

# 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/MIN

## EVALUATE THE MECHANICAL BEHAVIOUR FOR THE STATIC COMPACTION METHOD BY VARYING THE LOADING SPEED ON SPECIMENS MADE WITH A GRANULAR SUB-BASE FROM 5 TO 25 MM/MIN

**Alejandro Pinto Borja**

Estudiante de pregrado en Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, alejandropinto@usantotomas.edu.co

**Luisa Fernanda Pulido De Antonio**

Estudiante de pregrado en Ingeniería Civil, Universidad Santo Tomás, luisa.pulido@usantotomas.edu.co

**Resumen:** En esta investigación se evaluó el comportamiento mecánico que tiene un material de Sub-Base Granular proveniente de la cantera del río Guayuriba de la ciudad de Villavicencio, en donde es sometida al método de compactación estático por medio del equipo Loader Master 5030 y posteriormente, realizar el análisis de la uniformidad de los especímenes con la velocidad de onda longitudinal con el equipo Pundit PL-200. Para la realización de los ensayos se fabricó un molde en acero galvanizado para elaborar un total de 25 briquetas de 50 mm de diámetro por 100 mm de altura con velocidades de carga de 5, 10, 15, 20 y 25 mm/mm y fuerza de compactación máxima de 36 KN.

Los resultados indican que el método es práctico y favorable para ser utilizado con velocidades de compactación bajas, pero sugiere que esta compactación estática no sea aplicada en materiales granulares con bajo contenido de finos.

**Palabras clave:** compactación estática, comportamiento mecánico, densidad seca, velocidad de compactación, velocidad de onda.

**Abstract:** In this investigation, the mechanical behavior of a Granular Sub-Base material from the Guayuriba River quarry in the city of Villavicencio was evaluated, where it is subjected to the static compaction method by means of the Loader Master 5030 equipment, and subsequently, the analysis of the specimen uniformity with the longitudinal wave speed was carried out with the Pundit PL-200 equipment. To carry out the tests, a galvanized steel mold was made to produce a total of 25 briquettes of 50 mm in diameter by 100 mm in height with loading speeds of 5, 10, 15, 20 and 25 mm/mm and a maximum compacting force of 36 KN.

The results indicate that the method is practical and favourable for use at low compaction speeds, but suggest that this static compaction should not be applied to granular materials with low fines content.

**Keywords:** compaction speed, dry density, mechanical behavior, static compaction, wave speed.

### 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. [1]

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. [2]

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. [3]

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. [4]

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. DESARROLLO DEL ARTÍCULO**

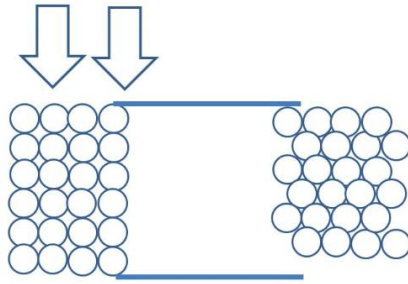
Actualmente, existen dos métodos principales de compactación en laboratorio que son: el estudio de presión estática y la prueba estándar de Proctor con presión dinámica, este último presenta algunos patrones de variación que generan incertidumbre en la determinación de la densidad seca máxima y contenido 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. [5]

### **2.1 Compactación de suelos**

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. [6]

Este proceso 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 como se muestra en la Fig. 1. [7]

**Fig. 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.

### 2.1.1 Compactación Dinámica

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 [8]. Las especificaciones de cada método se muestran en la siguiente tabla:

**TABLA I**

**Métodos de compactación Proctor modificado**

ESPECIFICACIONES	MÉTODO		
	A	B	C
DIAMETRO 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

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

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

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

### 2.1.2 Compactación Estática

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/m<sup>2</sup>). 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. [9]

Este método de compactación estático se realiza con la máquina "Master Loader" que se muestra en la Fig. 2, la cual 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 contante 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. [10]

Fig. 2. EQUIPO LOADER MASTER 5030



Fuente: <http://www.avantech.in>

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

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

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

### 2.1.3 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. [11]

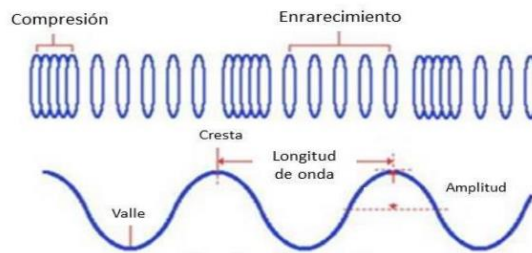
Para una capa de sub-base en pavimento flexible, los materiales granulares presentan anisotropía debido a sus diferentes formas y tamaños de partículas como consecuencia del efecto de compactación y carga en diferentes direcciones. Se establece con ensayos triaxiales cíclicos, que en los materiales granulares la rigidez lateral es menor en comparación con la vertical. 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. [11]

