

**COMPARACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA
EN ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO REALIZADOS DE FORMA MANUAL Y DE
FORMA MECÁNICA PARA LAS ARCILLAS INORGÁNICAS DE BAJA
COMPRESIBILIDAD DE LA UPB.**

**EDINSON JOSÉ ARIAS MALDONADO
MAIRA ALEJANDRA VERGARA JAIMES**

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

2015

**COMPARACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA
EN ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO REALIZADOS DE FORMA MANUAL Y DE
FORMA MECÁNICA PARA LAS ARCILLAS INORGÁNICAS DE BAJA
COMPRESIBILIDAD DE LA UPB.**

**EDINSON JOSÉ ARIAS MALDONADO
MAIRA ALEJANDRA VERGARA JAIMES**

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero civil.

Director:

Ing. Msc. GERARDO BAUTISTA GARCÍA

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

2015

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Abril del 2015

DEDICATORIA

Dedicado a...

A Dios por ser el motor de mi vida, por brindarle equilibrio a todos mis días y darme la fortaleza en esta etapa de formación que está próxima a terminar para iniciar mi vida profesional.

A mi padre y hermana por estar a mi lado con las palabras precisas para motivarme, por el apoyo incondicional, por transmitirme sentimientos de alegría, tranquilidad y serenidad, por confiar en mí y por demostrarme lo orgullosos que se sienten por mis triunfos.

A mis abuelos, personas nobles que me han visto crecer, que han estado a mi lado siempre que así lo he necesitado, por tener sus consejos en los momentos oportunos, por brindarme su amor y serenidad, por ser ustedes la base para la familia unida y feliz a la que pertenezco.

A la familia Mendoza Vergara por hacerme sentir como una hija y por el profundo afecto que les tengo.

Y en especial a mi madre dedico este y todos mis triunfos, por ser instrumento de Dios para regalarme la vida, por enseñarme los valores necesarios para cada día ser una gran mujer, por ser mi ejemplo a seguir, por confiar en mí, por permitirme equivocarme y porque pertenecer a su vida es mi mayor fortuna.

Maira Alejandra Vergara Jaimes.

Dedicado a...

A Dios.

Por permitirme llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr esta primera meta en mi vida profesional, además de su infinita bondad y amor.

A mi madre Caridad.

Por haber sido ese apoyo constante, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy.

A mi padre José.

Por toda la paciencia que ha tenido conmigo en todos mis desaciertos, su apoyo incondicional en cada uno de los tantos proyectos, por ser mi amigo, compañero y cómplice, gracias por que con su ejemplo he ideado la persona que quiero ser.

A mis amigos.

Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos: John Carrero, Jairo Ortiz, Jesús Ravelo, José Arismendi, Henry Debía, Cristian León, Manuel Yancy, Fernando Cotes, Alexa Ramírez, Lina Martínez, Paula Güiza y finalmente a Maira Vergara por todo la paciencia y optimismo que siempre tuvo para la realización de este trabajo.

Edinson José Arias Maldonado.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos primero y ante todo a Dios por darnos la sabiduría, la fuerza, la confianza y escuchar nuestras oraciones durante la realización de este trabajo de grado.

A la Universidad Pontificia Bolivariana por permitirnos ser parte de la facultad de Ingeniería civil y formarnos como profesionales íntegros para el bien de la sociedad.

De manera muy especial le damos gracias a nuestro director de tesis, Ing. GERARDO BAUTISTA por su incondicional acompañamiento y apoyo, por brindarnos sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación durante el desarrollo de este proyecto.

A los señores HELI RUEDA y VICENTE PÁEZ, laboratoristas de la Universidad Pontificia Bolivariana, quienes con sus experiencias aportaron en la ejecución de todos los ensayos de este proyecto de grado.

A los profesores de la facultad de Ingeniería civil en la Universidad Pontificia Bolivariana agradecemos por el acompañamiento durante estos 5 años en el proceso de optar nuestro título profesional.

Y a todas las personas que de una u otra manera intervinieron en este trabajo de grado, infinitas gracias.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	15
1.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	16
3. JUSTIFICACIÓN	17
4. ANTECEDENTES.....	18
5. MARCO TEORICO	20
5.1 Tipos de suelos	20
5.1.1 Gravas (G).....	20
5.1.2 Arenas (S)	20
5.1.3 Limos (M)	21
5.1.4 Arcillas (C)	21
5.1.5 Caliche.....	22
5.1.6 Loes.....	22
5.1.7 Diatomita	22
5.1.8 Gumbo.....	22
5.1.9 Tepetate.....	22
5.2 Clasificación de los suelos.....	22
5.2.1 Sistema unificado de clasificación de suelos (sucs)	23
5.2.1.1 Suelos gruesos.....	23
5.2.1.2 Suelos finos	26
5.2.1.2.1 Carta de plasticidad del suelo.....	27
5.2.2 Sistema de clasificación aashto.	29
5.2.2.1 Suelos granulares	30
5.2.2.2 Suelos finos	31
5.3 Ensayos de compactación	32
5.3.1 Ensayo proctor modificado manual.....	33
5.3.1.1 Método A.....	33
5.3.1.1.1 Equipo	33
5.3.1.1.2 Muestra.....	33
5.3.1.1.3 Procedimiento:	33
5.3.1.2 Método B	34
5.3.1.2.1 Equipo	34
5.3.1.2.2 Muestra.....	34
5.3.1.2.3 Procedimiento.....	34
5.3.1.3 Método C	34

5.3.1.3.1 Equipo	34
5.3.1.3.2 Muestra.....	34
5.3.1.3.3 Procedimiento.....	35
5.3.1.4 Método D	35
5.3.1.4.1 Equipo	35
5.3.1.4.2 Muestra.....	35
5.3.1.4.3 Procedimiento.....	36
5.3.2 Ensayo proctor modificado mecánico.....	36
6. METOLOGÍA	39
6.1 revisión bibliográfica	39
6.2 recolección de muestras	39
6.3 ensayos de clasificación.	40
6.4 ensayos de compactación.....	40
6.5 análisis y resultados	40
7. RESULTADOS OBTENIDOS.....	41
7.1. resultados de la clasificación del suelo.....	41
7.2. resultados de los ensayos de compactación proctor modificado realizados en forma manual y realizados en forma mecánica.	43
8. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
8.1. clasificación del suelo.....	46
8.2. ensayos de compactación	47
8.3. calcula de las energías de compactación en los ensayos proctor modificado.	47
8.4. relación entre peso específico seco máximo y la energía de compactación.	50
8.5. relación entre la humedad óptima vs energía de compactación.....	53
8.6. relaciones encontradas entre los pesos específicos secos máximos y las humedades óptimas en las diferentes formas de ejecución de los ensayos de compactación tipo proctor modificado.	54
8.7. comparación de los resultados obtenidos en forma manual con los resultados obtenidos en forma mecánica.....	55
8.8. comparación de los resultados obtenidos en forma manual con los resultados obtenidos en forma mecánica ajustados por el coeficiente k_{yd} . 57	
9. CONCLUSIONES.....	60
10. RECOMENDACIONES.....	64
BIBLIOGRAFÍA	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUELO DE PARTÍCULAS FINAS).	27
FIGURA 2. CURVA DE COMPACTACIÓN	32
FIGURA 3. CARTA DE PLASTICIDAD SEGÚN CASAGRANDE.....	42
FIGURA 4. ÍNDICE PLÁSTICO Y LÍMITE LÍQUIDO EN LA CARTA DE PLASTICIDAD SEGÚN CASAGRANDE.....	46
FIGURA 5. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL MARTILLO MANUAL.	52
FIGURA 6. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL MARTILLO MECÁNICO.	52

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curvas granulométricas	41
Gráfica 2. Peso específico seco máximo vs humedad óptima.....	47
Gráfica 3. Peso específico seco máximo vs energía de compactación	50
Gráfica 4. Humedad óptima vs energía de compactación	53

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Sistema unificado de clasificación de suelos (partículas gruesas). 23	
Tabla 2. Sistema unificado de clasificación de suelos (partículas finas).....26	
Tabla 3. Sistema aashto de clasificación de suelos.....29	
Tabla 4. Especificaciones técnicas compactadora automática.37	
Tabla 5. Especificaciones técnicas molde38	
Tabla 6. Resultados ensayos de clasificación granulométrica.....41	
Tabla 7. Resultados de ensayos límites de plasticidad.42	
Tabla 8. Resultados ensayos de compactación proctor modificado.....43	
Tabla 9. Energía de compactación proctor modificado en forma manual.....48	
Tabla 10. Energía de compactación proctor modificado en forma mecánica.....49	
Tabla 11. Errores entre los pesos específicos secos máximos y humedades optimas de los ensayos realizados en forma manual y los realizados en forma mecánica.....56	
Tabla 12. Coeficientes de ajuste de la densidad seca máxima $k_{\gamma d}$ y la humedad óptima K_{ω}57	
Tabla 13. Pesos específicos secos y humedades optimas corregidas por los coeficientes $k_{\gamma d}$ y K_{ω}57	

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: COMPARACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA EN ENSAYOS PROCTOR MODIFICADO REALIZADOS DE FORMA MANUAL Y FORMA MECÁNICA PARA LAS ARCILLAS INORGÁNICAS DE BAJA COMPRESIBILIDAD DE LA UPB.

AUTOR: Maira Alejandra Vergara Jaimes - Edinson José Arias Maldonado.

DIRECTOR: Gerardo Bautista García.

FACULTAD: Ingeniería civil.

RESUMEN

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo la comparación del peso específico seco máximo y humedad óptima en los ensayos de compactación tipo Proctor modificado realizados en forma manual respecto a los realizados en forma mecánica para las arcillas inorgánicas de baja compresibilidad de la UPB.

Para la realización de este trabajo de grado, se obtuvieron muestras representativas con el fin de determinar su clasificación a partir de los tamaños de las partículas del suelo y los límites líquido y plástico. Una vez establecido el tipo de suelo, se realizaron 60 ensayos de compactación tipo Proctor modificado de los cuales 30 fueron en forma manual y 30 en forma mecánica.

