]. Las propiedades mecánicas fundamentales son la resistencia, la rigidez, la elasticidad, la plasticidad y la capacidad energética.

6.2.3. Densidad máxima seca y humedad óptima

La densidad máxima corresponde a la mayor densidad que puede alcanzar un suelo al ser compactado a la humedad óptima. Mientras que la humedad óptima es el porcentaje de humedad para el cual un suelo sometido a una energía de compactación determinada, presenta su máxima densidad. [14]

6.2.4. Granulometría

Se denomina clasificación granulométrica o granulometría, a la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios, así como de los suelos, con fines de análisis, tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas, y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica. [15]

6.3. ESTADO DEL ARTE

Existen trabajos e investigaciones limitadas en la literatura para la determinación de diferentes características de compactación estática. Hogentogler en 1937 fue quizás el primero en discutir sobre la presión estática y la compactación Proctor. Afirmó que el suelo debe compactarse a una presión estática de 130 libras por pulgada cuadrada (aproximadamente 896 kN/m²). La Highway Research Board en 1938 en una de sus reuniones anuales discutió sobre las densidades que varían con el contenido de humedad por diferentes métodos de compactación como impacto, estático y vibración. Bernhard y Krynine en 1952 hicieron una comparación entre las eficiencias de la compactación estática y dinámica. [16]

Reddy y Jagadish en 1993 obtuvo la relación de energía de compactación, densidad seca y humedad óptima por el método de compactación estática. Mesbah en 1999 introdujo la técnica de compactación cuasiestática; en ese trabajo, al comparar los resultados de la prueba se concluyó que esta técnica obtuvo una mayor densidad en comparación con el Proctor estándar, aunque se tuvo que duplicar la cantidad de energía. En 2006, Kenai resumió los resultados de un estudio experimental sobre el efecto de diferentes métodos de compactación en el rendimiento de suelos estabilizados. [16]

En 2010 Hafeez introdujo la prueba de presión estática, en la que se diseñó un nuevo molde para asegurar que el suelo en su interior tenga un grado de libertad para sumergirse bajo una excesiva compactación estática. En estas pruebas hicieron una comparación con el Proctor estándar, en lo cual encontraron que los resultados de la compactación estática tienen un contenido de humedad óptimo mayor y un valor de peso máximo unitario seco. [16]

La literatura anteriormente mencionada es importante en la trayectoria del desarrollo del método de compactación estático, pero es muy limitada por lo que no se dispone de resultados específicos que se puedan mencionar. Por esto, se ha realizado un seguimiento a los proyectos enfocados en los métodos de laboratorio de compactación de suelos.

En el año 1933, Reddy y Jagadish en su artículo *The static compaction of soils*, describieron el método de compactación estático, en el cual lo caracterizan en dos tipos: uno en donde aplican una tensión gradualmente hasta obtener la máxima tensión dependiendo del contenido de humedad, y otra donde se aplica una fuerza estática gradualmente hasta que alcanza un espesor específico. También comparan los resultados con los de la prueba de compactación Proctor, por lo que los resultados de la prueba de compactación estática se han reorganizado para producir curvas que relacionan la densidad seca y el contenido de humedad o valores de entrada de energía constante y los resultados de la prueba de compactación Proctor se superponen en las curvas obtenidas. Como resultado se obtiene que la

compactación estática es más eficiente que la dinámica, y que se estima el contenido de humedad óptimo con mayor precisión. [17]

En 1999, Mesbah, Morel y Olivier publicaron *Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents*, en el cual estudiaron el comportamiento de un suelo bajo en arcillas por medio del ensayo de compactación estático. En este, demostraron que la prueba de compactación en laboratorio permite obtener en un suelo las mismas características que la prueba in situ, es decir que se obtiene la misma densidad y contenido de humedad óptima. [18]

Hafez, Asmani y Nurbaya en 2010 en el proyecto *Static laboratory compaction method*, hicieron una comparación de la compactación dinámica y estática, en la cual se discute que la prueba Proctor no hay una uniformidad ni homogeneidad en las muestras obtenidas, además que lleva más tiempo hacerlas que en el estático y es un procedimiento de laboratorio caro, mientras que la prueba estática es una nueva invención como método de compactación en laboratorio que se describe como una prueba de mucho ahorro de tiempo y que es fácil de llevar a cabo con el uso de una bomba hidráulica y el diseño de un nuevo molde estático. [4]

En ese mismo año, estos mismos autores realizaron una investigación similar con base en los resultados anteriores donde encuentran que el método estático tiene una mayor densidad. A parte de esto, el ensayo dinámico da cantidad constante de energía para todos los tipos de suelos durante el proceso de compactación, mientras que la contribución de la energía de compactación estática es variada y depende de las características de los suelos. Los especímenes remodelados estáticos también han demostrado ser más de homogeneidad en la estructura a través de prueba de rayos X. [19]

Luego en 2012 Wu y Houben en su investigación *Effect of Different Laboratory Compacting Methods on the Properties of Cement Stabilized Materials* comparan los diferentes métodos de compactación (dinámico, estático y vibratorio) para establecer el idóneo en la estabilización de suelos con cemento. En este concluyen que: En cuanto a los materiales de arena no unidos, la compactación vibratoria conduce a una densidad sustancialmente mayor en comparación con la prueba de Proctor tradicional en la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca; En general, la compactación vibratoria también es capaz de aumentar la densidad de los materiales de cemento estabilizado de arena y arcilla arenosa; Mediante la utilización del martillo vibratorio, tanto la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción indirecta de cemento estabilizado de arena son dos veces más alta que mediante el uso de la compactación Proctor; De los resultados de esta investigación, el martillo vibratorio se ha demostrado para mejorar eficazmente las propiedades del cemento estabilizado materiales arenosos. Por lo tanto, puede ser adoptado como un método de compactación prometedor y rápida durante el proceso de estabilización. [20]

Consiguiente a esto, en el año 2014 Talukdar y Sharma en *Determination of caompaction characteristics of soil by static compaction method* hacen una comparación entre el método estático y dinámico, en el cual para el ensayo estático no se compacta el suelo en un solo espesor como se hace convencionalmente, si no por el contrario como en la prueba Proctor se compacta en tres diferentes capas. Se observa a partir de las curvas obtenidas que la densidad seca aumenta a su valor máximo y luego permanece constante con un aumento adicional de la presión estática, por lo que se concluye que compactar el suelo en tres diferentes espesores no da a lugar ninguna variación significativa en la densidad seca. Por ende, el suelo puede ser convenientemente lleno hasta una altura de 100 mm y se puede compactar de forma estática. [21]

Para el año 2015, Zhemchuzhnikov, Ghavami y Michel Casagrande en su investigación *Static compaction of soils with varying clay content* realizaron pruebas de compactación dinámicas y estáticas en 4 suelos, en el cual se pudiera verificar que aspectos intervenían en la obtención de los resultados. Se concluyó que la forma de las curvas de compactación estáticos dependía de las condiciones del ensayo, tal como las características del equipo con las que se realizan y el tipo de suelo, mientras que en la Proctor podría ser alterada por el tipo de molde a usar, el estado en el que se encontrara, la energía que se le aplicaba al pistón debido a que no era uniforme y a las condiciones de temperatura ambiente. [22]

Por último, en el año 2016 se hicieron varias investigaciones respecto al tema de compactación estática. Sharma y Deka en su artículo *Static compaction test and determination of equivalent static pressure*, hicieron pruebas a siete diferentes muestras de suelo inorgánico para determinar la presión estática equivalente. Como conclusión del artículo, la presión estática equivalente promedio fue alrededor de 845 kN/m², 788 kN/m² y 1426 kN/m² para la prueba de Proctor estándar. [23]

6.4. MARCO NORMATIVO

Tabla 6.5. Ensayos empleados para el proyecto

ENSAYO	FINALIDAD	NORMA
Límite líquido	Con este método se halla el contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado al horno, cuando este se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico	INV 125
Límite plástico e índice de plasticidad	Con este ensayo se obtiene la humedad a partir de la cual el suelo deja de tener un comportamiento frágil para pasar a tenerlo plástico, es decir, la humedad límite entre el estado sólido y el plástico	INV 126
Clasificación de suelos (Sistema AASHTO)	El sistema unificado de clasificación de suelos es utilizado para describir la textura y tamaño de las partículas de suelo, en este caso utilizado para caracterizar el material de Sub-Base Granular	INV 180
Sistema unificado de clasificación de suelos	El sistema unificado de clasificación de suelos es utilizado para describir la textura y tamaño de las partículas de suelo, en este caso utilizado para caracterizar el material de Sub-Base Granular	INV 181
Granulometría por tamizado	El ensayo de análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.	INV 123
CBR	Esta norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado relación de soporte de California, que es muy conocido debido a su origen, como CBR (California Bearing Ratio).	INV 148

Proctor modificado	Estos métodos de ensayo se emplean para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos compactados en un molde de un tamaño dado con un martillo de 4.54 Kg. (10 lb) que cae desde una altura de 457 mm (18").	INV 142
Velocidad de Onda PUNDIT	La medición de la velocidad de pulso es usada generalmente para la determinación de la uniformidad de concreto, la presencia de grietas o vacíos, cambios en propiedades con tiempo y en la determinación de propiedades dinámicas y físicas	EN12504-4 (Europa) ASTM C 597-02 (Norteamérica) ISO1920-7:2004 (Internacional)