### 2.1.4 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. [12]

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) como se muestra en la Fig. 3, 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. [12]

Fig. 3. COMPORTAMIENTO TÍPICO DE UNA ONDA LONGITUDINAL



Fuente: 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. [12]

Steven Kramer en 1996 [13] estableció una correlación entre la velocidad de onda longitudinal ( $V_p$ ), velocidad de onda transversal ( $V_s$ ) y el módulo de Poisson ( $\nu$ ) por medio de "(8)":

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

La Fig. 4 muestra el equipo ultrasónico PUNDIT, 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. [14]

**Fig. 4. EQUIPO PARA PRUEBAS DE ULTRASONIDO PUNDIT LAB**



Fuente: G.I.S Ibérica S.L

### 3. RESULTADOS

#### 3.1 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, estos provenientes del rio Guayuriba cuya comercialización se central en material para construcción de carreteras (sub-base y base granular), agregados para concreto y productos de selección directa.

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 II.

**TABLA II  
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

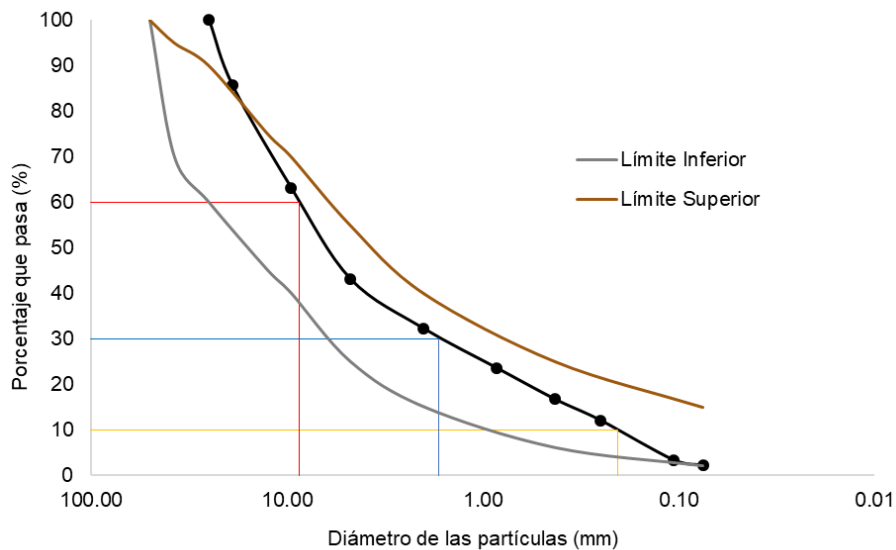
N° 60	0.25	118	4.60	12.08
N° 140	0.106	222.9	8.69	3.39
N° 200	0.075	30.1	1.17	2.22

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.

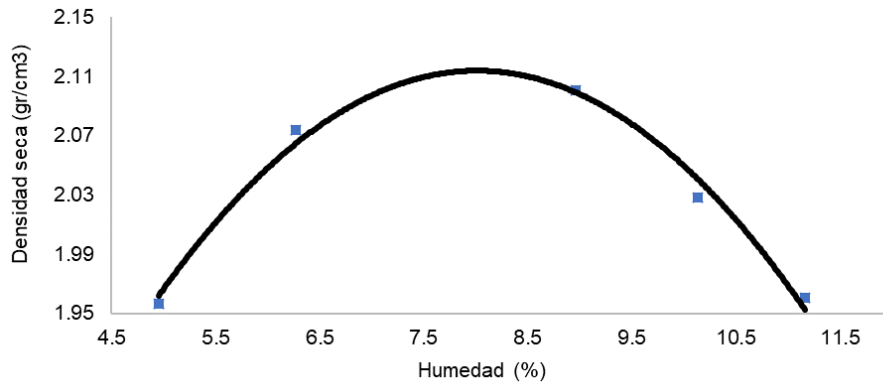
De acuerdo a los resultados obtenidos en el ensayo INV 125 y INV 126, y la distribución granulométrica anterior, este material se clasifica como un suelo A-1-a de acuerdo a la metodología American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) y como Grava bien gradada (GW) por el 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 (Fig. 7) se determinaron parámetros secundarios como son el coeficiente de curvatura (Cc) y el coeficiente de uniformidad (Cu) con los diámetros característicos D10, D30 y D60, 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 Cc y 42.375 para Cu, 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.