Una vez conocidos los pesos específicos secos máximos y las humedades óptimas de los ensayos manuales y de los mecánicos se procedió a establecer relaciones entre dichos parámetros. Además se analizó la variación del peso específico máximo y la humedad óptima respecto a la energía de compactación aplicada en cada prueba (manual y mecánica).

PALABRAS CLAVES: Proctor, compactación, peso específico, humedad, arcillas, compresibilidad.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: COMPARISON OF THE MAXIMUM SPECIFIC GRAVITY DRY AND OPTIMAL HUMIDITY IN MODIFIED PROCTOR TESTS PERFORMED MANUALLY RESPECT PERFORMED MECHANICAL FOR UPB INORGANIC CLAYS WITH LOW COMPRESSIBILITY.

AUTHORS: MARIA ALEJANDRA VERGARA JAIMES – EDINSON JOSÉ ARIAS MALDONADO.

DIRECTOR: GERARDO BAUTISTA GARCÍA.

FACULTY: CIVIL ENGINEERING.

ABSTRACT

The objective of this graduate work is the comparison of the maximum specific gravity dry and optimal humidity in modified proctor tests performed manually respect performed mechanical for UPB inorganic clays with low compressibility.

Representative samples were obtained for the realization of this graduate work, whit the purpose of define their classification form the size soil particles and the liquid and plastic limits. Once established the soil type were performed 60 modified proctor tests, 30 was performed manually and 30 was performed mechanical.

When the maximum specifics gravities dry and optimal humidity of the modified proctor tests performed manually and performed mechanical were known we proceeded to establish relations of that parameters. Also, the variation of the maximum specific gravity dry and optimal humidity was analyze respect the compaction apply in each test (manually and mechanical).

Keywords: Proctor, compaction, specific gravity, humidity, clay, compressibility.

INTRODUCCIÓN

El proceso de compactación tiene como objetivo principal aumentar la resistencia de un terreno; esto es posible aplicando cierta energía la cual provoca una disminución en la relación de vacíos y un aumento en la densidad.

La energía aplicada en un proceso de compactación para un tipo de suelo será directamente proporcional a la densidad obtenida por la misma.

En la construcción, la compactación de los suelos es de gran importancia porque siempre se es necesario un terreno resistente para apoyarse, por lo tanto desde tiempos atrás se han realizado diversos procesos de compactación para conocer la densidad seca máxima que puede lograr un material y la humedad con la cual dicha densidad se alcanza. En 1933 Ralph R. Proctor estableció un ensayo de compactación al que inicialmente se le llamo “ensayo Proctor estándar” el cual años más tarde sufrió variaciones como consecuencia del aumento en la energía de compactación en los equipos después de la década de los 40's y se le llamó “ensayo Proctor modificado.

La ejecución del ensayo de compactación tipo Proctor modificado demanda un esfuerzo físico considerable por parte del operador, el cual puede ser reducido implementando el uso de una máquina compactadora. El presente trabajo pretende establecer una comparación entre los parámetros obtenidos en los ensayos tipo Proctor modificado, es decir la humedad de compactación óptima y el peso específico seco máximo realizados de forma manual y de forma mecánica; los ensayos se realizaron según las Normas y Especificaciones Instituto Nacional de Vías 2012.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Encontrar la relación entre los parámetros de compactación obtenidos en el ensayo Proctor modificado realizados en forma manual y en forma mecánica para las arcillas inorgánicas de baja compresibilidad de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

1.2. Objetivos Específicos

- Obtener en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga un suelo perteneciente al grupo de arcillas inorgánicas de baja compresibilidad según el sistema unificado de clasificación de suelos.
- Realizar los ensayos de granulometría por mallas con lavado por el tamiz N° 200 y los ensayos de límites de plasticidad con el fin de verificar que las muestras utilizadas correspondan al grupo de arcillas inorgánicas de baja compresibilidad del sistema unificado de clasificación de suelos.
- Ejecutar ensayos de compactación tipo Proctor modificado de forma manual con el fin de obtener el peso específico seco máximo y la humedad óptima para el tipo de suelo estudiado.
- Ejecutar ensayos de compactación tipo Proctor modificado de forma mecánica con el fin de obtener el peso específico seco máximo y la humedad óptima para el tipo de suelo estudiado.
- Encontrar una relación entre los pesos específicos secos máximos derivados de la ejecución de ensayos de compactación Proctor modificado realizados en forma manual y los realizados en forma mecánica.
- Encontrar una relación entre las humedades óptimas derivados de la ejecución de ensayos de compactación Proctor modificado realizados de forma manual y los realizados de forma mecánica.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El ensayo de compactación Proctor modificado tiene como objetivo principal obtener el peso específico seco máximo y la humedad con que este se logra, este objetivo se realiza simulando las condiciones con las cuales los suelos son compactados en campo, para ello se debe aplicar una energía de compactación de 2700 kJ/m^3 el cual teóricamente es obtenido usando un molde de 6 pulgadas de diámetro y un volumen de 2700 cm^3 , también es necesario que el martillo tenga un peso de 10 libras para ser dejado caer de una altura de 18 pulgadas. La compactación deberá realizarse en 5 capas a cada una de las cuales se le aplicaran 56 golpes.

El desarrollo del ensayo de compactación Proctor modificado genera un gran esfuerzo físico al operador el cual puede ser reducido utilizando una máquina compactadora; pero, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en algunas tesis llevadas a cabo en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, se han obtenido constantemente diferencias utilizando el mismo tipo de suelo entre los resultados de los ensayos tipo Proctor modificado que se realizan de forma manual y de aquellos que se realizan utilizando la máquina compactadora generando un descarte en los resultados obtenidos en la forma mecánica debido al margen de error que arrojan dichos resultados comparados con los resultados obtenidos de forma manual.

Los ensayos de compactación Proctor modificado realizados en forma mecánica pueden ser contemplados estableciendo una relación con los ensayos de forma manual según los resultados obtenidos en varios de estos ensayos para un mismo tipo de suelo.

3. JUSTIFICACIÓN

Cuando se desea obtener el peso específico seco máximo y la humedad óptima de un suelo por medio de ensayos de compactación tipo Proctor modificado realizados de forma manual, esto demanda generar un gran esfuerzo físico por parte del laboratorista, el cual podría evitarse si en la realización de estos ensayos se implementa la máquina compactadora.

La facultad de ingeniería civil de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga adquirió en el año 2010 un equipo de compactación mecánica, este equipo ha sido utilizado en varios tipos de suelo pero lamentablemente los resultados de los parámetros de compactación han arrojado algunas diferencias comparadas con aquellos obtenidos en ensayos manuales.

Por lo tanto, implementar una relación entre los ensayos tipo Proctor modificado realizados de forma manual y los realizados en forma mecánica permite que los operadores puedan disminuir su esfuerzo físico y la máquina compactadora de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga sea implementada en los ensayos de compactación.

4. ANTECEDENTES

La fascinación de Proctor con la ingeniería geotécnica comenzó al tomar sus estudios de pregrado en la Universidad de California, Berkeley. Él estaba interesado en las publicaciones de Sir Alec Skempton y sus ideas sobre un comportamiento in situ de arcillas naturales. Skempton formula conceptos y coeficientes de permeabilidad que aún se utilizan ampliamente en la actualidad. Fue precursor en tomar este concepto un paso más allá y formular sus propias conclusiones experimentales para determinar una solución para el comportamiento in situ de suelos de arcilla y tierra que hacen que sea adecuado para la construcción. Su idea, que luego fue adoptada por Skempton, consistió en la compactación del suelo para determinar la densidad máxima alcanzable de los suelos y agregados.

A principios de la década de 1930, finalmente se creó una solución para la determinación de la densidad máxima de los suelos. Se encontró que en un ambiente controlado, el suelo podría ser compactado hasta el punto donde el aire podría ser eliminado en una gran proporción, la simulación de los efectos de un suelo en condiciones in situ. A partir de esto, la densidad en seco puede ser determinada midiendo simplemente el peso de la tierra antes y después de la compactación, el cálculo del contenido de humedad, y, además, el cálculo de la densidad en seco. Ralph R. Proctor pasó a enseñar en la Universidad de Arkansas.

En 1958, el ensayo de compactación Proctor modificado se desarrolló como un estándar ASTM. Era necesaria una norma compactación mayor y más relevante. No eran más grandes y equipos de compactación pesada, como grandes compactadores vibratorios y apisonadoras pesadas. Este equipo puede producir densidades en seco más altas en los suelos a lo largo con una mayor estabilidad. Estas propiedades mejoradas permitidas para el transporte de cargas muy pesadas de camiones por caminos y carreteras. Durante la década de 1970 y principios de

1980 la prueba Proctor modificado se hizo más ampliamente utilizado como un sustituto de los sistemas de ensayo Proctor estándar.¹

En el año 2003 en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, el estudiante Néstor Giovanni Rueda, realizó un proyecto de grado titulado “CALIBRACIÓN DE EQUIPOS Y ANÁLISIS DE MÉTODOS ALTERNOS PARA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD, COMPACTACIÓN Y LÍMITE DE CONTRACCIÓN EN DIFERENTES TIPOS DE SUELO “. Para cada método se realizaron diferentes ensayos y se hicieron comparaciones de los resultados obtenidos con cada método, para determinar la confiabilidad de cada uno de los diferentes tipos de suelo estudiados.

En el año 2014 en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, las estudiantes Mayra Alejandra Rangel y María Angélica Camargo, realizaron un proyecto de grado titulado “COMPARACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD ÓPTIMA EN LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PARA LAS ARENAS LIMOSAS DE LA UPB SECCIONAL BUCARAMANGA “. En este trabajo se analizaron las diferencias entre los pesos específicos secos máximos y las humedades óptimas obtenidas en los ensayos Proctor estándar, Proctor modificado y Harvard miniatura; calculando coeficientes de correlación entre ellos y estableciendo las causas de las diferencias.