Fuente: Autor

7. METODOLOGÍA

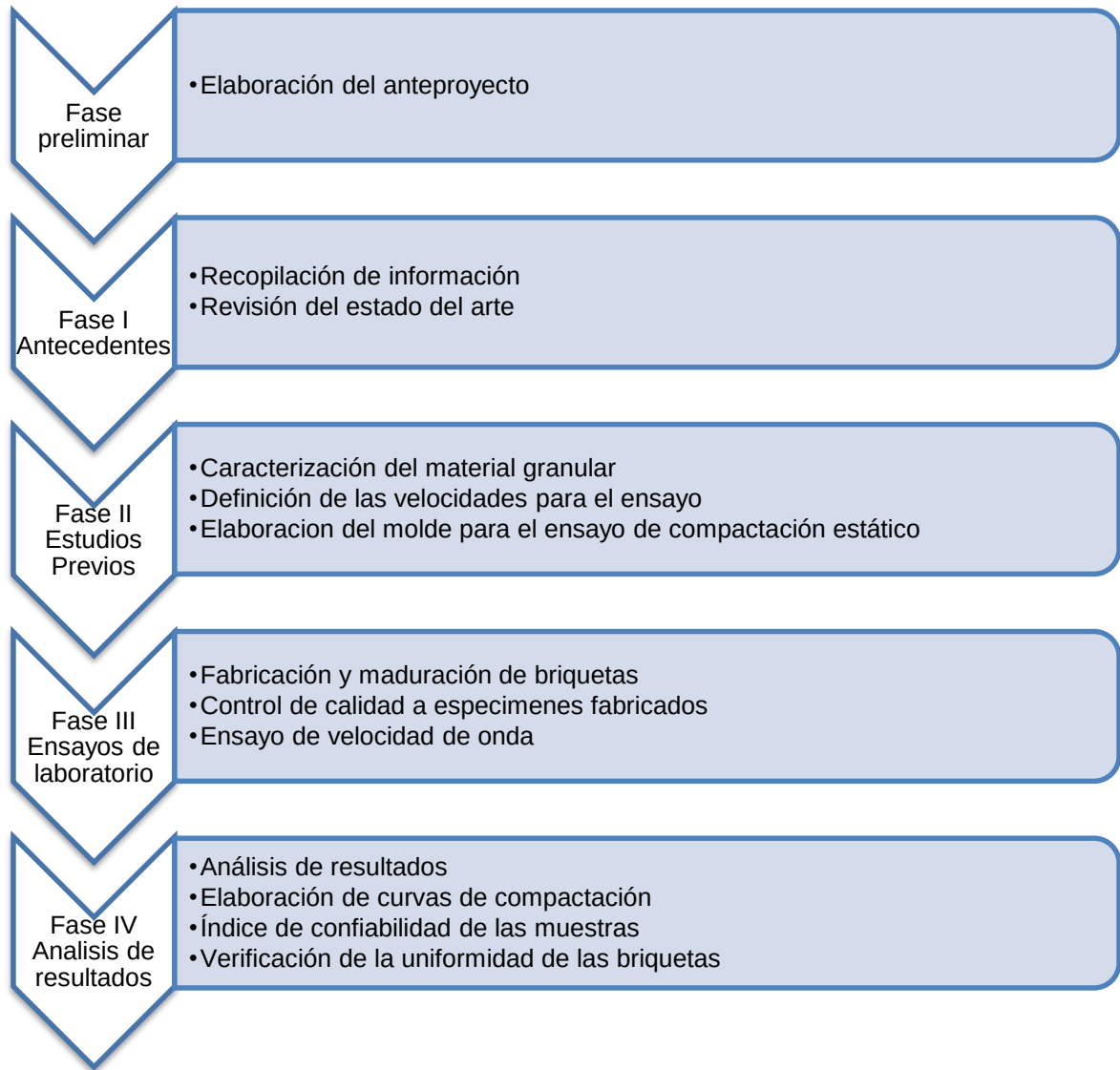


Figura 7.1. Descripción metodológica

Fuente: Autor

La metodología del presente proyecto es de tipo investigativa, con un enfoque cuantitativo y cualitativo, para determinar las variaciones de velocidad a la que serán sometidos los especímenes de Sub-Base Granular, el tipo y la cantidad de material que se va a utilizar en la elaboración de las briquetas y sus características. Además, de evaluar su comportamiento en laboratorio por medio del ensayo de velocidad de onda PUNDIT para determinar la uniformidad y confiabilidad del método de compactación estático.

7.1. FASE PRELIMINAR

En esta fase se llevó a cabo una revisión bibliográfica de la información referente al tema que permitiera la elaboración del anteproyecto con los siguientes apartados:

- Idea: Surge a partir del poco uso que tiene el ensayo estático como método de compactación de suelos en Colombia y el mundo.
- Planteamiento del problema: En esta sección se indaga sobre la eficiencia que tiene el método de compactación respecto a otros usados y normalizados en Colombia.
- Recolección de información y construcción del marco de referencia: Se lleva a cabo por medio de una consulta literaria en diferentes fuentes de información como trabajos de grado, revistas de investigación, documentos relacionados con el tema, artículos científicos elaborados por entidades públicas y particulares, con el fin de establecer el grado de conocimiento y ensayos realizados bajo este método de compactación.
- Alcance y objetivos de la investigación: Se establece la velocidad como la variable de análisis en la fabricación de los especímenes de material granular y el ensayo de velocidad de onda para evaluar la uniformidad y confiabilidad del método.
- Determinar el tipo de investigación: Se define un tipo de investigación descriptiva, con enfoque mixto cualitativo y cuantitativo.

7.2. FASE I: ANTECEDENTES

Esta fase tiene como punto de partida la información recopilada en la etapa anterior sobre el método de compactación estático y la normatividad que rige dicho ensayo, y de esta manera, establecer los implementos y el tipo de material necesario para la fabricación de las briquetas que, posteriormente se van a evaluar por medio de un equipo que mide la velocidad de onda a través de un medio sólido (Pundit Lab). Para la selección del material de cantera se llevaron a cabo visitas a diferentes empresas dedicadas a la explotación y comercialización de materiales pétreos en la ciudad de Villavicencio, esto con el fin de establecer el material que mejores características presentara, fue así que, el material seleccionado para la presente investigación proviene de la cantera de la empresa REX Ingeniería cuyo sitio de explotación es el río Guayuriba, ya que, esta nos proporcionó información referente a la calidad de sus agregados, presentaba un alto porcentaje de caras fracturadas y nos suministró la cantidad de material de Sub-Base Granular necesario para realizar los ensayos.

7.3. FASE II: ESTUDIOS PREVIOS

7.3.1. Caracterización del material granular

Una vez seleccionado el material granular, se establece realizar cinco (5) ensayos normalizados por el INVIAS en la sección 100-suelos, para revisar el estado y las características que presenta el agregado pétreo. Los ensayos son los siguientes:

Tabla 7.1. Ensayos para la caracterización del material granular

Ensayo	Norma
Límite líquido	INV 125
Límite plástico e índice de plasticidad	INV 126
Sistema unificado de clasificación de suelos	INV 181
Clasificación de suelos (Sistema AASHTO)	INV 180
Granulometría por tamizado	INV 123
CBR	INV 148
Proctor modificado	INV 142

Fuente: Propia

Una vez obtenidos los resultados de laboratorio, se revisaron y compararon estos datos con los requisitos de calidad para Sub-Base Granular que establece la norma INVIAS en el capítulo 3 (Artículo 320) y de esta manera, se pudo obtener un patrón de referencia acerca de la composición del material granular en su estado natural, conocer el contenido de humedad óptimo y densidad seca máxima, datos necesarios al realizar la mezcla del material para la fabricación de las briquetas en la maquina Loader Master 5030.

7.3.2. Definición de las velocidades para el ensayo

De acuerdo a la revisión documental realizada, el método de compactación estático se ha estudiado y evaluado principalmente para realizar un comparativo entre los valores obtenidos de densidad máxima seca y humedad óptima respecto al método dinámico (Proctor) en determinados tipos de suelos, por esta razón, no se encuentra información de ensayos que establezcan como variable de análisis la velocidad de compactación, pese a esto, se determinó a criterio y como medio experimental la evaluación de 5 tipos velocidades con valores de 5mm/min, 10 mm/min, 15 mm/min, 20mm/min y 25 mm/min.

La máquina Loader Master 5030 permite ingresar el valor de velocidad dentro de su panel de control y de esta forma, establecer este dato como constante durante el proceso compactación de la muestra.

7.3.3. Elaboración del molde para el ensayo de compactación estático

Debido a las dimensiones de la celda de carga que viene con la máquina Loader Master 5030, fue necesario la construcción de un molde en acero galvanizado de 5 cm de diámetro y 10 cm de altura que incluye una abertura en la parte lateral por medio de una rosca y un collar de extensión de aproximadamente 7,6 cm, además, una placa base del mismo material.

7.4. FASE III: ENSAYOS DE LABORATORIO

7.4.1. Fabricación y maduración de briquetas

Los especímenes se fabricaron en el molde mencionado anteriormente de tal forma que todos quedaran con dimensiones de 10 cm de altura y 5 cm de diámetro, por medio de la Máquina Loader Master 5030, en la cual se insertaba el valor de velocidad correspondiente dentro del rango establecido de 5mm/min a 25 mm/min, la mayoría de estos alcanzaron como fuerza máxima aplicada por la celda de carga unos 30 kN, momento en el cual se detenía la compactación del material.

La cantidad total de muestras elaboradas fueron 5 por velocidad de compactación, las cuales después de sacarse del molde se expusieron quince días (15) a temperatura ambiente para su secado y facilidad de manipulación.

7.4.2. Control de calidad a especímenes fabricados

Se realizó una inspección visual del estado de las muestras fabricadas, descartando aquellas que presentaran algún tipo de fisura, desportillamiento de esquina y/o tuvieran dimensiones que no correspondían a las establecidas anteriormente, y de esta forma, realizar la evaluación a aquellos especímenes seleccionados con características similares y sin afectaciones.

7.4.3. Ensayo de velocidad de onda

Este ensayo se realizó únicamente a los especímenes seleccionados, por medio de un equipo de laboratorio cuya marca se denomina "PUNDIT", el cual permitió evaluar y comparar la uniformidad de las muestras compactadas a distintas velocidades, a partir de la medición de la velocidad de pulso ultrasónico a lo largo de la muestra, registro del tiempo de recorrido de la onda y mostrando de forma gráfica el comportamiento de las partículas en el espécimen. Esto nos permitió establecer un patrón de referencia respecto a las discontinuidades y nivel de compactación alcanzado por las briquetas con determinada velocidad.

7.5. FASE IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con la información obtenida en las etapas anteriores fue posible realizar un análisis del comportamiento mecánico en los especímenes fabricados, ya que, por medio de estos datos fue posible evidenciar la interacción y la forma en que se organizan las partículas del material granular al ejercer las diferentes velocidades de compactación en forma constante por el método estático a través del equipo Loader Master (elaboración de curvas de compactación). A partir de esto también, se pudo establecer un campo de estudio futuro a fin de evaluar la eficiencia de este método en comparación con otros normalizados en Colombia, analizando otras variables relevantes dentro del área de la ingeniería y en especial de la construcción de carreteras.

8. RESULTADOS Y ANÁLISIS

8.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL GRANULAR

El sitio de obtención del material necesario para la realización de la investigación, se ubica en el kilómetro 9 por la carretera del amor en el Municipio de Villavicencio, Meta. La empresa REX Ingeniería es la encargada de la explotación de este material pétreo proveniente del río Guayuriba, cuya comercialización se central en material para construcción de carreteras (sub-base y base granular), agregados para concreto y productos de selección directa.



Figura 8.1. Planta de producción de materiales pétreos REX Ingeniería S.A
Fuente: <https://rexingenieria.com/produccion/>

8.1.1. Ensayos de laboratorio

El material utilizado para los ensayos corresponde a una Sub-Base Granular ampliamente comercializada para la construcción de estructuras viales en la región.