**Fig. 5. CURVA GRANULOMÉTRICA DE MATERIAL EN ESTUDIO**



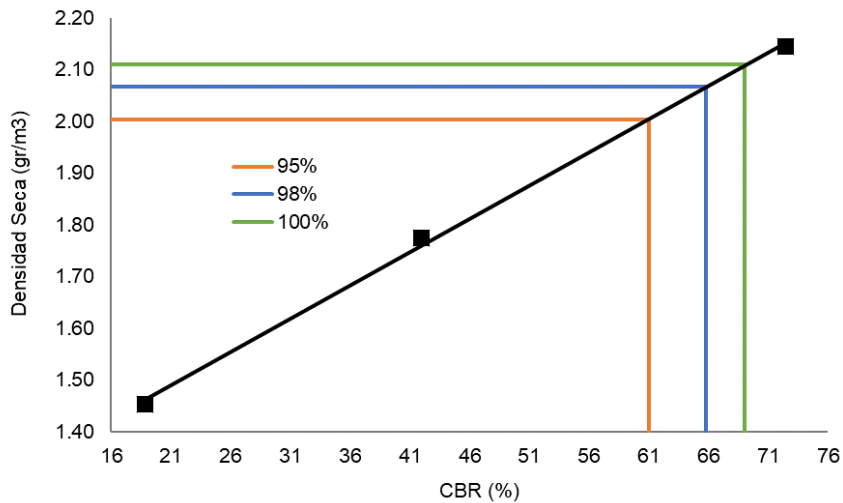
**Fig. 6. RELACIÓN HUMEDAD-DENSIDAD SECA MÁXIMA**



Fuente: elaboración propia

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 el valor de esfuerzo máximo definidos a 2.54 mm (1") en los tres casos se halló el valor correspondiente de densidad seca como se muestra en la Fig. 9.

**Fig. 7. VALORES DE CBR VS DENSIDAD SECA PARA 10, 25 Y 56 GOLPES**



Fuente: elaboración propia

A partir esta gráfica, se determinó los valores de CBR al 95%, 98% y 100% de la densidad seca máxima obtenida anteriormente del ensayo Proctor Modificado, cuyos resultados se resumen en la tabla III.

**TABLA III**  
**Determinación de los valores para CBR y densidad seca**

Porcentaje de Compactación (%)	Densidad Seca (kg/m <sup>3</sup> )	CBR (%)
100	2110	69
98	2067.8	65.8
95	2004.5	61

### **3.2 Elaboración de Especímenes**

Para la elaboración de los especímenes se utilizó el método de compactación estático denominado volumen constante presión variable (CITA), 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.

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).

#### **3.2.1 Fabricación de Molde**

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, se puede observar en la Fig. 11.

**Fig. 8. MOLDE METÁLICO PARA EL MÉTODO DE COMPACTACIÓN ESTÁTICO**



Fuente: elaboración propia

#### **3.2.2 Compactación**

Para la compactación de los especímenes se aplicaron diferentes velocidades de carga constantes de 5, 10, 15, 20 y 25 mm/min, el pistón al hacer contacto con el material hace un recorrido aproximado de 2,3 cm y llega a una carga máxima de 36 KN. Seguido a esto, el material compactado se extraía del molde como se ve en la Fig. 12 y se dejaba secar a temperatura ambiente por lapso de 15 días.

**Fig. 9. ESPÉCIMEN COMPACTADO Y EXTRAÍDO DEL MOLDE**



Fuente: elaboración propia

### **3.3 Ensayo de Velocidad de Onda**

Para esta etapa fue necesario la selección de aquellos especímenes 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 “(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 ( $\nu$ ) aplicado generalmente para materiales granulares.

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

**TABLA IV**  
**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 ( $\nu$ )	TIME ( $\mu$ s)
		$V_p$	$V_s$		
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

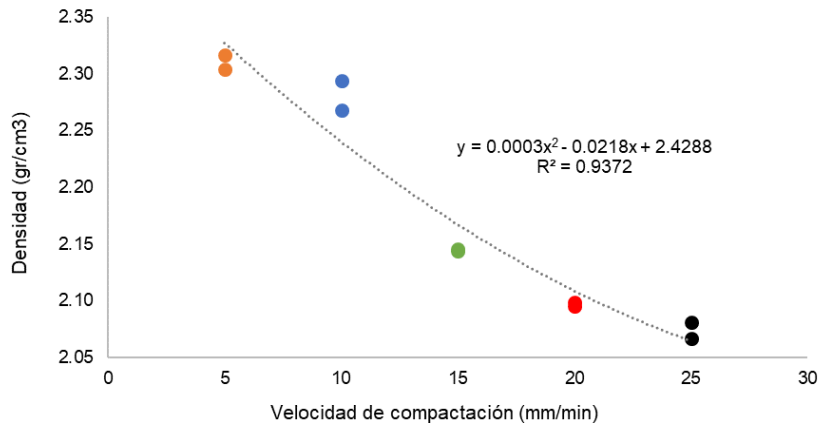
El valor de velocidad de onda longitudinal obtenido en cada espécimen tiende a ser diferencial entre los valores extremos de velocidad de compactación siendo estos 5 mm/min y 25mm/min, mientras los intermedios 10,15 y 20 mm/min no tienden a variar notablemente y los resultados se mantiene dentro del 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.