1 Artículo ensayo de compactación Proctor, Historia, Teoría de la compactación del suelo, Comparación de pruebas, Pruebas de compactación alternativo. 2012-2014

5. MARCO TEORICO

5.1 TIPOS DE SUELOS

El suelo es el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o la descomposición química de rocas preexistentes², debido a enormes fuerzas naturales que operan incesantemente sobre la superficie de la tierra y a la actividad diaria de los seres vivos. Los suelos se dividen en dos amplios grupos: suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y/o química de las rocas, o sea los inorgánicos, y suelos cuyo origen es principalmente orgánicos.³

A continuación se describen los suelos más comunes con nombres generalmente utilizados por el ingeniero civil para su identificación.

5.1.1 Gravas (G)

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas, con formas que varían de angular a redondo y de tamaño entre el tamiz No. 4 y 3 pulgadas; estas, se clasifican de acuerdo con la graduación y tamaño en gruesa o fina, de graduación pobre o buena; por su forma, en angular, plana o redonda.⁴

5.1.2 Arenas (S)

La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de la trituración artificial, cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro.

El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas, las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito.⁵

² CRESPO, Carlos Clasificación de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. Párrafo 4. p.18

³ CRESPO, Carlos Clasificación de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. Párrafo 2 p.21

⁴ Escuela de Ingenieros Militares. En: Manual de laboratorio de suelos. Editorial Margabby Ltda. 1989. P.19

⁵ CRESPO, Carlos Clasificación de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. Párrafo 2 p.22

5.1.3 Limos (M)

Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos; siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm.⁶

5.1.4 Arcillas (C)

Las arcillas son partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado; aunque, en no pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o magnesio hidratados.

De acuerdo con su arreglo reticular los minerales de arcilla se pueden clasificar en tres grupos básicos, que son:

- El Caolinítico: están formadas por una lámina silícica y una lámina alumínica superpuestas de manera indefinida y con una unión tal entre sus retículas que no permite la penetración de moléculas de agua entre ellas, dando una propiedad de estabilidad ante la presencia de agua a estas arcillas.
- El montmorilonítico: La montmorilonita es el constituyente principal de la bentonita y otras variedades similares de arcilla. Las montmorilonitas suelen ser el resultado de la meteorización del feldespato plagioclasa en los depósitos de ceniza volcánica.
- El ilitico: es el resultado de la meteorización de las micas, es similar en muchos aspectos a la mica blanca pero, tiene menos potasio y más agua en su composición. Debido a que el enlace es más débil que el de la caolinita sus partículas son más pequeñas y delgadas.

En general, las arcillas ya sean caoliníticas, montmoriloníticas o iliticas, son plásticas, se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son compresibles y al aplicárseles una carga en su superficie se comprimen lentamente.⁷

⁶ CRESPO, Carlos Clasificación de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. p.22

⁷ CRESPO, Carlos Clasificación de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. p.23-25.

5.1.5 Caliche

Son ciertos estratos de suelo cuyos granos se encuentran cementados por carbonos calcáreos. Parece ser que para la formación de los caliches es necesario un clima semiárido.

5.1.6 Loes

Son sedimentos eólicos uniformes y cohesivos. Esa cohesión que poseen es debida a un cementante del tipo calcáreo, cuyo color es generalmente castaño claro. El diámetro de las partículas loes está comprendido entre 0.01 mm y 0.05 mm.

5.1.7 Diatomita

Son depósitos de polvo silícico, generalmente de color blanco; compuesto total o parcialmente por residuos de algas unicelulares microscópicas de origen marino o de agua dulce.

5.1.8 Gumbo

Es un suelo arcilloso fino; generalmente libre de arena que parece cera a la vista; es pegajoso, muy plástico y esponjoso. Es un material muy difícil de manejar.

5.1.9 Tepetate

Es un material pulverulento, de color café claro o café oscuro, compuesto de arcilla, limo y arena en proporciones variables, con un cementante que puede ser la misma arcilla o el carbonato de calcio.⁸

5.2 Clasificación de los suelos

El suelo puede ser clasificado, de una manera general, como sin cohesión o cohesivo o como grueso o de grano fino. Dado que estos términos son muy generales y envuelven una gran gama de propiedades físicas y de ingeniería, se requieren precisiones o medios o medios de clasificación adicionales. Existen

⁸ CRESPO, Carlos Clasificación de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. p.25-27.

diversos métodos de clasificación de suelos, actualmente los más utilizados son el Sistema Unificado de Clasificación del suelo (S.U.C.S) y el sistema de la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).⁹

5.2.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

Este sistema fue presentado por Arthur Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en 1942 para aeropuertos.

Este sistema divide los suelos en dos grandes grupos, de granos gruesos y de granos finos, los cuales se distinguen por el tamizado realizado a través de la malla N° 200. Se considera que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas son retenidas en la malla N°200, y fino si más del 50% de sus partículas pasan dicha malla.¹⁰

5.2.1.1 Suelos Gruesos: Se consideran suelos gruesos cuando más de la mitad del material es retenido en la malla N° 200; A su vez, estos están divididos en dos grupos: Grava, si más de la mitad de la fracción gruesa es retenida en la malla No. 4; Arena, si más de la mitad de la fracción gruesa esta entre el tamaño de las mallas N° 4 y la N° 200.¹¹

Tabla 1. Sistema unificado de clasificación de suelos (partículas gruesas).

⁹ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Propiedades Geofísicas de los suelos. Editorial McGraw-Hill. 1982. p.80-81.

¹⁰ CRESPO, Carlos Clasificación de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. p.88

¹¹ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Propiedades Geofísicas de los suelos. Editorial McGraw-Hill. 1982. p.83.

	DIVISIÓN MAYOR	Símbolo	Nombre
GRAVAS	GRAVAS LIMPIAS (Poco o nada de partículas finas)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos.
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de gravas y arenas con poco o nada de finos.
	GRAVA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	GM	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava, arena y arcilla.
ARENAS	ARENA LIMPIA (Poco o nada de partículas finas)	SW	Arenas bien Graduadas, arenas con gravas, poco o nada de finos.
		SP	Arenas más graduadas, arenas con gravas, con poco o nada de finos.
	ARENA CON FINOS (Cantidad apreciable de partículas finas)	SM	Arenas limosas, mezclas de arenas y limos.
		SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.

Una vez determinados los porcentajes de grava y arena de la curva granulométrica, se clasifican de manera preliminar de la siguiente manera:

Menos del 5%: GW, GP, SW, SP.

Más del 12%: GM, GC, SM, SC.

Del 5% al 12%: Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles.

Después de realizar dicha clasificación se hace necesario determinar el coeficiente de uniformidad C_u y el coeficiente de curvatura C_c .¹²

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (1)$$

$$C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad (2)$$

Dónde:

- ✓ D_{60} = Tamaño en mm tal que el 60% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.

¹² CRESPO, Carlos Clasificación de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. p.89

- ✓ D30 = Tamaño en mm tal que el 30% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.
- ✓ D10 = Tamaño en mm tal que el 10% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.

- **GW:** Gravas bien Graduadas.
 - Coeficiente de uniformidad Cu: mayor de 4
 - Coeficiente de curvatura Cc: entre 1 y 3

- **GP:** Gravas mal Graduadas.
NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACION PARA GW.

- **GM:** Gravas limosas.
 - Límites de Atterberg debajo de la “línea A”.
 - Índice de plasticidad menor que 4.

- **GC:** Gravas Arcillosas.
 - Límites de Atterberg arriba de la “línea A”.
 - Índice de plasticidad mayor que 7.

- **SW:** Arenas bien graduadas.
 - Coeficiente de uniformidad Cu: mayor de 6.
 - Coeficiente de curvatura Cc: entre 1 y 3

- **SP:** Arenas mal Graduadas.
NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACION PARA SW.

- **SM:** Arenas Limosas.
 - Límites de Atterberg debajo de la “línea A”.
 - Índice de plasticidad menor que 4.

- **SC:** Arenas Arcillosas.
 - Límites de Atterberg arriba de la “línea A”.
 - Índice de plasticidad mayor que 7.

5.2.1.2 Suelos Finos: Se consideran suelos finos cuando más de la mitad del material pasa por la malla N° 200; a su vez, estos están divididos en tres grupos para los limos y arcillas con límite líquido menor de 50% y en un grupo para los suelos finos altamente orgánicos.

Si el límite líquido del suelo es menor de 50%, es decir, si el suelo es de compresibilidad baja o media se añade el sufijo L (low compressibility) a los prefijos M, C y O, obteniéndose de este modo los símbolos:

- ✓ **ML:** Limos inorgánicos de baja compresibilidad.
- ✓ **CL:** Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad.
- ✓ **OL:** Limos orgánicos de baja compresibilidad.

Si el límite líquido es mayor de 50%, es decir, si el suelo es de compresibilidad alta, se añade el sufijo H (high compressibility) a los prefijos M, C y O, obteniéndose de este modo los símbolos:

- ✓ **MH:** Limos orgánicos de alta compresibilidad.
- ✓ **CH:** Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad.
- ✓ **OH:** Arcillas orgánicas de alta compresibilidad.

Finalmente los suelos altamente orgánicos, como las turbas se designan con el símbolo **PI**.¹³

Tabla 2. Sistema unificado de clasificación de suelos (partículas finas).