Para la determinación del tamaño de las partículas del suelo se llevó a cabo el proceso de tamizado, el cual determinó que un 56.82% del material corresponde a grava, 40.97% arenas y el 2.22% a finos, como se relaciona en la tabla 8.1.

Tabla 8.1. Determinación del tamaño de las partículas del suelo por tamizado

TAMIZ		MASA RETENIDA (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
ALTERNO	MILÍMETROS			
1"	25	0	0.00	100.00
3/4"	19	366.6	14.30	85.70
3/8"	9.5	578.4	22.56	63.14
N° 4	4.75	511.8	19.96	43.18
N° 10	2	280	10.92	32.26
N° 20	0.85	221.4	8.63	23.63
N 40	0.425	178	6.94	16.68
N° 60	0.25	118	4.60	12.08
N° 140	0.106	222.9	8.69	3.39
N° 200	0.075	30.1	1.17	2.22

Fuente: Autor

Debido a que este material granular se encuentra compuesto principalmente por gravas y arenas se determinó que, la sub-base no tiene límites de Atterberg pues presenta un bajo contenido de porción fina. La consistencia del material en el ensayo se puede observar en la figura 8.2.



Figura 8.2. Muestra de material para ensayo de Límites de Atterberg

Fuente: Propia

De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo INV 125 y INV 126, y la distribución granulométrica anterior, este material se clasifica como un suelo A-1-a de acuerdo a la metodología American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y como Grava bien gradada (GW) por el Sistema Unificado de Suelos (SUCS), a la sección fina no se le realizó ningún tipo de ensayo.

A partir de la curva obtenida del ensayo de granulometría (figura 8.3) se determinaron parámetros secundarios como son el coeficiente de curvatura (C_c) y el coeficiente de uniformidad (C_u) con los diámetros característicos D_{10} , D_{30} y D_{60} , donde la “D” hace referencia al tamaño de la partícula del material en mm y el subíndice numérico es el porcentaje de suelo que queda en dicha abertura. Se obtuvo un valor de 1.592 para C_c y 42.375 para C_u , esto representa que los granos del suelo poseen una variación considerable en cuanto a sus tamaños y una buena gradación con bajo contenido de vacíos que permiten al suelo ser menos compresible y más impermeable.

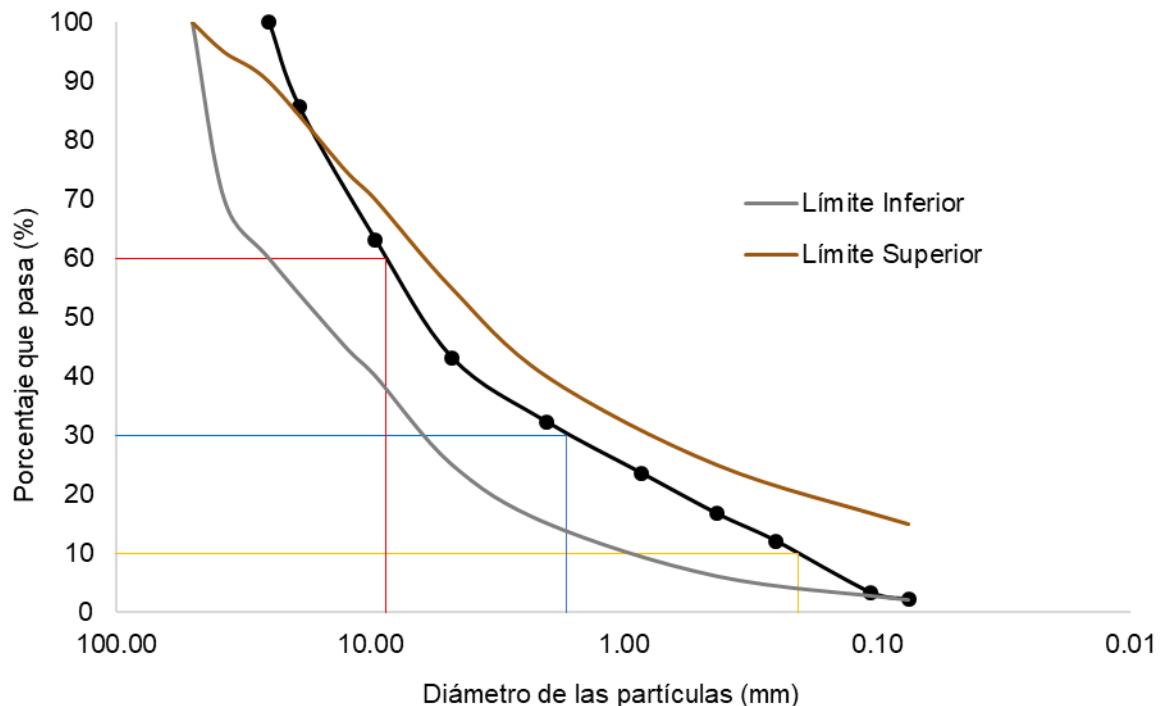


Figura 8.3. Curva Granulométrica de Material en Estudio
Fuente: Autor

Para el ensayo INV E 142-13 mediante el método A se determinó un valor para la densidad seca máxima de $2.11 \frac{gr}{cm^3}$ con un contenido de humedad de 8%.

La curva de relación Humedad-Densidad seca máxima se presenta en la figura 8.4.

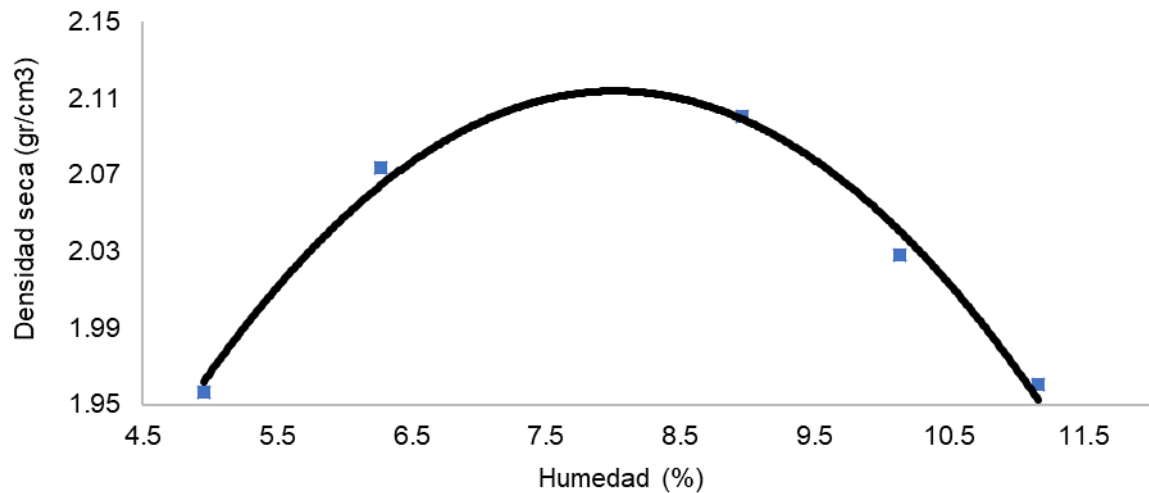


Figura 8.4. Relación humedad-Densidad Seca Máxima
Fuente: Autor

Posteriormente, se llevó a cabo el ensayo normalizado en el INVIAS en la sección 148 para hallar el valor de CBR del material granular.

Con los valores de penetración y fuerza de compactación de la máquina utilizada, se procedió a calcular los valores de esfuerzo en Mpa, los cuales se evidencian en la siguiente tabla:

Tabla 8.2. Relaciones de soporte para el material granular

GOLPES	10	25	56	10	25	56
PENETRACION (mm)	CARGA (kN)			ESFUERZO (MPa)		
0	0	0	0	0	0	0
0.64	0.08	0.45	0.95	0.04	0.23	0.48
1.27	0.16	1.15	2.21	0.08	0.59	1.13
1.91	0.32	2.31	3.8	0.16	1.18	1.94
2.54	0.63	3.56	5.45	0.32	1.81	2.78
3.18	1.2	4.88	7.21	0.61	2.49	3.67
3.81	1.82	6.44	9.4	0.93	3.28	4.79
4.45	2.69	7.72	11.87	1.37	3.93	6.05
5.08	3.78	9.3	14.54	1.93	4.74	7.41
7.62	7.29	15.2	24.12	3.71	7.74	12.28
10.16	10.99	21.4	32.89	5.60	10.90	16.75
12.7	13.9	26.3	40	7.08	13.39	20.37

Fuente: Autor

A partir de los datos generados en la tabla anterior, se realizó la gráfica de esfuerzo vs penetración en donde se busca hallar los valores correspondientes a las 0.1 y 0.2 pulgadas de penetración en cada muestra con sus respectivas compactaciones.

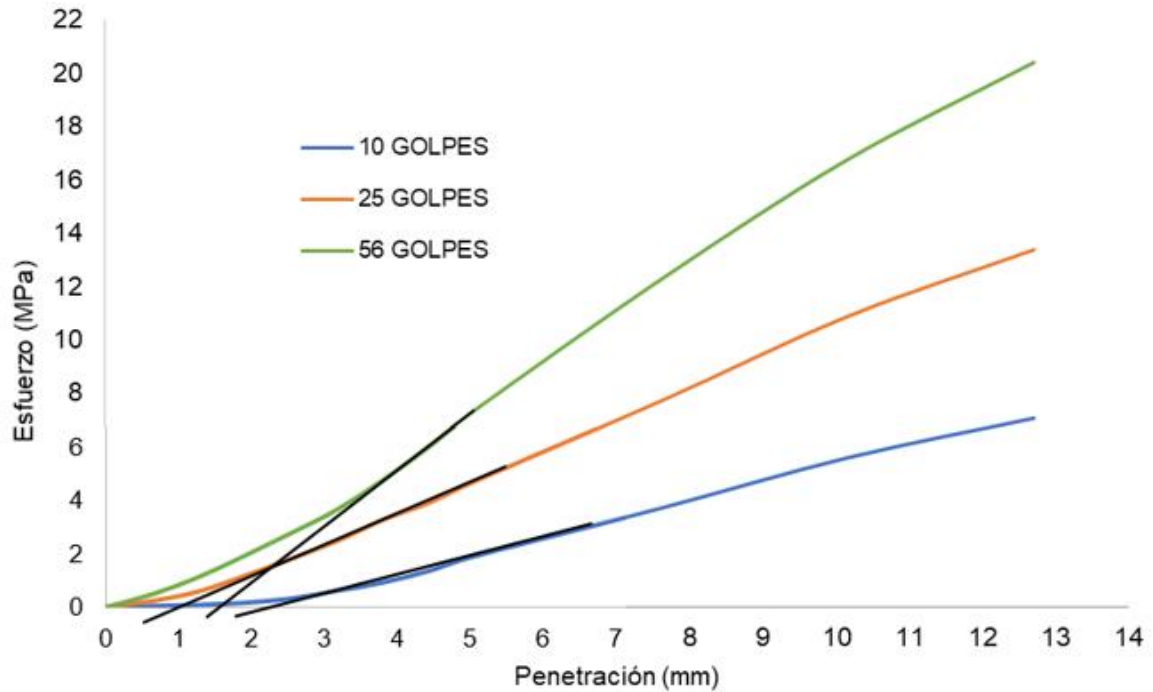


Figura 8.5. Curva Penetración – Esfuerzo
Fuente: Autor

Al realizar el anterior gráfico se observó que se tenían puntos de inflexión, es decir, cambios de curvatura, por lo que se hizo la respectiva corrección trazando una tangente que permite trasladar el eje de ordenadas y haciendo este como nuevo origen para así calcular las penetraciones.