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 como se muestra en la tabla V y se realizó una gráfica con el fin de evidenciar su comportamiento Fig. 10.

**TABLA V**  
**Densidades alcanzadas por los especímenes fabricados**

Velocidad de Compactación (mm/mm)	Masa (gr)	Volumen (cm3)	Densidad (gr/cm3)
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

**Fig. 10. DENSIDADES ALCANZADAS POR ESPECÍMENES ELABORADOS A DIFERENTES VELOCIDADES DE COMPACTACIÓN**



Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la Fig. 10, los especímenes compactados a menor velocidad alcanzan una densidad mayor que los de mayor 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.

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” [15]. Este argumento es aplicado en esta investigación, ya que como se menciona anteriormente la densidad mayor se obtiene cuando la celda de carga se mueve a velocidades inferiores, en este caso a 5 mm/min.

#### 4. CONCLUSIONES

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 una celda de carga con dimensiones de 5cm de diámetro y 10 cm de altura, por lo que fue necesario diseñar y fabricar un molde en acero galvanizado con estas medidas compuesto por una base, una camisa principal 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 menores deficiencias físicas y que cumpliera con las dimensiones establecidas por el molde fabricado, 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 densidades máximas 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 densidades.

Cabe destacar que, para las velocidades de compactación de 10,15, 20 y 25 mm/min se obtuvieron 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 a las densidades secas alcanzadas con el método estático de compactación para 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 valores inferiores.

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. 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.

## 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.

## REFERENCIAS

- [1] A. Rico Rodríguez y H. D. Castillo, Ingeniería de suelos en las vías Terrestres (Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas), México: LIMUSA, 2005.
- [2] H. Al-Radi, K. Al-Bukhaiti y J. Liang Weing, «Comparison between Static and Dynamic Laboratory Compaction Methods,» *Archivworld*, pp. 34-48, 2018.
- [3] A. R. Cardenas y A. Donoso Montero, Proposición de una metodología partículas para obtener la capacidad de soporte para suelos granulares, Punta Arenas, Chile, 2008.
- [4] L. Viveros Rosero, Influencia del proceso de compactación en la resistencia al corte de un suelo derivado de ceniza volcánica, Bogotá DC, 2014.
- [5] B. Sharma y A. Deka, «Static Compaction Test and Determination of Equivalent Static Pressure,» de *Indian Geotechnical Conference*, Chennai, 2016.
- [6] H. Al Radi, K. Al-Bukhaiti y J. Liang Weing, «Comparison Between Static and Dynamic Laboratory Compaction Methods,» *Archivworld*, pp. 34-48, 2018.
- [7] D. Asmani y H. Nurbaya, «STATIC LABORATORY COMPACTION METHOD,» *EJGE*, vol. 16, pp. 1583-1593, 2010.
- [8] Instituto Nacional de Vías, *Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*, Bogotá DC, 2012.
- [9] E. Alonso, «Suelos Compactados en la Teoría y en la Práctica,» UPC, Barcelona.
- [10] D. Braja M, Fundamentos de Ingeniería Geotécnica, CENGAGE, 2001.

- [11] C. M. Buenfi Berzunza, CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDROMECÁNICO DE UNA ARCILLA COMPACTADA, Barcelona: UPC, 2007.
- [12] C. Rimoldi y L. M. Mundo, «ENSAYO NO DESTRUCTIVO POR MÉTODO ULTRASONICO,» FACULTAD DE AERONAUTICA, 2012.
- [13] S. L. Kramer, «Geotechnical Earthquake Engineering,» Washington, Prentice Hall, 1996.
- [14] G.I.S IBERICA S.L, «EL EQUIPO ULTRASONICO MAS UNIVERSAL DE ENSAYOS DE VELOCIDAD DE PULSO PARA HORMIGON,» PROCEQ, España, 2017.
- [15] V. Reddy y J. Kaup, «The static Compaction Of Soils,» *Geotechnique*, nº 2, pp. 337-341, 1993.