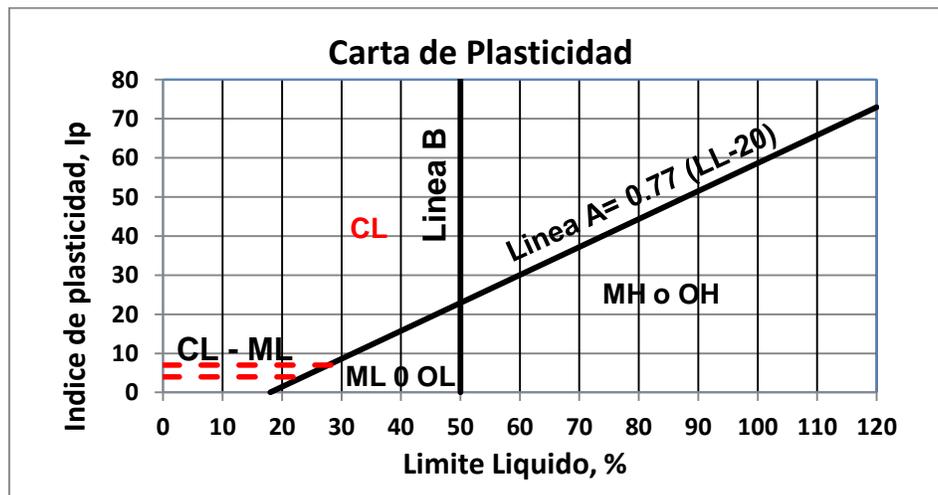
¹³ CRESPO, Carlos Identificación en el campo. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. p.93

DIVISIÓN MAYOR		Símbolo	Nombre
LIMOS Y ARCILLAS	Limite Liquido menor de 50	ML	Limos orgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos.
		CL	Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres.
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
LIMOS Y ARCILLAS	Limite Liquido mayor de 50	MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, limos elásticos.
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.
		OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos de media plasticidad
SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS		PI	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.

5.2.1.2.1 Carta de plasticidad del suelo.

La carta de plasticidad (Figura 1) se utiliza comúnmente para definir cualitativamente las propiedades físicas de un suelo fino a partir de la ubicación de este en la misma¹⁴

Figura 1. Sistema unificado de clasificación de suelos (Suelo de partículas finas).



Entrando en la carta de plasticidad de la figura 1 se clasifican los suelos con los siguientes criterios:

¹⁴ JUÁREZ-RICO, Eulalio-Alfonso. En: Mecánica de suelos. Tomo 1. Editorial Limusa. 2005. p.161-162.

- **CL:** Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad.
 - Límites de Atterberg arriba de la “línea A”.
 - Límite líquido menor a 50%.
 - Índice de plasticidad mayor al 7%.

- **CH:** Arcillas inorgánicas de alta plasticidad.
 - Límites de Atterberg arriba de la “línea A”.
 - Límite líquido mayor a 50%.

- **ML:** Limos orgánicos.
 - Límites de Atterberg abajo de la “línea A”.
 - Límite líquido menor a 50%.
 - Índice de plasticidad menor al 4%.

- **MH:** Limos inorgánicos.
 - Límites de Atterberg abajo de la “línea A”.
 - Límite líquido mayor a 50%.

- **CL – ML:**
 - Límites de Atterberg arriba de la “línea A”.
 - Índice de plasticidad mayor a 7%.

- **OL:** Limos orgánicos.
 - Límites de Atterberg abajo de la “línea A”.

- **OH:** Limos inorgánicos.
 - Límites de Atterberg abajo de la “línea A”.

- **Pt**
 - Límites de Atterberg abajo de la “línea A”.
 - Límite líquido puede estar entre 300% y 500%.

- Índice de plasticidad varía entre 100% y 200%

5.2.2 Sistema de Clasificación AASHTO.

Este sistema clasifica los suelos en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8. En este sistema de clasificación los suelos inorgánicos se clasifican en siete grupos que van del A-1 al A-7. Estos a su vez se dividen en un total de doce subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8.¹⁵

Tabla 3. Sistema AASHTO de clasificación de suelos

Clasificación general	Materiales Granulares (35% o menos pasa la No. 200)						Materiales limo-arcillosos (Más de 35% pasa la N° 200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de grupo	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5 ; A-7-6
Análisis de cernido:											
Porcentaje que pasa:											
N° 10	50 Max										
N° 40	30 Max	50 Max	51 min								
N° 200	15 Max	25 Max	10 Max	35 Max	35 Max	35 Max	35 Max	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de la fracción que pasa la N° 40:											
Límite líquido:				40 Max	41 min	40 Max	41 min	40 Max	41 min	40 Max	41 min
Índice de plasticidad	6 Max		NP	10 Max	10 Max	11 min	11 min	10 Max	10 Max	11 min	11 min
Índice de grupo	0		0	0		4 Max		8 Max	12 Max	16 Max	20 Max

¹⁵ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Propiedades Geofísicas de los suelos. Editorial McGraw-Hill. 1982. p.90.

La tabla 3 muestra el sistema de clasificación de la AASHTO, esta se basa en los resultados obtenidos como el límite líquido, índice de plasticidad y material que pasa el tamiz No. 10, 40 y 200.

La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se hace por medio del “índice de grupo”, este se calcula de la siguiente manera.

$$GI = 0.2_a + 0.005_{ac} + 0.01_{bd}$$

Dónde:

- ✓ a = La parte del porcentaje de material que pasa la malla No. 200 mayor de 35 y sin exceder 75, expresada como un número entero (Intervalo= 1 a 40).
- ✓ b = La parte del porcentaje de material que pasa por la malla No 200 mayor que 15% pero sin exceder 55, expresada como un número entero (Intervalo= 1 a 40).
- ✓ c = La parte del límite líquido mayor de 40 y no menor de 60, expresada como un número entero (Intervalo= 1 a 20).
- ✓ d = La parte del índice de plasticidad mayor de 10 y sin exceder 30, expresada como un número entero (Intervalo= 1 a 20).

5.2.2.1 Suelos granulares: Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz N° 200. Estos suelos forman los grupos A-1, A-2 y A-3.

- **A-1:** Son mezclas de suelos bien gradados, de fragmentos de piedra, grava, arena y material ligante poco plástico. Se incluye también en este grupo mezclas bien gradadas que no tienen material ligante.¹⁶
 - **A-1a:** Son materiales formados por roca o grava, con o sin material ligante.
 - **A-1b:** Son materiales formados por arena gruesa bien gradada, con o sin ligante.

¹⁶ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. p.71.

A-2: Incluye una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% del material más fino que el tamiz No. 200; Estos materiales se ubican en la frontera entre los materiales que caen los grupos A-1 y A-3 y los materiales limo-arcillosos de los grupos A-4 a A-7.

- **A-2-4 y A-2-5:** Tienen características de plasticidad de los grupos A-4 y A-5.
- **A-2-6 y A-2-7:** Son semejantes a los A-2-4 y A-2-5, excepto que las características de plasticidad de la fracción bajo la malla No. 40 son las de los grupos A-5 y A-7.¹⁷

A-3: Este grupo está compuesto por las arenas finas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad.

5.2.2.2 Suelos Finos: Son suelos limo-arcillosos que tienen más del 35% que pasa el tamiz No. 200. A este tipo de suelos les corresponde los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.

A-4: Son suelos limosos poco o nada plásticos, que tienen un 75% o más del material fino que pasa por el tamiz No. 200. Asimismo se incluyen en este grupo las mezclas de limo con grava y arena en un 64%.

A-5: Son suelos parecidos al grupo A-4, son elásticos y tienen un límite líquido elevado.

A-6: A este grupo pertenecen las arcillas plásticas. Por lo menos el 75% de estos suelos deben pasar el tamiz No. 200, pero se incluyen también las mezclas arcillo – arenosas, cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64%.¹⁸

¹⁷ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Propiedades Geofísicas de los suelos. Editorial McGraw-Hill. 1982. p.92.

¹⁸ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. p.71.

A-7: Estos suelos son parecidos a los suelos A-6, pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados, y se subdividen en:

- **A-7-5:** Índice de plasticidad es igual o mayor a LL-30.
- **A-7-6:** Índice de plasticidad es mayor que LL-30.

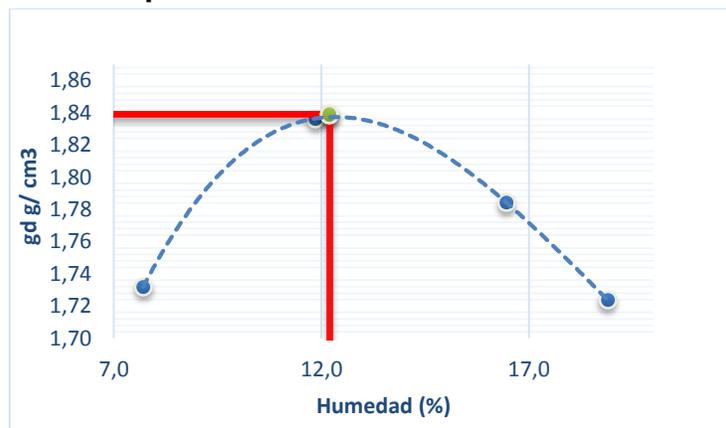
5.3 Ensayos de compactación

La compactación de los suelos, se usa comúnmente para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los mismos, no fue reconocida ampliamente sino hasta la aparición del rodillo pata de cabra en 1906. Sin embargo fue hasta 1933, año en el que R.R. Proctor publicó sus investigaciones sobre este tema, cuando se conocieron los factores que intervienen en la compactación. Proctor encontró que aplicando a un suelo cierta energía para compactarlo, el peso volumétrico obtenido varía con el contenido de humedad según una curva, como la de la figura 2, en la cual se puede observar la existencia de un grado de humedad con el cual se obtiene el peso volumétrico máximo para ese suelo y esa energía de compactación.

A la abscisa y ordenada de ese punto máximo se le denomina humedad óptima (W_o), y peso volumétrico seco máximo (γ_{smax}), respectivamente.