Tabla 8.3. Relación de soporte para el esfuerzo máximo

10 Golpes			25 Golpes			55 Golpes		
Penetración (Pulg)	Esfuerzo (Mpa)	CBR %	Penetración (Pulg)	Esfuerzo (MPa)	CBR %	Penetración (Pulg)	Esfuerzo (MPa)	CBR %
0,1	1,3	18,84	0,1	2,9	42,03	0,1	5	72,46
0,2	3,3	32,04	0,2	5,8	56,31	0,2	9,9	96,12

Fuente: Autor

Luego de realizar la corrección en las curvas, se estableció los nuevos valores de las presiones que intersectan en la gráfica a 2.54 mm (1") y 5.08 mm (2"), con esto se calcula el valor de CBR para ambos casos teniendo en cuenta los esfuerzos de referencia que se establecen la norma INVIAS, se seleccionó el esfuerzo máximo

definidos a 2.54 mm (1") en los tres casos y se halló el valor correspondiente de densidad seca como se muestra en la siguiente gráfica:

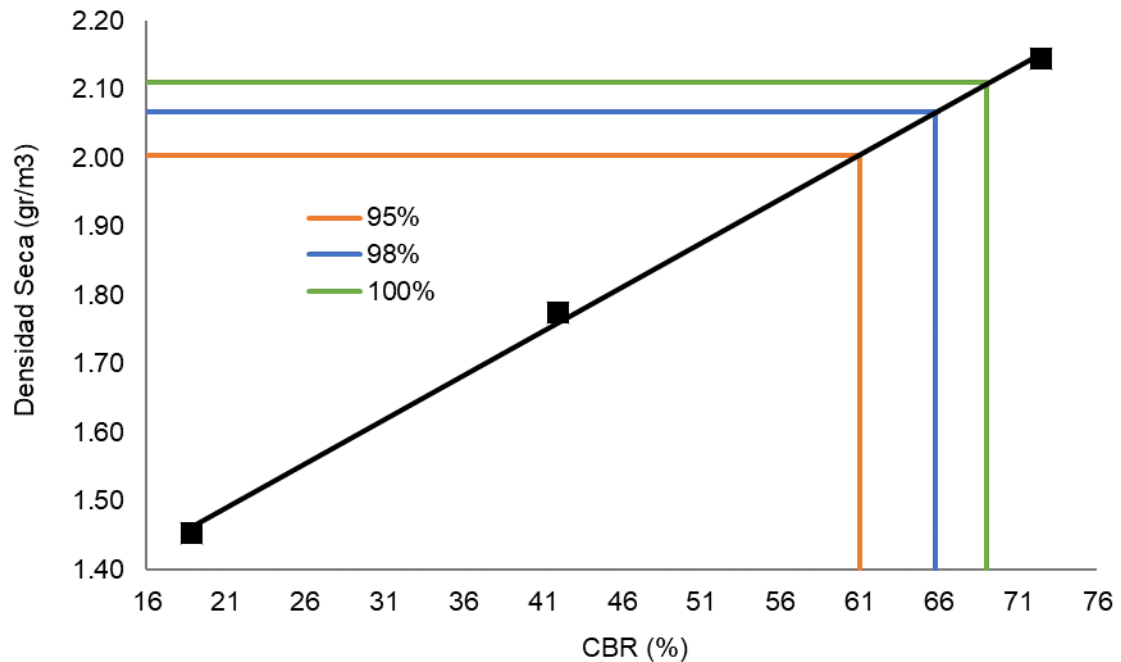


Figura 8.6. Valores de CBR vs Densidad seca para 10, 25 y 56 golpes
Fuente: Autor

Con esta grafica se determinó los valores de CBR al 95%, 98% y 100% de la densidad seca máxima obtenida anteriormente del ensayo Proctor Modificado.

Tabla 8.4. Determinación de los valores para CBR y densidad seca

Porcentaje de Compactación (%)	Densidad Seca (kg/m3)	CBR (%)
100	2110	69
98	2067.8	65.8
95	2004.5	61

Fuente: Autor

8.2. FABRICACIÓN DE BRIQUETAS

Para la elaboración de los especímenes se utilizó el método de compactación estático denominado volumen constante presión variable (Venkatarama Reddy & Jagadish, 1993), en el cual se aplica una fuerza estática variable a una tasa definida, que es aplicada por el pistón de la prensa en el ensayo CBR y Marshall, a una masa de suelo determinada hasta alcanzar la altura final de la probeta conociendo el diámetro de esta y controlando la distancia que recorre el pistón.

8.2.1. Material para elaboración de briquetas

El material utilizado fue únicamente el que pasa por el tamiz N°4 con abertura de 4.76 mm, cumpliendo con los tamaños mínimos de partículas exigido por la norma ASTM D 4015 de un décimo del diámetro del espécimen (5.08 mm).



Figura 8.7. Material granular para elaboración de especímenes
Fuente: Propia

8.2.2. Cuantificación del material granular

El material necesario para fabricar cada espécimen se halló de acuerdo con el ensayo de humedad-densidad (Proctor modificado) donde se requirió un 8% de humedad para alcanzar el peso unitario seco máximo de $2.11 \frac{gr}{cm^3}$. El volumen para una briqueta de $\varnothing=2"$ y $L=4"$ corresponde a 196.25 cm^3 , por lo que se necesita una masa de material seco de 414.09 gr y una cantidad de 33.13 ml de agua.



Figura 8.8. Muestra de material húmedo
Fuente: Propia

8.2.3. Preparación de las briquetas

Para la realización del ensayo de compactación estático y teniendo en cuenta el diámetro de las briquetas, se fabricó un molde metálico en acero galvanizado A36 con una pared de espesor de 5 mm que se compone de una base cuadrada, una camisa principal de 2" de diámetro y 4" de longitud de apertura lateral ajustable mediante un tornillo y un collar de extensión de 8 cm asegurable a la base principal (ver figura 8.9.).

El diseño permite que el collar tenga una apertura lateral de manera que se puedan extraer las muestras sin sufrir alteraciones en sus propiedades físicas.



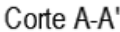
Figura 8.9. Molde metálico para el método de compactación estático
Fuente: Propia



Figura 8.10. Extracción de espécimen del molde
Fuente: Propia

Este molde permite la fabricación de especímenes que pueden ser utilizados en el equipo de compresión inconfiada, columna resonante, triaxial, entre otros.

Luego se colocó la masa de suelo dentro de los moldes en aproximadamente 3 capas para luego ser compactadas levemente por un pistón.



Fuente: Páez John & Díaz Cruz, 2019

8.2.4. Compactación

de 2,3 cm y llega a una carga máxima de 36 kN



Figura 8.12. Compactación estática del material granular
Fuente: Propia



Figura 8.13. Especimen compactado y extraído del molde
Fuente: Propia

8.2.5. Resultados del equipo loader master 5030

Una vez compactados los especímenes en el equipo, se descargaron los datos para luego ser analizados y graficados como se muestra en la siguiente figura:

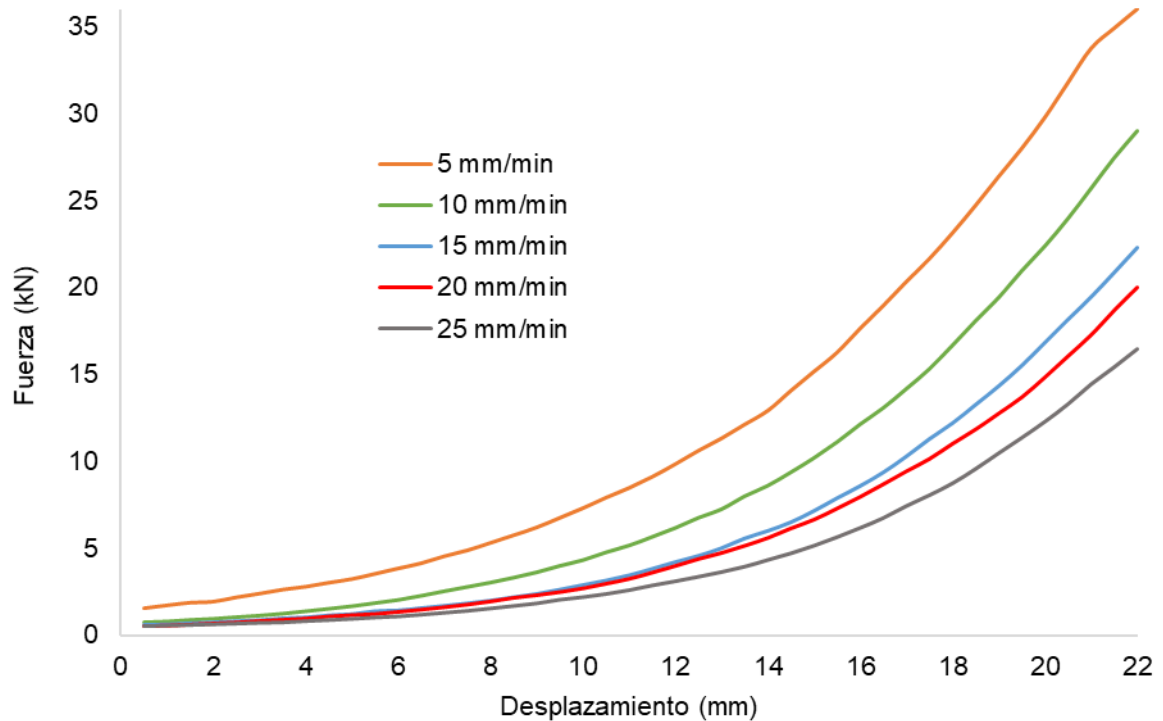


Figura 8.14. Comportamiento de espécimen compactado por el método estático a diferentes velocidades

Fuente: Propia

Para la construcción de la gráfica se obtuvo los datos más representativos de cada velocidad de compactación, es así que podemos evidenciar que los especímenes compactados son inversamente proporcionales, es decir, a una menor velocidad de carga se obtuvo una mayor fuerza de compactación, mientras que los de mayor velocidad la fuerza fue menor.