Buscando una prueba de laboratorio que igualara los resultados obtenidos en el campo con los diferentes equipos de compactación disponibles en esa época, Proctor propuso la prueba de compactación que hoy lleva su nombre: prueba de Proctor.¹⁹

Figura 2. Curva de compactación



¹⁹ CRESPO, Carlos Clasificación de los suelos. En: Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta Edición. Editorial Limusa. 1976-1980. p.99

5.3.1 Ensayo Proctor Modificado Manual

Este método se emplea 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 547 mm (18"). Se han previsto cuatro procedimientos alternativos en la siguiente forma:

5.3.1.1 Método A: Este procedimiento se aplica a mezclas de suelos que tienen el 40% o menos retenidos en el tamiz de 4.75 mm (No.4).

5.3.1.1.1 Equipo:

- ✓ Molde de diámetro 101.6 mm (4").
- ✓ Martillo de 4.54 Kg. (10 lb)

5.3.1.1.2 Muestra:

- ✓ Si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del terreno, se deberá secar hasta que llegue a hacerse friable bajo la acción de una espátula. El secamiento se puede efectuar al aire o por medio de aparatos de secado de manera que la temperatura de la muestra no pase 60 °C.
- ✓ Se tamiza una cantidad adecuada de suelo pulverizado representativo sobre el tamiz de 4.75 mm (No.4).
- ✓ Se escoge una muestra representativa del suelo preparado como se ha descrito, con una masa aproximada de 3 Kg. (7 Lb) o más.²⁰

5.3.1.1.3 Procedimiento:

- ✓ Se mezcla perfectamente la muestra representativa escogida con agua suficiente para humedecerla, aproximadamente, hasta un 4 por ciento por debajo del contenido óptimo de humedad.
- ✓ Se prepara un espécimen compactando el suelo humedecido en el molde, en cinco capas aproximadamente iguales y que den una altura total compactada alrededor de 125 mm (5"). Se compacta cada capa mediante 25 golpes uniformemente distribuidos con el martillo con una caída de 457 mm (18").
- ✓ Después de la compactación, se remueve el collar de extensión, se recorta cuidadosamente el suelo compactado que sobresalga en la parte superior del molde usando una regla metálica. Se pesa el molde con el suelo húmedo, en kilogramos, con aproximación de 5 g.

²⁰ INVE 142-6,7

- ✓ Se saca la muestra compactada del molde y se corta verticalmente a través de su centro. Se toma una muestra representativa del material de una de las caras del corte; se pesa inmediatamente y se seca en un horno a 110 °C por un tiempo mínimo de 12 horas o hasta masa constante, para determinar el contenido de agua.

5.3.1.2 Método B: Este procedimiento se aplica a mezclas de suelos que tienen el 40% o menos retenidos en el tamiz de 4.75 mm (No.4).

5.3.1.2.1 Equipo:

- ✓ Molde de diámetro 152.4 mm (6”).
- ✓ Martillo de 4.54 Kg. (10 lb)

5.3.1.2.2 Muestra:

- ✓ Si escoge la muestra representativa de acuerdo al descrito en la sección 5.3.1.1.2 excepto que deberá tener una masa aproximada de 7 Kg. (16 lb).

5.3.1.2.3 Procedimiento:

Se sigue el mismo procedimiento descrito para el método A en la sección 5.3.1.1.3, excepto en lo siguiente:

- ✓ Se prepara una muestra compactando el suelo humedecido en el molde, en cinco capas aproximadamente iguales, de tal manera que proporcionen una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5”), siendo compactada cada capa por medio de 56 golpes del martillo, uniformemente distribuidos.²¹

5.3.1.3 Método C: Este procedimiento se aplica a mezclas de suelos que tienen el 30% o menos retenido en el tamiz de 19 mm (3/4”).

5.3.1.3.1 Equipo:

- ✓ Molde de diámetro 101.6 mm (4”).
- ✓ Martillo de 4.54 Kg. (10 lb)

5.3.1.3.2 Muestra:

- ✓ Si la muestra de suelo está húmeda cuando se recibe del terreno, se deberá secar hasta que llegue a hacerse friable bajo la acción de una espátula. El

²¹ INVE 142-8

secamiento se puede efectuar al aire o por medio de aparatos de secado de manera que la temperatura de la muestra no pase 60 °C.

- ✓ Se tamiza una cantidad representativa de suelo pulverizado sobre el tamiz de 19.0 mm (3/4"). Se descarta el material grueso retenido sobre dicho tamiz, si lo hubiere.
- ✓ Se selecciona una muestra representativa, que tenga un peso de 5 Kg. (11 lb).

5.3.1.3.3 Procedimiento

- ✓ Se mezcla perfectamente la muestra representativa escogida con agua suficiente para humedecer hasta, aproximadamente, 4 por ciento por debajo del contenido óptimo de humedad.
- ✓ Se prepara un espécimen compactando el suelo humedecido en el molde en cinco capas aproximadamente iguales y que de una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5"). Se compacta cada capa mediante 25 golpes uniformemente distribuidos con el martillo con una caída libre de 457 mm (18").
- ✓ Después de la compactación, se remueve el collar de extensión, se recorta cuidadosamente el suelo compactado que sobresalga en la parte superior del molde usando una regla metálica. Se pesa el molde con el suelo húmedo, en kilogramos, con aproximación de 5 g.
- ✓ Se saca la muestra compactada del molde y se corta verticalmente a través de su centro. Se toma una muestra representativa del material de una de las caras del corte; se pesa inmediatamente y se seca en un horno a 110 °C por un tiempo mínimo de 12 horas o hasta masa constante, para determinar el contenido de agua.²²

5.3.1.4 Método D: Este procedimiento se aplica a mezclas de suelos que tienen el 30% o menos retenido en el tamiz de 19 mm (3/4").

5.3.1.4.1 Equipo:

- ✓ Molde de diámetro 152.4 mm (6").
- ✓ Martillo de 4.54 Kg. (10 lb)

5.3.1.4.2 Muestra:

- ✓ Si escoge la muestra representativa de acuerdo al descrito en la sección 5.3.1.3.2 excepto que deberá tener una masa aproximada de 11 Kg. (25 lb).

²² INVE 142-9

5.3.1.4.3 Procedimiento

Se sigue el mismo procedimiento descrito para el método A en la sección 5.3.1.3.3, excepto en lo siguiente:

- ✓ Se prepara una muestra compactando el suelo humedecido en el molde, en cinco capas aproximadamente iguales, de tal manera que proporcionen una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5”), siendo compactada cada capa por medio de 56 golpes del martillo, uniformemente distribuidos.²³

5.3.2 Ensayo Proctor Modificado Mecánico

Los procedimientos para realizar ensayos tipo Proctor modificado Mecánico se realizan de igual forma a los manuales, pero la compactación en este caso es realizada por una maquina compactadora.

Dicha maquina fue diseñada para la compactación de manera automática para ensayos Proctor y CBR. Su funcionamiento asegura una perfecta compactación y garantiza la repetitividad de los resultados.

La base de la maquina compactadora hace girar el molde al mismo tiempo que la muestra es compactada, el movimiento de la base permite que los golpes sean distribuidos de manera uniforme en toda la muestra. Su sistema de fijación universal, le permite alojar moldes Proctor Normal de Ø 4”, Proctor Modificado y CBR Ø 6”.

La máquina permite seleccionar los parámetros del ensayo a realizar debido a que cuenta con el contador de golpes, el interruptor principal y la parada de emergencia. La máquina está compuesta por dos motores, uno encargado de la rotación de la base y otro de la elevación del martillo. La frecuencia de compactación es controlada mediante un microprocesador, lo que reduce el riesgo de un ineficaz funcionamiento.²⁴

²³ INVE 142-10

²⁴ Equipos de laboratorio para ensayos de materiales PROETISA, catálogo de compactador automático Proctor/CBR.

Tabla 4. Especificaciones técnicas compactadora automática.

Especificaciones técnicas	
Altura de caída del martillo: 18" (450 mm)	
Peso de martillo: 10 lb (4,5 Kg)	
Alimentación: 120 V	
Ciclos 50/60	
Dimensiones: 1422 x 419 x 762 mm	
Peso: 432 Lb (196 Kg)	
Compactadora Automática H 4189 HUMBOLDT	
	

Tabla 5. Especificaciones técnicas Molde

Especificaciones técnicas

Dimensiones: 150 mm de diámetro nominal con una capacidad de 2124 ± 0.021 lt, con un diámetro interno de 152.4 ± 0.1 mm.

Material: Laminado en frío de tubos de acero.

Incluye placa base desmontable, pernos y tuercas de mariposa.

Molde Proctor modificado



6. METOLOGÍA

6.1 Revisión bibliográfica

El primer paso para la realización de este estudio fue la búsqueda de información relacionada con los temas que intervienen en este trabajo de grado, los principales temas de interés son: clasificación de los suelos y los ensayos de compactación tipo Proctor modificado. La información se obtuvo principalmente de libros, tesis de grado, proyectos de investigación, bases de datos y normas técnicas.

6.2 Recolección de muestras

Para la recolección de muestras necesarias para realizar los diferentes ensayos de laboratorio (iniciando por clasificación del suelos, y seguido por la obtención del peso específico seco máximo y las humedades óptimas del suelo por medio de los ensayos Proctor modificado) se utilizó información proveniente de trabajos de grado realizados en la zona de la universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga. Se localizaron posibles fuentes de material en: el costado nororiental del edificio k y en el segundo nivel de parqueaderos para estudiantes en la Universidad Pontificia Bolivariana, siendo este último lugar el que cumplía con las especificaciones propuestas para el proyecto de grado.

Es importante tener en cuenta que debido a la utilización de las Normas INVIAS 2012 para la realización de los diferentes ensayos de clasificación y de compactación Proctor estándar (método C), se utilizaron aproximadamente 1750 kilos de muestra.

6.3 Ensayos de clasificación.

Para clasificar el tipo de suelo se tomó una pequeña muestra en los sitios elegidos como posibles fuentes de material, se le realizaron los ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla No 200 y límites de Atterberg a cada una de ellas, finalmente analizando los resultados obtenidos por parte de estos ensayos se estimó que el material proveniente del segundo nivel para parqueaderos de estudiantes en la Universidad Pontificia Bolivariana , cumplía con las propiedades para pertenecer al grupo de arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad (CL) según el sistema unificado de clasificación de suelos.

6.4 Ensayos de compactación

Luego de encontrar el suelo clasificado como arcilla inorgánica de baja comprensibilidad (CL), se realizaron 30 ensayos Proctor modificado en forma manual y 30 ensayos Proctor modificado en forma mecánica de los cuales se obtuvo la humedad óptima y el peso específico seco máximo representativos en cada tipo de ensayo, finalmente se establecieron relaciones entre los dos métodos.

6.5 Análisis y resultados

Con las humedades óptimas, los pesos específicos secos máximos y las energías de compactación empleadas tanto en los ensayos realizados de forma manual así como también en los ensayos realizados con la máquina compactadora se calcularon constantes, se establecieron tendencias, y determinaron errores.

7. RESULTADOS OBTENIDOS

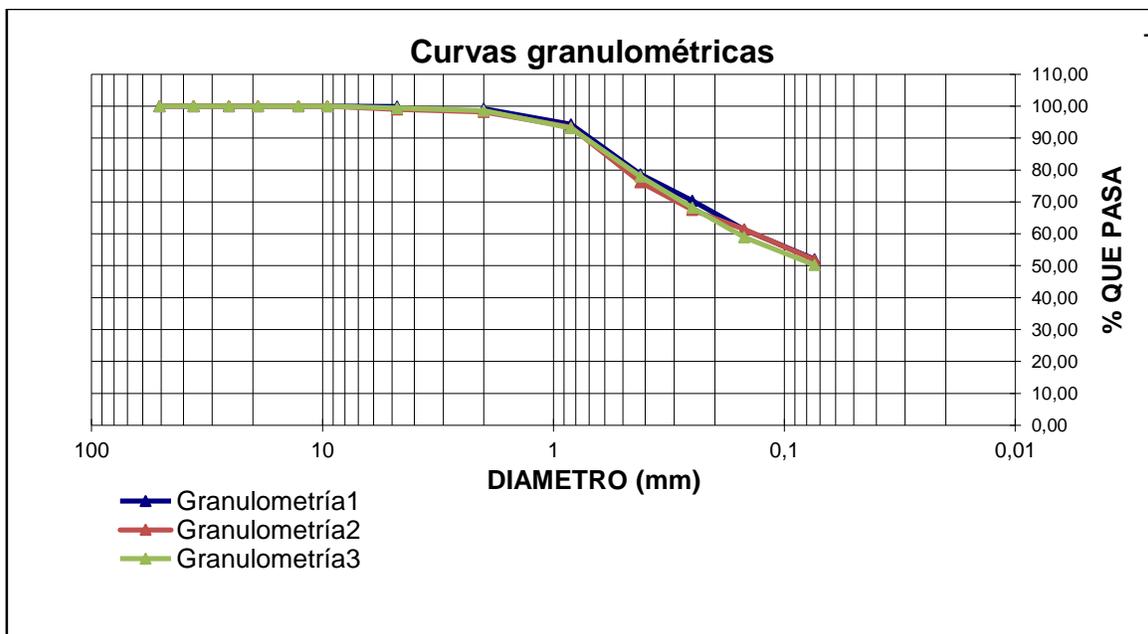
7.1. Resultados de la clasificación del suelo

Una vez concluidos los ensayos de clasificación (granulometría por tamizado con lavado por la malla N° 200, límite líquido y límite plástico) los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 6. Resultados ensayos de clasificación granulométrica.

Ensayo	% Gravas	% Arenas	% Finos
1	0,10	47,88	52,02
2	0,97	47,18	51,85
3	0,56	49,18	50,26
Promedio	0,54	48,08	51,38

Gráfica 1. Curvas granulométricas



Según los resultados que se muestran en la tabla 6, se puede apreciar que el suelo estudiado es fino ya que el contenido de material que pasa por la malla N° 200

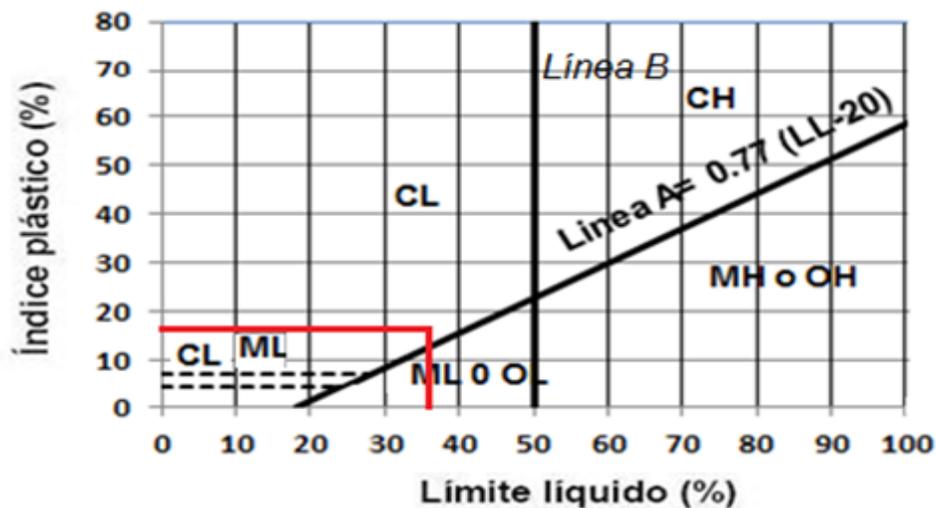
supera el 50% (51,38%), sin embargo el material presenta un alto contenido de arenas (48,08%).

Tabla 7. Resultados de ensayos límites de plasticidad.

Ensayo	Límite Líquido %	Limite Plástico %	Índice de Plasticidad %
1	37,79	20,56	17,23
2	36,71	20,99	15,72
3	35,81	21,1	14,71
Promedio	36,77	20,88	15,89

Una vez realizados los 3 ensayos de límites de plasticidad se obtuvieron como promedio los siguientes valores: %Límite líquido: 36,77; %Límite plástico: 20,88; %Índice de plasticidad: 15,89.

Figura 3. Carta de plasticidad según Casagrande



Fuente. Autor

Con los valores promedio del límite líquido y el índice de plasticidad, los cuales se muestran en la tabla 7 se ingresó en la carta de plasticidad de Casagrande,

encontrándose que el suelo objeto de estudio se encuentra por encima de la línea A pero a la izquierda de la línea B.

7.2. Resultados de los ensayos de compactación Proctor modificado realizados en forma manual y realizados en forma mecánica.

Finalmente se realizaron en total 60 ensayos de compactación Proctor modificado, los cuales 30 fueron en forma manual y 30 en forma mecánica. Los resultados de las densidades secas máximas y las humedades óptimas obtenidas en cada uno de ellos se encuentran reflejados en la siguiente tabla:

Tabla 8. Resultados ensayos de compactación Proctor modificado.

PROCTOR MANUAL			PROCTOR MAQUINA		
Nº	ω optima (%)	γ_d max (g/cm ³)	Nº	ω optima (%)	γ_d max (g/cm ³)
1	14,7	1,875	1	15,5	1,829
2	12,7	1,889	2	14,5	1,787
3	15,1	1,851	3	15,2	1,813
4	14,6	1,862	4	12,4	1,82
5	14,5	1,871	5	14,9	1,795
6	14,6	1,8	6	14	1,769
7	14,5	1,938	7	15,9	1,804
8	12,4	1,841	8	16	1,796
9	14,8	1,822	9	14,5	1,789
10	12,2	1,839	10	16,2	1,806
11	14,5	1,865	11	14,6	1,826

PROCTOR MANUAL			PROCTOR MAQUINA		
Nº	ω optima (%)	γ_d max (g/cm ³)	Nº	ω optima (%)	γ_d max (g/cm ³)
12	13,3	1,881	12	14	1,854
13	12,7	1,881	13	14	1,831
14	12,6	1,875	14	14,7	1,856
15	13,6	1,846	15	14	1,862
16	13,8	1,877	16	13,4	1,834
17	12	1,906	17	11,7	1,814
18	12,3	1,839	18	13,6	1,831
19	13,8	1,868	19	12	1,806
20	14,5	1,911	20	12,7	1,804
21	14,8	1,909	21	13	1,823
22	13,8	1,859	22	14,6	1,802
23	14,2	1,878	23	15,2	1,789
24	14	1,873	24	14,2	1,802
25	14	1,887	25	15,1	1,796
26	15	1,822	26	15,8	1,862
27	12,3	1,886	27	15,4	1,834
28	13,8	1,852	28	14,3	1,803
29	13,3	1,868	29	13,5	1,851
30	15,5	1,839	30	12,1	1,869
PROMEDIO	13,8	1,867	PROMEDIO	14,23	1,819
Mínimo	12	1,8	Mínimo	11,70	1,769
Máximo	15,5	1,938	Máximo	16,20	1,869
Desviación estándar	1,00	0,03	Desviación estándar	1,23	0,03
Coefficiente de variación	7,24	1,57	Coefficiente de variación	8,65	1,42

Fuente. Autor

La tabla 8 además de mostrar las densidades secas máximas y las humedades óptimas respectivas de cada uno de los 60 ensayos realizados, presenta los valores máximo y mínimo de estos, así como la desviación estándar y el coeficiente de variación.

De los ensayos Proctor modificado realizados en forma manual se obtuvo una humedad óptima promedio del 13,8% con una desviación estándar del 1% y un coeficiente de variación del 7,24%; el peso específico seco máximo promedio es 1,867 g/cm³ con una desviación estándar de 0,03 g/cm³ y un coeficiente de variación del 1,57%. El valor mínimo de la humedad óptima fue del 12% y el valor mínimo del peso específico seco máximo fue de 1,8 g/cm³, mientras que el valor máximo de la humedad óptima fue del 15,5% y el valor máximo del peso específico seco máximo fue de 1,938 g/cm³.