8.3. ENSAYO DE VELOCIDAD DE ONDA

Los especímenes elaborados tuvieron una etapa de secado total de 15 días a temperatura ambiente, luego de esto, se seleccionaron aquellos que presentaban menos afectaciones físicas como fisuras, desportillamiento de esquina y que cumplieran con las dimensiones de 10cmx5cm establecidas inicialmente, de esta manera, se llevó a cabo el ensayo de velocidad de onda con el equipo ultrasónico

PUNDIT PL-200 de marca Proceq ubicado en la Universidad Santo Tomás sede de Bogotá.

Se realizó este ensayo a un total de 13 muestras por medio de la medición de velocidad de onda longitudinal (V_p) y tiempo en cada uno de los especímenes, aplicando la ecuación (8) propuesta por Kramer se calculó el valor correspondiente de la Velocidad de onda transversal (V_s) asumiendo un valor de 0.35 para el módulo de Poisson (ν) aplicado generalmente para materiales granulares.

Inicialmente, se configuro el equipo insertando los valores solicitados e instalando los 2 transductores de 54 kHz para ejecutar el ensayo a cada uno de los especímenes. El equipo PUNDIT muestra el resultado por medio de una gráfica que permite visualizar el recorrido de la onda a lo largo de la muestra, si la oscilación de esta onda es uniforme se presume que las partículas en el espécimen se encuentran agrupadas de forma homogénea y existe poca presencia de vacíos entre ellas, mientras que, los cambios fuertes que generan aumento o disminución de la onda demuestran alteración en la agrupación de las partículas.

A continuación, se muestran las gráficas obtenidas del equipo PUNDIT tras la aplicación del ensayo:

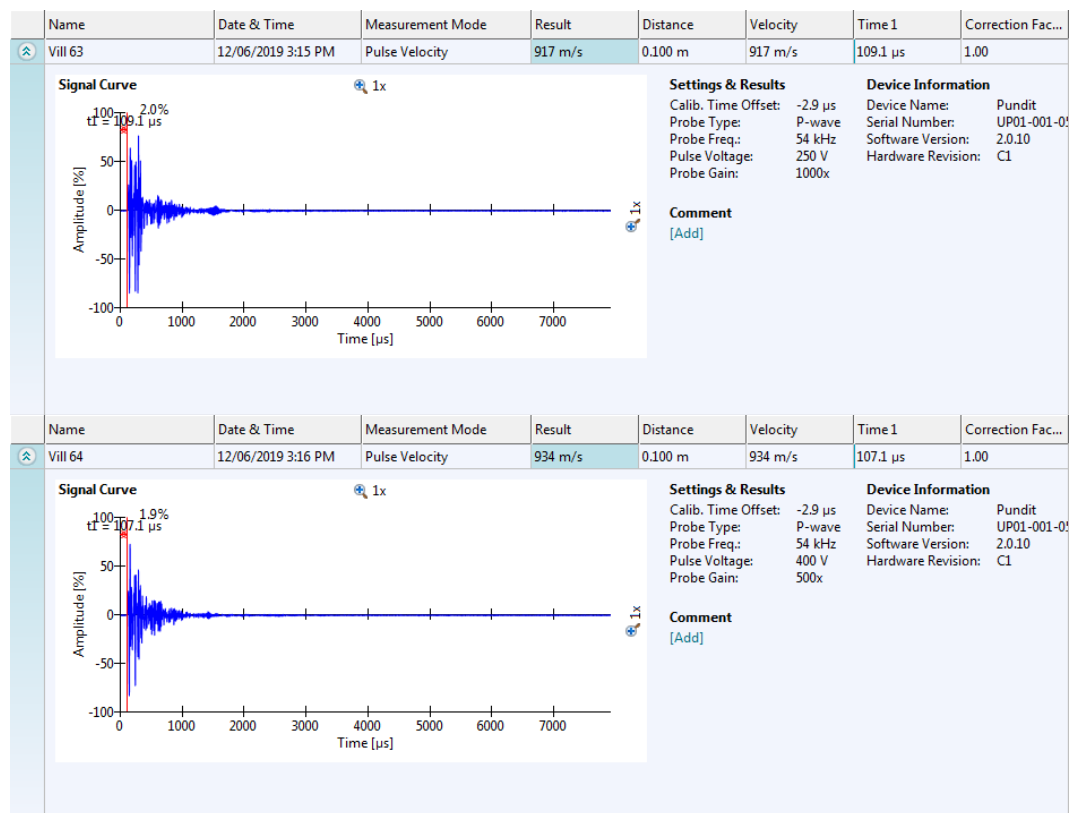


Figura 8.15. Velocidad de onda de espécimen compactado a 5 mm/min

Fuente: Propia

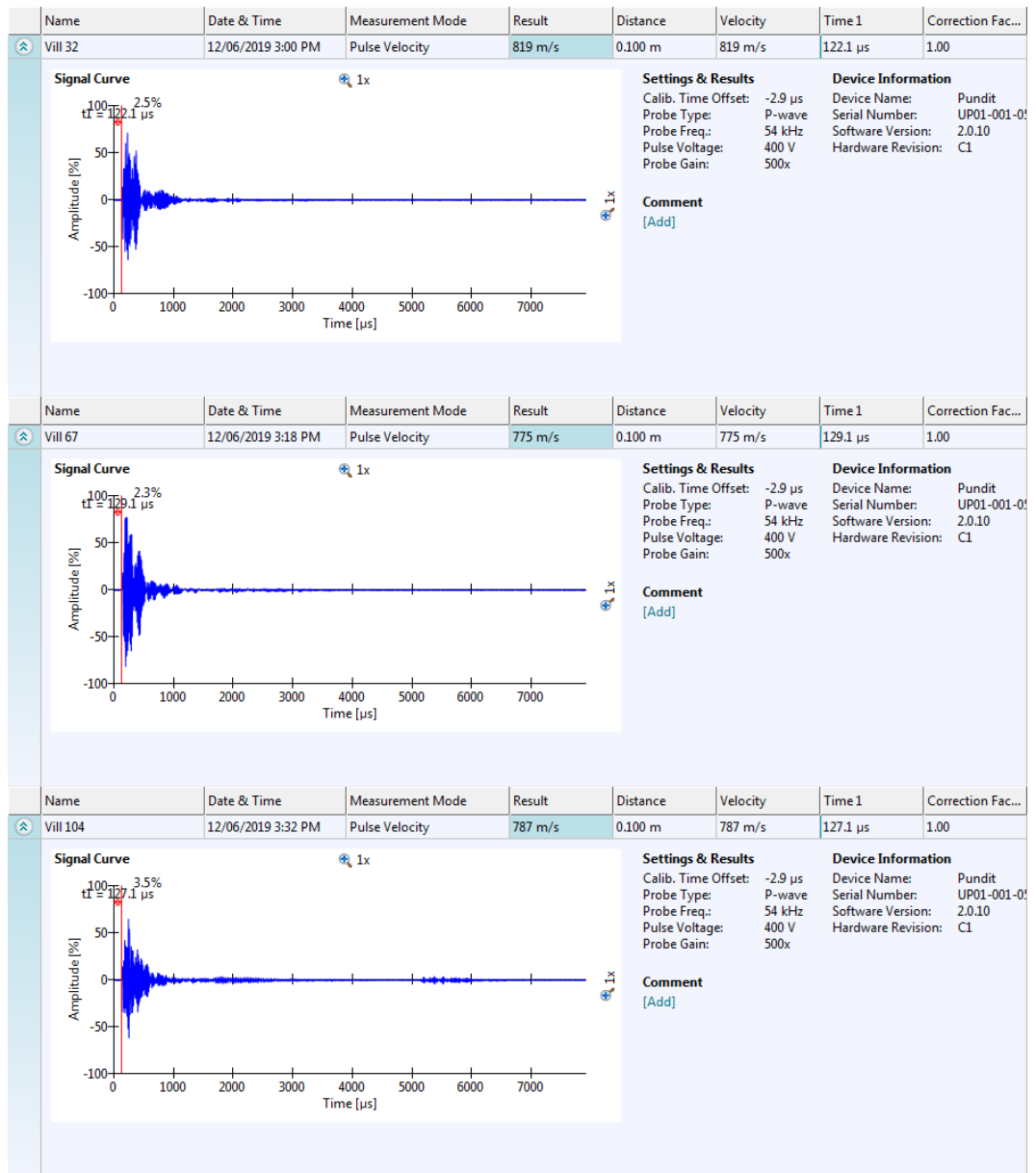


Figura 8.16. Velocidad de onda de espécimen compactado a 10 mm/min
Fuente: Propia

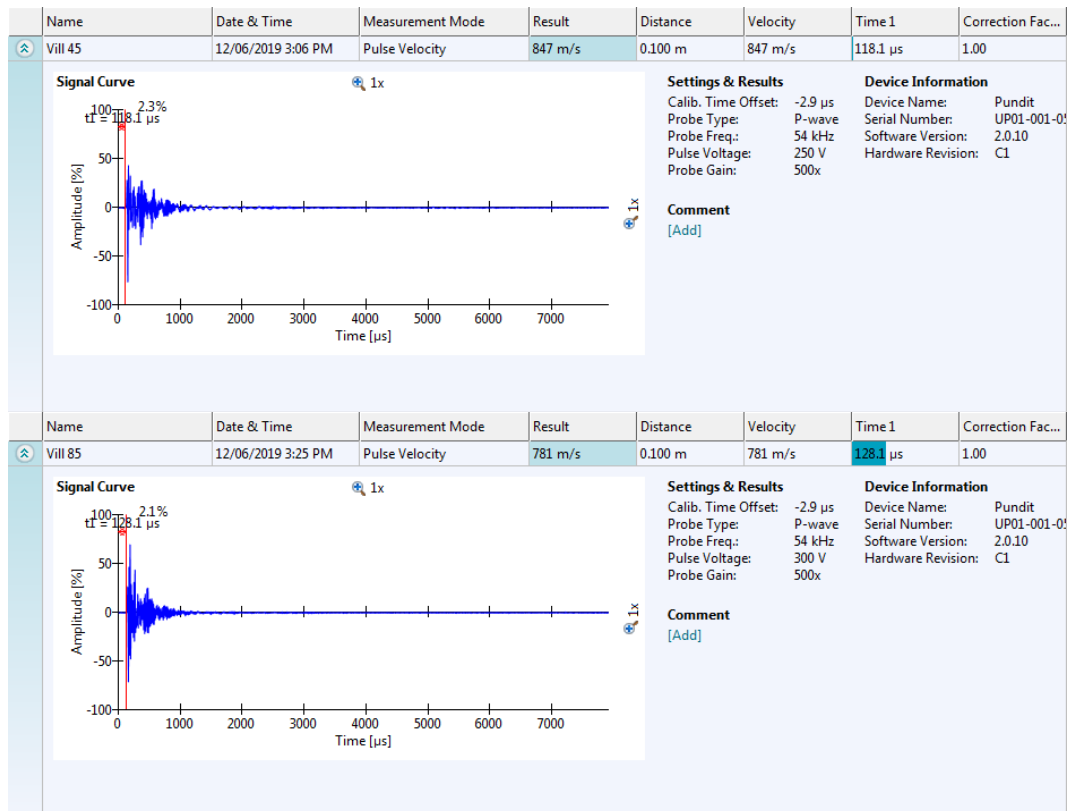


Figura 8.17. Velocidad de onda de espécimen compactado a 15 mm/min
Fuente: Propia