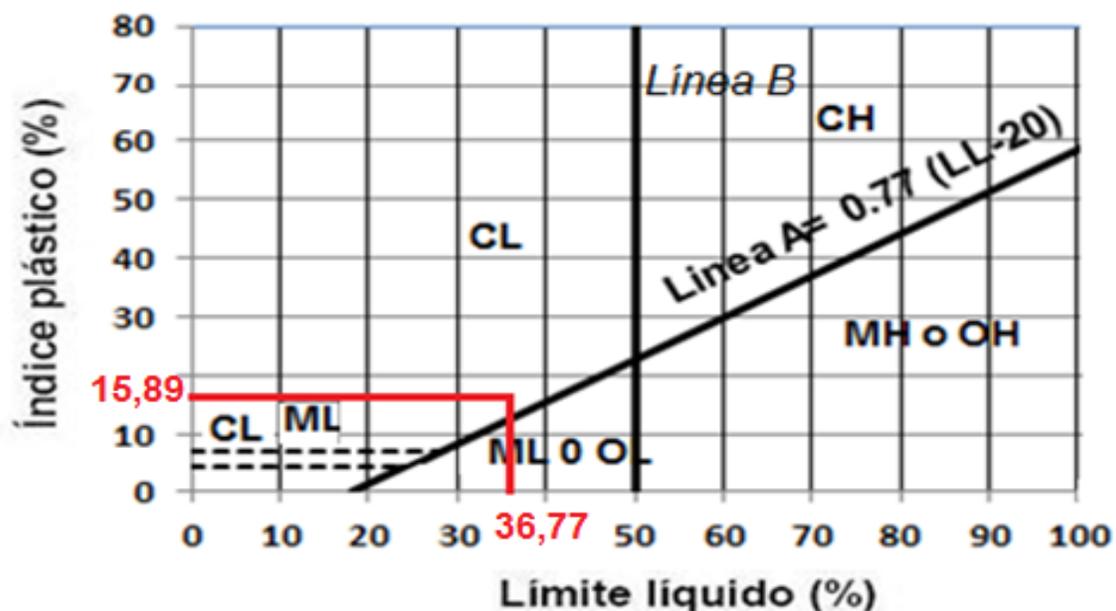
Mientras que en los ensayos Proctor modificado realizados en forma mecánica se obtuvo una humedad óptima promedio del 14,23% con una desviación estándar del 1,23% y un coeficiente de variación del 8,65%; el peso específico seco máximo promedio es 1,819 g/cm³ con una desviación estándar de 0,03 g/cm³ y un coeficiente de variación del 1,42%. El valor mínimo de la humedad óptima fue del 11,7% y el valor mínimo del peso específico seco máximo fue de 1,769 g/cm³, mientras que el valor máximo de la humedad óptima fue del 16,2% y el valor máximo del peso específico seco máximo fue de 1,869 g/cm³.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1. Clasificación del suelo

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, el suelo objeto de estudio en el presente trabajo de grado tiene un contenido de gravas del 0,54%, de arenas del 48,08% y de finos del 51,38%. Debido a que el contenido de finos es superior al 50%, el nombre correspondiente según el sistema unificado de clasificación de suelos lo definen el límite líquido (36,77%) y el índice de plasticidad (15,89%). Con estos dos valores al ingresar a la carta de plasticidad de Casagrande, se puede observar que el suelo se ubica sobre la línea A y a la izquierda de la línea B, correspondiendo al grupo de las arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad (CL) según el sistema unificado de clasificación de suelos.

Figura 4. Índice plástico y límite líquido en la carta de plasticidad según Casagrande.

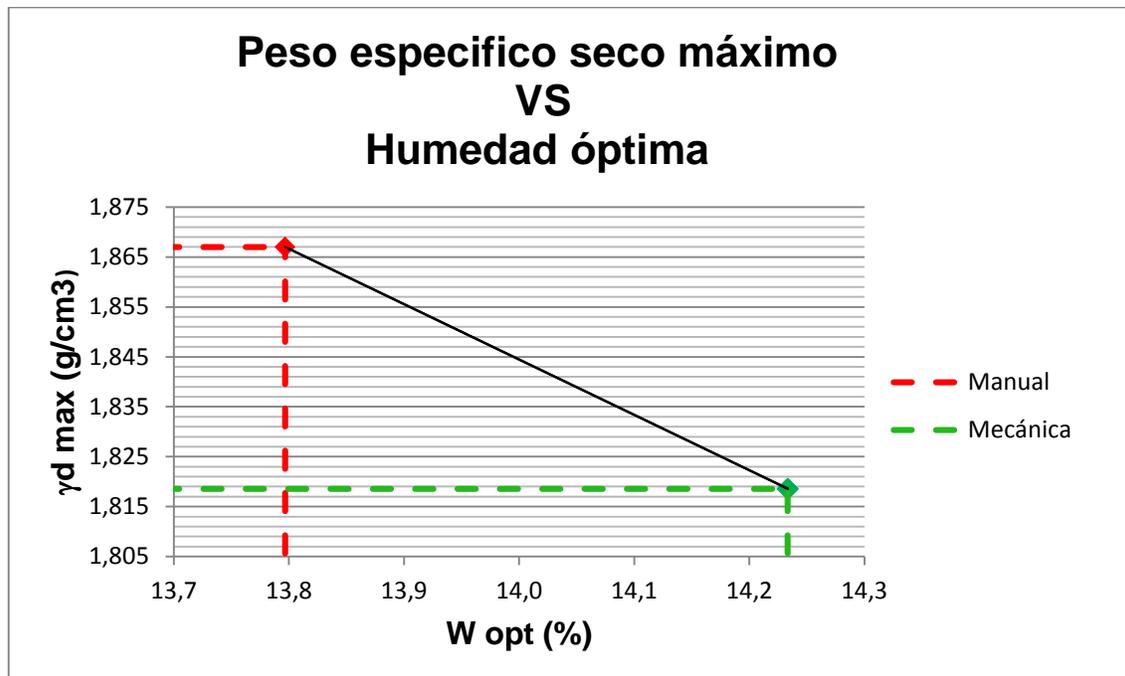


Fuente. Autor.

8.2. Ensayos de compactación

Al terminar los sesenta ensayos de compactación Proctor modificado (30 en forma manual y 30 en forma mecánica), se pudo observar que el mayor peso específico seco máximo corresponde a los ensayos realizados en forma manual, no obstante la menor humedad óptima proviene de los ensayos realizados en tal forma.

Gráfica 2. Peso específico seco máximo VS humedad óptima.



En la Gráfica 2 se puede observar que el peso específico seco máximo varía de manera inversamente proporcional en relación con la humedad óptima.

8.3. Calcula de las energías de compactación en los ensayos Proctor modificado.

Al compactar un material en el laboratorio en un molde tipo Proctor modificado se le aplica al material una energía. Esta energía se puede calcular mediante la

siguiente ecuación (Bowles, Joseph. Manual de Mecánica de suelos. Mc Graw Hill. Pg. 80):

$$CE = \frac{N^{\circ} \text{ DE CAPAS} * N^{\circ} \text{ DE GOLPES} * W \text{ DEL MARTILLO(N)} * A. \text{ DE CAIDA}}{VOLUMEN \text{ MOLDE } (cm^3) * 10^{-3}} \quad (3)$$

- **Ensayo de compactación Proctor Modificado en forma manual**

El ensayo de compactación Proctor modificado en forma manual se realizó en un molde (con su respectiva base y collar) el cual contaba con un volumen interior de 2117, 62 cm³, un martillo cuyo peso es de 4,55 Kg (44,61 N) cuya altura de caída libre es de 18 pulgadas (0,46 m). El número de capas usado para compactar fue de 5 y a cada capa se le aplico 56 golpes.

Tabla 9. Energía de Compactación Proctor Modificado en forma manual.

Vol. Molde(cm³)	2117, 62
Peso martillo (Kg)	4,55
Peso martillo (N)	44,61
Altura caída(m)	0,46
Nº Capas	5
Golpes/capa	56

$$CE = \frac{N^{\circ} \text{ DE CAPAS} * N^{\circ} \text{ DE GOLPES} * W \text{ DEL MARTILLO(N)} * A. \text{ DE CAIDA}}{VOLUMEN \text{ MOLDE } (cm^3) * 10^{-3}}$$

$$CE = \frac{5 * 56 * 44,61 * 0,46}{2117,62 * 10^{-3}}$$

$$CE = 2713,31 \text{ kJ/m}^3$$

Utilizando la ecuación para determinar la energía de compactación (Bowles, Joseph. Manual de Mecánica de suelos. Mc Graw Hill. Pg. 80) se obtuvo un resultado de 2713,31 kJ/m^3 .

- **Ensayo de compactación Proctor Modificado en forma mecánica**

El ensayo de compactación Proctor modificado en mecánica se realizó utilizando la máquina diseñada para la compactación de manera automática de probetas Proctor y CBR. El un molde incorporado en la maquina contaba con un volumen interior es de 2130,32 cm^3 , un martillo cuyo peso es de 4,45 Kg (43,63 N) cuya altura de caída libre es de 18 pulgadas (0,46 m). El número de capas usado para compactar fue de 5 y a cada capa se le aplico 56 golpes.

Tabla 10. Energía de Compactación Proctor Modificado en forma mecánica.