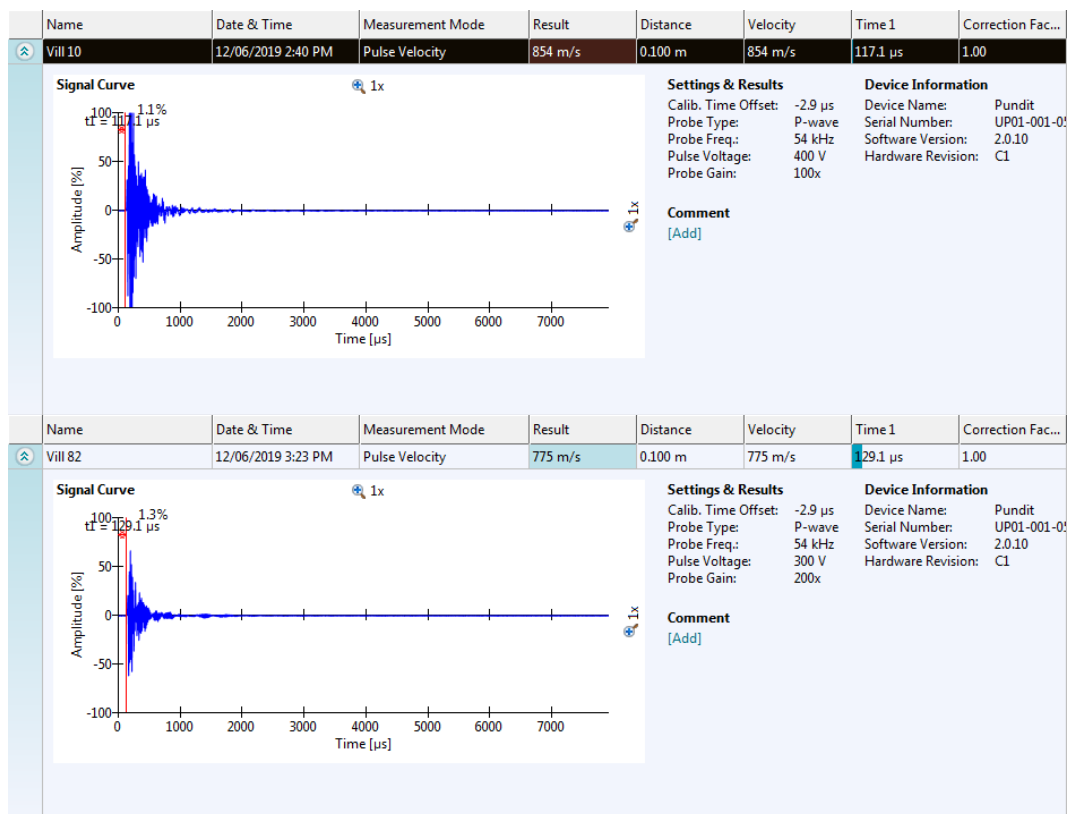
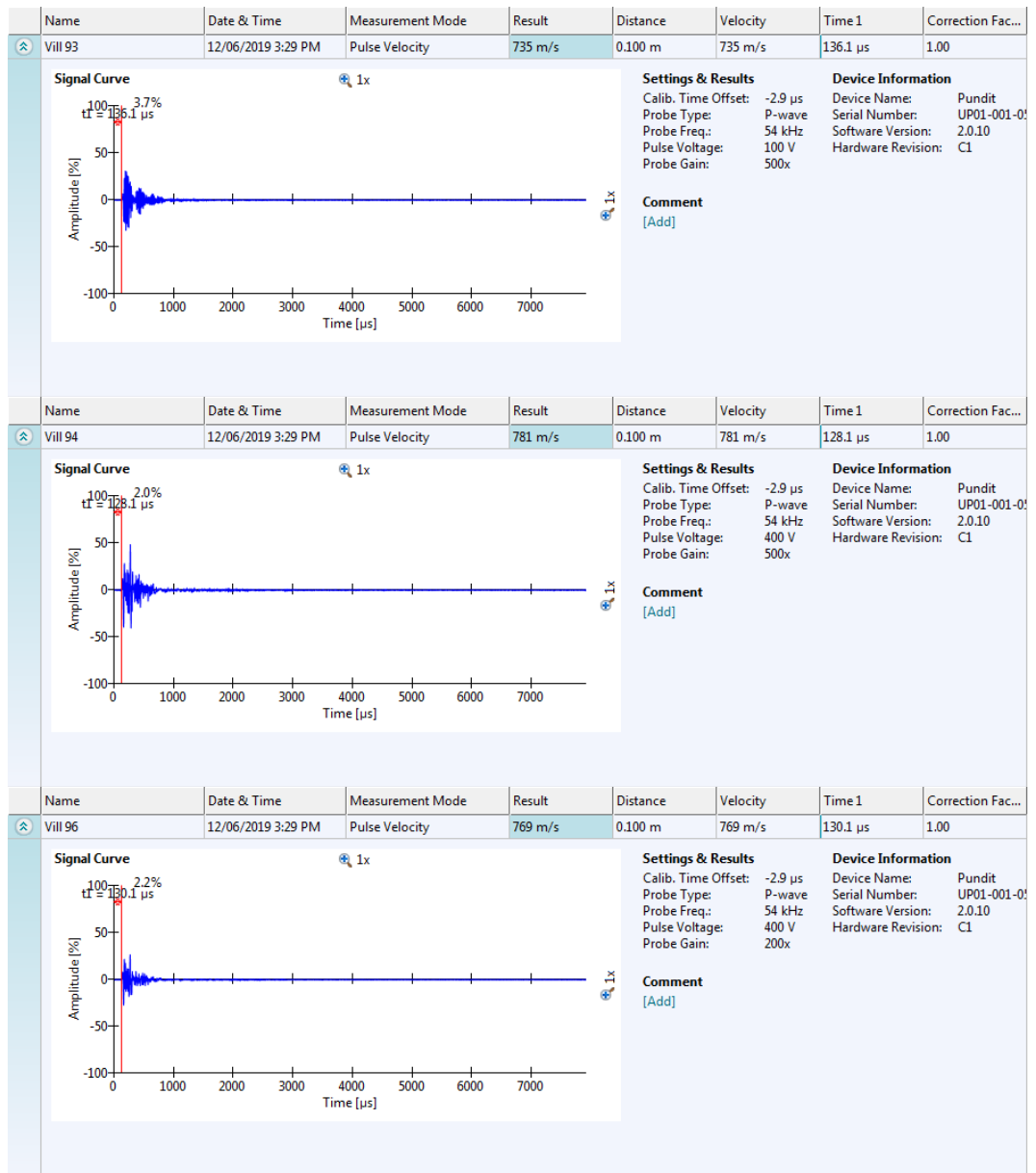


Figura 8.18. Velocidad de onda de espécimen compactado a 20 mm/min
Fuente: Propia

Evaluar el comportamiento mecánico para el método de compactación estático variando la velocidad de carga en especímenes elaborados con Sub-Base de 5 a 25 mm/minuto



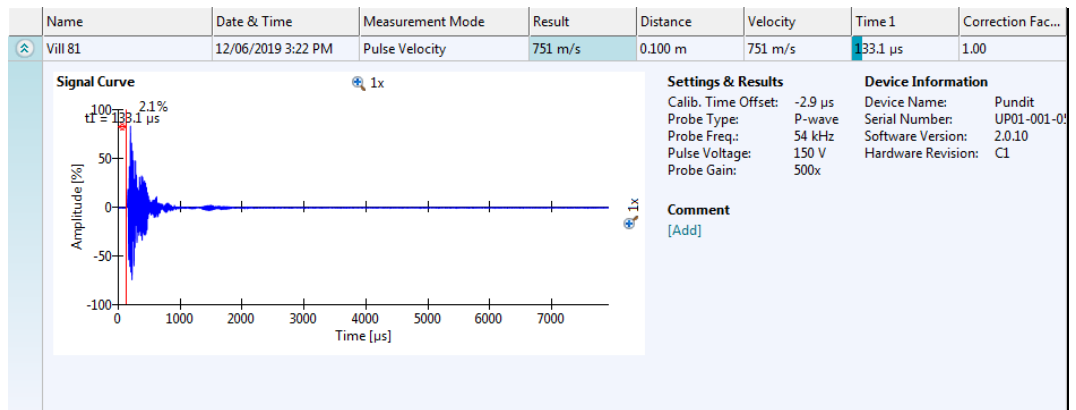


Figura 8.19. Velocidad de onda de espécimen compactado a 25 mm/min
Fuente: Propia

La variación en el tamaño de las ondas en estas graficas se debe al ajuste que se realiza en los valores de "Pulse Voltage" y "Probe Gain", esto no se relaciona con el comportamiento de la muestra ya que se adaptó en pro de mejorar la visualización del ensayo.

La tabla 8.5. muestra los resultados obtenidos de Vs (calculado), Vp (medido) y tiempo de recorrido de la onda en las muestras compactadas a 5,10,15,20 y 25 mm/min.

Tabla 8.5. Resultados del ensayo de Velocidad de Onda con el equipo PUNDIT

N° DE MUESTRA	VELOCIDAD DE COMPACTACIÓN (mm/s)	VELOCIDAD DE ONDA (m/s)		Módulo de Poisson (v)	TIME (μ s)
		Vp	Vs		
1	5	917	441	0.35	109
2	5	934	449	0.35	107
3	10	819	393	0.35	122
4	10	775	372	0.35	129
5	10	787	378	0.35	127
6	15	847	407	0.35	118
7	15	781	375	0.35	128
8	20	854	410	0.35	117
9	20	775	372	0.35	129
10	25	735	353	0.35	136
11	25	781	375	0.35	128
12	25	769	369	0.35	130
13	25	751	361	0.35	133

Fuente: Propia

El valor de velocidad de onda longitudinal obtenido en cada espécimen tiende a ser diferencial entre los valores extremos de velocidad de compactación siendo estos 5 mm/min y 25mm/min, mientras los intermedios 10,15 y 20 mm/min no tienden a variar notablemente y los resultados se mantiene dentro del mismo rango (Ver figura 8.20.). Los especímenes compactados a 5mm/min presentan velocidades de onda superiores con un menor tiempo de recorrido, lo que se debe a una mejor agrupación de las partículas en el material compactado, sin embargo, todas las gráficas generadas por el equipo muestran discontinuidades en el recorrido de la onda, pues las briquetas se fabricaron con material cuya granulometría tiene un porcentaje inferior al 3% que pasa tamiz N°200, esta usencia de material fino genera vacíos entre las partículas que componen la muestra, ocasionando cambios en el comportamiento del material en cuanto a la organización de sus granos al momento de realizar la compactación estática.

Cabe resaltar que, en todas las gráficas se observa que el comportamiento de la onda tiende a ser continuo en algunas secciones, estos vacíos no se presentan de forma constante a lo largo de las muestras, por lo general se localizan en la sección media del espécimen, además, las briquetas que se compactaron a una velocidad de 5mm/min presentan menor variación en cuanto a la amplitud de la onda desde el inicio hasta el final, generando un comportamiento similar en el tamaño y valor alcanzado por la onda entre ellas.

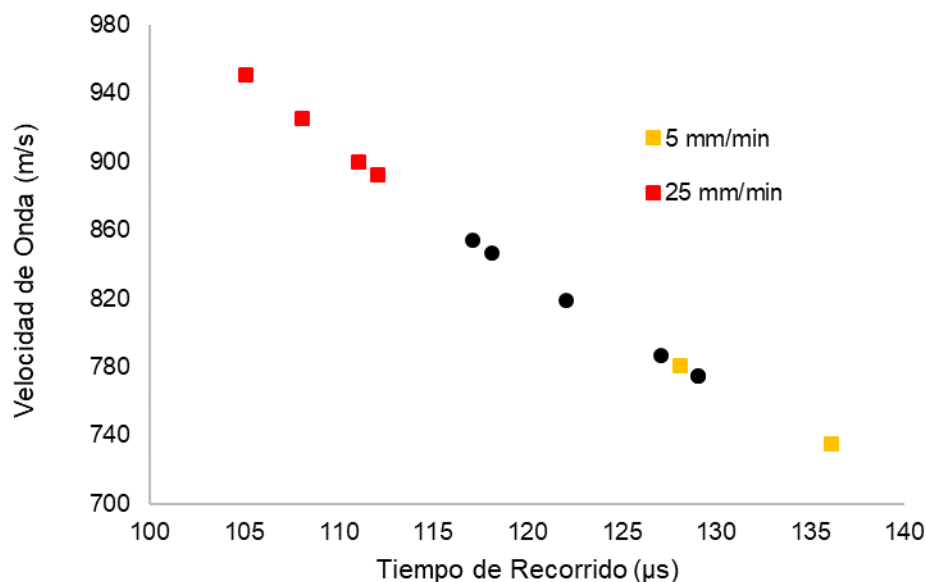


Figura 8.20. Resultados del ensayo de velocidad de onda
Fuente: Propia

Por otra parte, se hallaron las densidades de cada uno de los especímenes fabricados para luego ser comparadas con la densidad máxima alcanzado en el ensayo Proctor.

Tabla 8.6. Pesos unitarios alcanzados por los especímenes fabricados

Velocidad de Compactación (mm/min)	Masa (gr)	Volumen (cm ³)	Peso unitario (gr/cm ³)
5	452.3	195.25	2.32
5	449.9	195.26	2.30
10	447.9	195.27	2.29
10	442.9	195.28	2.27
15	418.7	195.29	2.14
15	419	195.30	2.15
20	409.9	195.31	2.10
20	409.3	195.32	2.10
25	406.5	195.33	2.08
25	403.7	195.34	2.07

Fuente: Propia

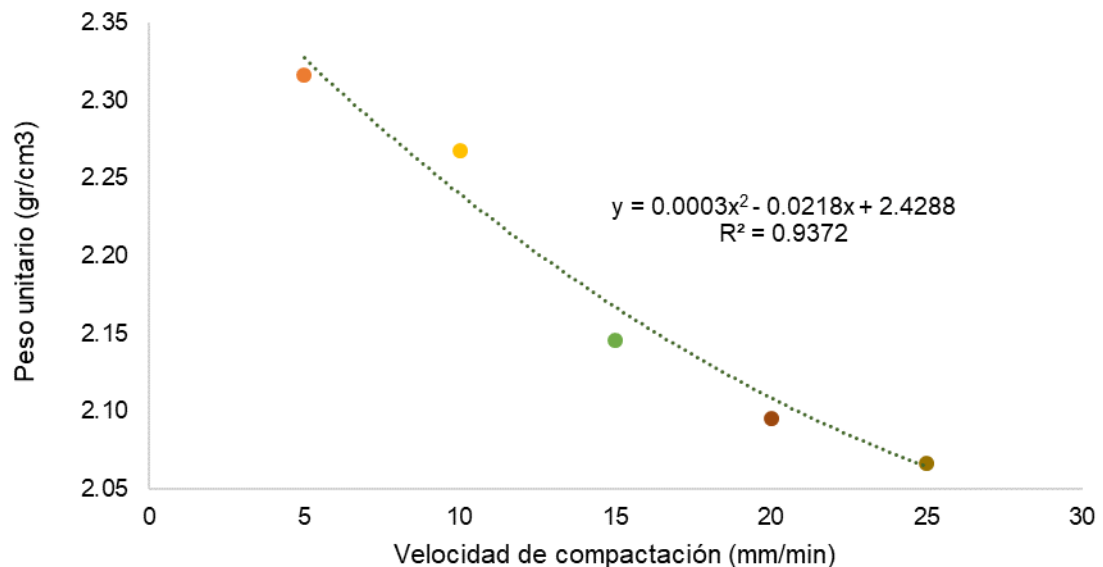


Figura 8.21. Pesos unitarios alcanzados por especímenes elaborados a diferentes velocidades de compactación

Fuente: Propia

Como se puede observar en la figura 8.21, los especímenes compactados a menor velocidad alcanzan pesos unitarios mayores que los de menor velocidad, lo que demuestra que al ser compactados con una velocidad baja en el pistón hace que se eliminen en un mayor grado los espacios vacíos y estos alcancen una mayor resistencia y capacidad de carga.

También se puede evidenciar que el peso unitario máximo alcanzada por el método de compactación estático alcanza un valor de 2.32 gr/cm³, mientras que la densidad hallada en el ensayo Proctor fue de 2.11 gr/cm³ por lo que se puede concluir que el método estático obtuvo un peso unitario en un 3% mayor al dinámico. Esto puede ser explicado por lo expuesto por Venkatarama y Jagadish (1993): “Cuando el esfuerzo es aplicado estáticamente, los granos son desplazados, produciendo un acercamiento entre ellos, y simultáneamente el agua libre es empujada hacia dentro de los poros del suelo. En este caso, si el pistón se mueve bastante lento, esta agua puede ser desplazada, y la fuerza necesaria para lograr un nivel de compactación específico es más baja que para la compactación dinámica”. Este argumento es aplicado en esta investigación, ya que como se menciona anteriormente el peso unitario mayor se obtiene cuando la celda de carga se mueve a velocidades inferiores, en este caso a 5 mm/min.

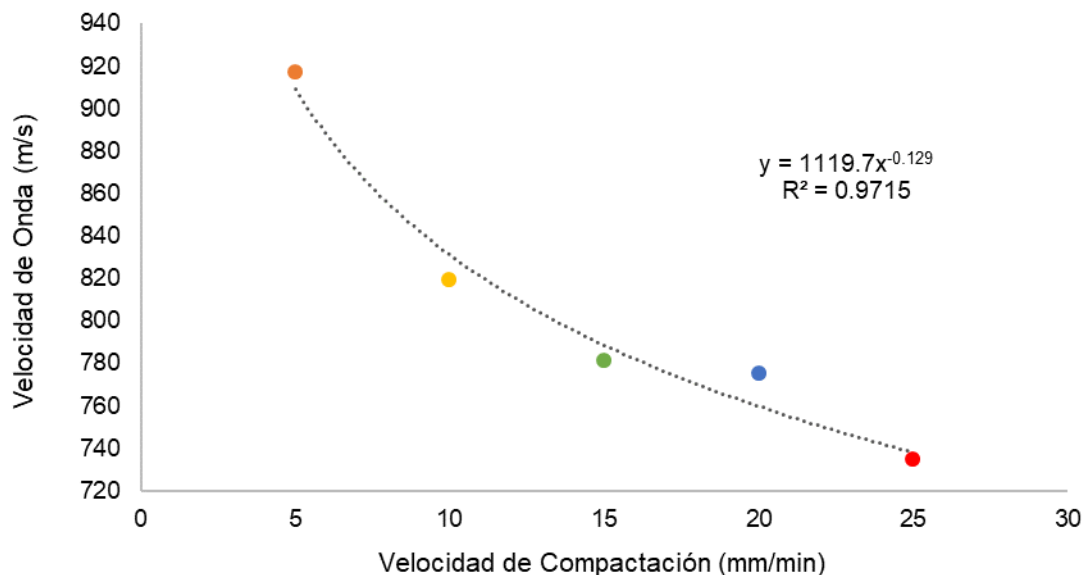


Figura 8.22. Velocidades de onda obtenidas a diferentes velocidades de compactación
Fuente: Propia

En la figura anterior se observa que los especímenes compactados a velocidades bajas obtienen un recorrido de velocidad de onda mayor, es decir que los especímenes quedan mejor compactados y se obtienen muestras homogéneas.

9. RESULTADOS E IMPACTOS

9.1. RESULTADOS

Tabla 9.1. Resultados, indicadores y objetivos del proyecto

Resultado	Indicador	Objetivo Relacionado
Caracterización del material de Sub-Base Granular	Laboratorio	Objetivo específico 1
Briquetas fabricadas con el método de compactación estático	Documento	Objetivo específico 2
Densidad seca máxima, humedad y energía óptima de compactación de la Sub-Base Granular	Laboratorio	Objetivo específico 1
Gráficas comparativas del comportamiento mecánico de los especímenes fabricados	Documento	Objetivo específico 3
Valores cualitativos y cuantitativos de uniformidad de los especímenes	Documento	Objetivo específico 3
Artículo científico	Publicación en revista de Ingeniería	Objetivo específico 4

Fuente: Autor

9.2. IMPACTOS

La compactación de material granular es una actividad de gran importancia en el campo de la ingeniería civil para la construcción de carreteras, permite mejorar las propiedades geotécnicas del suelo para que su comportamiento mecánico sea el adecuado en la vida útil de la estructura. Para verificar lo anterior se llevan a cabo pruebas de laboratorio con el ensayo de Proctor estandarizado en Colombia para verificar la relación entre densidad seca máxima y humedad óptima de compactación que se debe cumplir en obras bajo las especificaciones técnica que exige la normatividad vigente.

Por otra parte, existe poca información sobre el método de compactación estática de pruebas con materiales granulares en el país, las ventajas que posee esta prueba con la posibilidad de mejorar a largo plazo los procesos constructivos y la reducción de costos con la implementación del equipo “Loader Master” cuya funcionalidad es amplia para diferentes ensayos en laboratorio.

10. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

10.1. CONCLUSIONES

Actualmente en Colombia, se encuentra normalizado el ensayo de Proctor Estándar y Proctor modificado como métodos de compactación dinámica para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos por medio de las especificaciones para la construcción de carreteras por el INVIAS y el IDU, sin embargo, este método ya es poco usado a nivel mundial y se han implementado otros ensayos con menor índice de incertidumbre y ejecución mecánica, como es el método de compactación estático por medio del equipo Loader Master 5030. Este equipo puede ser usado en otro tipo de ensayos y posee una celda de carga con aplicación constante hasta un valor máximo determinado por el usuario acorde a las características del suelo, este procedimiento se lleva acabo de forma mecánica con poca intervención manual por parte del operario que realice el ensayo.

En la presente investigación se estudió el comportamiento mecánico de especímenes fabricados a partir del método de compactación estática con variación de la velocidad de carga de 5 mm/min a 25mm/min con material de Sub-Base Granular proveniente del río Guayuriba, por medio del ensayo de velocidad de onda con el equipo PUNDIT PL-200 y de esta forma, se evaluó la confiabilidad del método estático ya que aproximadamente el 60% de las briquetas fabricadas alcanzaron pesos unitarios secos superiores a los obtenidos en el ensayo de proctor modificado, además, fue posible establecer un área de estudio para la compactación de suelos en laboratorio.

El material de estudio se clasificó como un suelo A-1-a de acuerdo a la metodología AASHTO y como Grava bien gradada (GW) por el Sistema Unificado de Suelos. Debido a que este material granular se encontraba compuesto principalmente por gravas y arenas se determinó que no tiene límites de Atterberg por su bajo contenido de finos y el valor de CBR al 95% de compactación es 61%.

El equipo Loader Master 5030 adquirido por la Universidad Santo Tomás sede Villavicencio poseía un pistón de carga de 2" de diámetro, por lo que fue necesario diseñar y fabricar un molde en acero galvanizado con dimensiones de 5cm de diámetro compuesto por una base, una camisa principal de 10 cm y un collar de extensión de aproximadamente 7.6 cm, además, tenía abertura lateral ajustada por medio de una rosca para facilitar la extracción de las briquetas. De esta manera, fue posible la elaboración de 25 especímenes por el método de presión variable volumen constante a velocidades de compactación de 5, 10, 15, 20 y 25 mm/min.

Para el análisis del comportamiento mecánico de los especímenes elaborados se realizó inicialmente, una selección de aquellas muestras que presentaran mejores características físicas, es decir, se descartaron principalmente aquellas muestras

con fisuras considerables, desportillamiento y pérdida de esquina, a continuación, se realizó el ensayo de onda longitudinal con el equipo Pundit PL-200 a cada una de las briquetas, obteniendo como resultado que la velocidad de compactación de 5 mm/min alcanzó valores de velocidad de onda mayores de 900 m/s en un menor tiempo de recorrido, sin embargo, para las cinco (5) variaciones de velocidad las gráficas evidenciaban discontinuidades de la onda en secciones de las muestras, ocasionado por la presencia de vacíos entre las partículas relacionado principalmente a la composición del material granular el cual corresponde a un alto porcentaje de arena y una mínima parte de finos. Por otra parte, las briquetas fabricadas a 5 mm/min alcanzaron pesos unitarios superiores en un 3% a las de Proctor modificado, siendo así que, a mayor velocidad de compactación menor velocidad de onda alcanzada por ende menores pesos unitarios.

Cabe destacar que, para las velocidades de compactación de 10,15, 20 y 25 mm/min se obtuvo valores de velocidad de onda en un rango promedio y el comportamiento de las gráficas en general presentaban aumentos en la amplitud de la onda al inicio del recorrido y al final tendía a comportarse de una forma constante, en cuanto al peso unitario alcanzado con el método estático de compactación en las velocidades de 5, 10 y 15 mm/min estuvieron por encima de las establecidas por el método dinámico, mientras las velocidades de 20 y 25 mm/min se encontraban próximas a este valor pero aun así con resultados inferiores. A partir de esto, es posible establecer que desde velocidades de 10 mm/min se presentan variaciones considerables en los valores de peso unitario, por esta razón, la velocidad de compactación óptima se puede definir en un rango de 5 a 10 mm/min.

Finalmente, durante el proceso de extracción de los especímenes del molde se evidenció que el material presentaba un comportamiento frágil y en la etapa de secado varias briquetas mostraban fisuras y surgían grietas fácilmente al momento de su manipulación, debido a la composición en alto porcentaje de arena de la Sub-Base Granular (ver anexo C). De esta forma, se comprobó que llevar a cabo este método de compactación estático tiene un mayor grado de dificultad con materiales de dichas características, generando la necesidad de realizar el proceso de forma rigurosa y elaborando una mayor cantidad de muestras.

10.2. TRABAJOS FUTUROS

En futuras investigaciones se debe aplicar el ensayo de compactación estático en muestras compuestas principalmente de arcillas y poder llevar a cabo una comparación de resultados con el método dinámico, aplicando diferentes ensayos de laboratorio a fin de analizar cuál de estos presenta menor porcentaje vacíos y, por ende, mejora la capacidad de soporte del material.

El método de compactación estático depende aun del dinámico, ya que es necesario hallar la humedad y densidad seca por medio del ensayo Proctor, es así que se

debe estudiar la fabricación de una celda de carga con dimensiones similares al pistón de Proctor modificado para hallar el valor de estas variables y poder realizar el ensayo netamente por medio del método estático de compactación.

Estudiar el proceso de compactación estático variando en un rango establecido la fuerza aplicada para la elaboración de especímenes y evaluar su comportamiento mecánico por medio del ensayo de onda longitudinal y transversal.

Revisar diferentes ensayos y bibliografías en los que se haya aplicado este método para diferentes materiales y poder caracterizar cuales son óptimos o no para la realización del método compactación estático

BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. Al-Radi, K. Al-Bukhaiti y J. Liang Weing, «Comparison between Static and Dynamic Laboratory Compaction Methods,» *Archiworld*, pp. 34-48, 2018.
- [2] L. Viveros Rosero, Influencia del proceso de compactación en la resistencia al corte de un suelo derivado de ceniza volcánica, Bogotá DC, 2014.
- [3] A. Rico Rodriguez y Hermilo Del Castillo, Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres (Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas), vol. 1, México: LIMUSA, 2005.
- [4] D. Asmani y H. Nurbaya, «Static Laboratory Compaction Method,» *EJGE*, vol. 16, pp. 1583-1593, 2010.
- [5] D. Braja M, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, CENGAGE, 2001.
- [6] C. M. Buenfil Berzunza, Caracterización experimental del comportamiento hidromecánico de una arcilla compactada, Barcelona: UPC, 2007.
- [7] H. A. Rondón Quintana y F. A. Reyes Lizcano, Pavimentos materiales, construcción y diseño, Bogotá DC: ECOE ediciones, 2015.
- [8] J. A. León, «Evaluación del Proceso de Daño y Deterioro Mecánico del Concreto Reforzado con Fibras Mediante Técnicas Acústicas,» Diciembre 2014. [En línea]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/46242/1/299986.2014.pdf>. [Último acceso: 18 Diciembre 2019].
- [9] R. Claudio y L. M. Mundo, «Ensayo no Destructivo por Método Ultrasónico,» Facultad de Aeronáutica, 2012.
- [10] S. L. Kramer, Geotechnical Earthquake Engineering, Washington: Prentice Hall, 1996.
- [11] G.I.S IBERICA S.L, «El Equipo Ultrasonico más Universal de Ensayos de Velocidad de Pulso para Hormigon,» PROCEQ, España, 2017.
- [12] E. Alonso, «Suelos compactados en la teoría y en la práctica,» UPC, Barcelona.
- [13] G. Cortéz, «Academia,» 2018. [En línea]. Available: https://www.academia.edu/17287026/COMPORTAMIENTO_MECANICO_DE_LOS_MATERIALES?auto=download. [Último acceso: 12 04 2019].
- [14] A. R. Cardenas y A. Donoso Montero, Proposición de una metodología particular para obtener la capacidad de soporte para suelos granulares sin curva Proctor definida, Punta Arenas, Chile, 2008.
- [15] R. Guzman, Análisis Granulométrico, Mexico, 2012.
- [16] Sharma, Sridharan y Talukdar, «Static Method to Determine Compaction Characteristics of Fine-Grained Soils,» *ASTM International*, 2016.
- [17] V. Reddy y K. Jagadish, «The static compaction of soils,» *Geotechnique*, nº 2, pp. 337-341, 1993.
- [18] Mesbah, Morel y Olivier, «Comportement des sols fins argileux pendant un essai de compactage statique: détermination des paramètres pertinents,» *Materials and structures / Matériaux et construction*, vol. 32, pp. 687-694, 1999.
- [19] Hafez, D. Asmani y Nurbaya, «Comparison between Static and Dynamic Laboratory Compaction Methods,» *EJGE*, vol. 15, pp. 1641-1650, 2010.
- [20] Wu, Houben y C. Egyed, «Investigation of the Effects of Different Laboratory Compacting Methods on the Properties of Cement Stabilized Materials,» 2012.
- [21] Talukdar y Sharma, «Determination of Compaction Characteristics of Soil by Static Compaction Method,» de *North East Students Geo-Congress on Advances in Geotechnical Engineering*, Guwahati, 2014.

- [22] A. Zhemchuzhnikov y K. Ghavami, « Static compaction of soils with varying clay content,» *Key Engineering Materials*, vol. 668, pp. 238-246, 2016.
- [23] B. Sharma y A. Deka, «Static Compaction Test and Determination of Equivalent Static Pressure,» de *Indian Geotechnical Conference*, Chennai, 2016.

ANEXOS

- A- Ensayos de Caracterización del Material Granular
- B- Resultados del Proceso de Compactación Estática en el Equipo Loader Master 5030
- C- Registro Fotográfico de Especímenes Descartados para ensayo de velocidad de Onda Longitudinal