Vol. Molde(cm^3)	2130,32
Peso martillo (Kg)	4,45
Peso martillo (N)	43,63
Altura caída(m)	0,46
Nº Capas	5
Golpes/capa	56

$$CE = \frac{N^{\circ} \text{ DE CAPAS} * N^{\circ} \text{ DE GOLPES} * W \text{ DEL MARTILLO(N)} * A. \text{ DE CAIDA}}{VOLUMEN \text{ MOLDE} (\text{cm}^3) * 10^{-3}}$$

$$CE = \frac{5 * 56 * 43,63 * 0,46}{2130,32 * 10^{-3}}$$

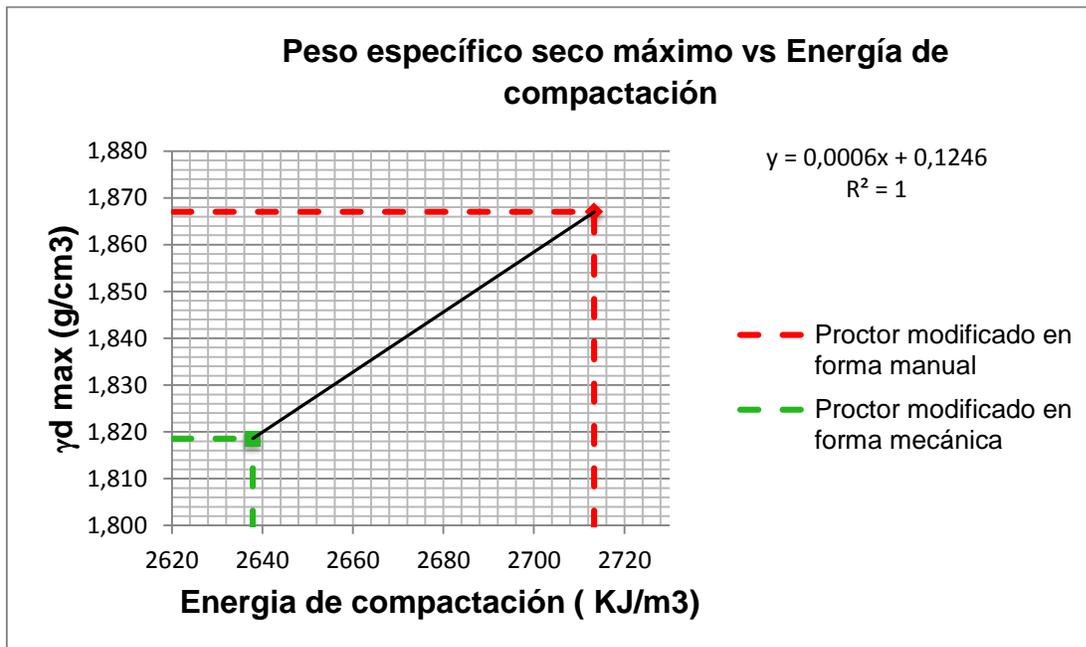
$$CE = 2637,89 \text{ kJ}/\text{m}^3$$

Utilizando la ecuación para determinar la energía de compactación (Bowles, Joseph. Manual de Mecánica de suelos. Mc Graw Hill. Pg. 80) se obtuvo un resultado de $2637,89 \text{ kJ/m}^3$.

8.4. Relación entre peso específico seco máximo y la energía de compactación.

Con los resultados de los ensayos de compactación realizados tanto de forma manual como de forma mecánica, se pudo obtener una relación entre el peso específico seco máximo logrado y la energía de compactación suministrada. Esta relación se muestra en la Gráfica 3.

Gráfica 3. Peso específico seco máximo VS Energía de compactación



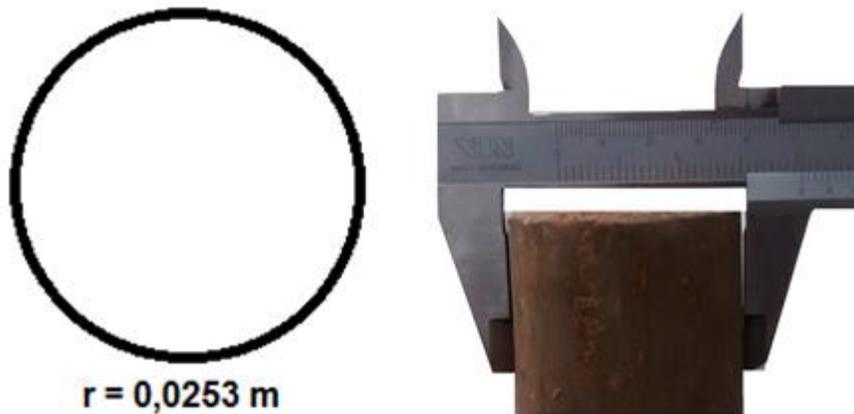
La Gráfica 3 muestra una relación directa entre el peso específico seco máximo y la energía de compactación, esta tendencia era de esperarse ya que la energía de

compactación suministrada en los ensayos realizados en forma manual es mayor, por lo tanto en este tipo de ensayos se logra una mayor disminución en la relación de vacíos.

El peso específico seco máximo obtenido en los ensayos realizados de forma manual es mayor con respecto al logrado en los ensayos realizados con la maquina compactadora, debido a:

- La energía de compactación suministrada en los ensayos realizados de forma manual es mayor respecto a la aplicada en los ensayos realizados de forma mecánica. Según la ecuación No. 3, se puede evidenciar que la energía de compactación varía de manera con el peso del martillo y de manera inversa con el volumen del molde. Una vez tomadas las dimensiones de los moldes y el peso de los martillos se encontró que el molde empleado para realizar los ensayos de forma manual tenía un volumen menor que el usado en los ensayos realizados de forma mecánica, mientras que el peso del martillo utilizado en los ensayos manuales fue mayor que el del martillo usado en los ensayos mecánicos.
- En el momento de realizar la compactación de forma manual, el operador a voluntad propia puede escoger los sectores de la sección transversal de la muestra que a su juicio aún no han sido densificados, mientras que en los ensayos mecánicos, la maquina compacta siempre los mismos sectores pudiendo ignorar algunos sectores mal compactados.
- Con respecto a la sección transversal de los martillos empleados cabe anotar que: el martillo utilizado en los ensayos manuales tiene un área circular mientras que el martillo empleado en los ensayos mecánicos tiene un área que corresponde a una punta cónica en la cual a medida que el pistón penetra en el suelo dicha área aumenta.

Figura 5. Sección transversal del martillo manual.



Fuente. Autor.

El radio del círculo de la sección transversal es: 0,0253 m. Por lo tanto el área del mismo es:

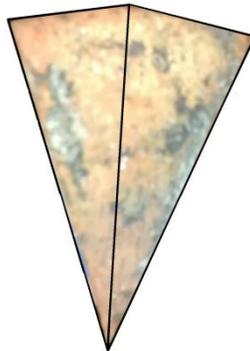
$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * 0,0253^2$$

$$A = 2,0109 * 10^{-3} m^2$$

El área que cada golpe del martillo ocupa es de $2,0109 * 10^{-3} m^2$.

Figura 6. Sección transversal del martillo mecánico.



Fuente. Autor.

La sección transversal del martillo mecánico es la unión de dos triángulos escalenos. Para conocer el área de dichos triángulos utilizamos la fórmula de Herón, donde s es el perímetro del triángulo y a,b,c sus lados, es decir $s=0,1741 m$, $a= 0,0269 m$, $b=0,0733 m$, y $c= 0,0739 m$

$$A = \sqrt{s * (s - a) * (s - b) * (s - c)} \quad (4)$$

$$A = \sqrt{0,1741 * (0,1741 - 0,0269) * (0,1741 - 0,0733) * (0,1741 - 0,0739)}$$

$$A = 0,016m^2.$$

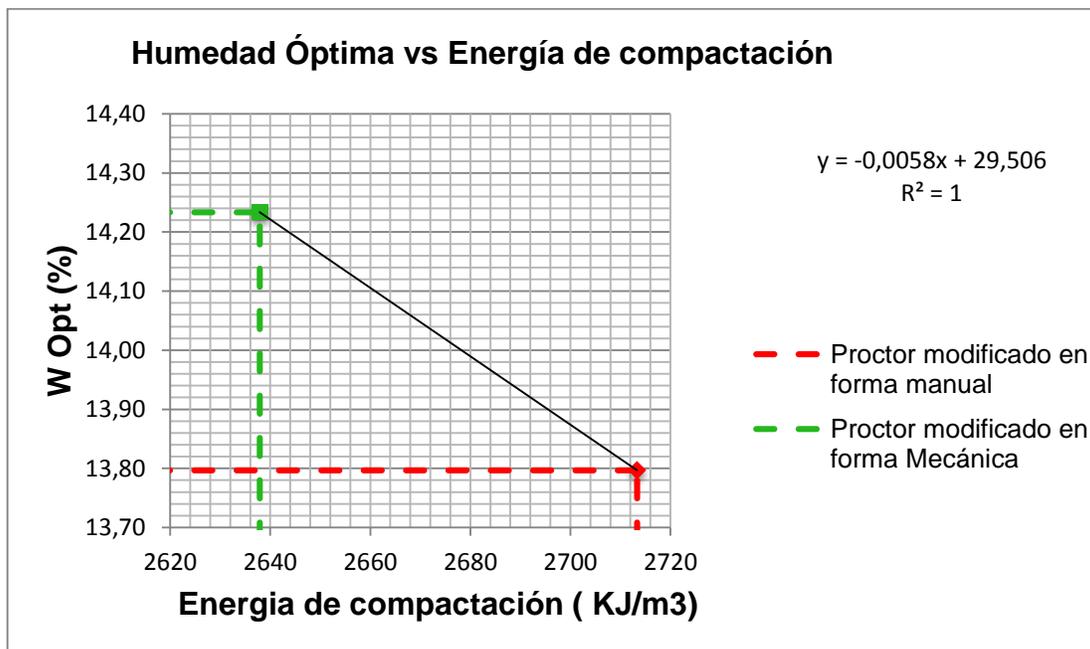
$$2 * A = 2 * 0,016 = 0,032 m^2$$

Como ya se había mencionado el área de la sección transversal del martillo manual (m²) es mayor al área de la sección transversal del martillo mecánico (m²).

8.5. Relación entre la humedad óptima vs energía de compactación.

A continuación se muestra la variación de la humedad óptima obtenida en los ensayo de compactación tipo Proctor modificado con respecto a la energía de compactación aplicada.

Gráfica 4. Humedad Óptima vs Energía de Compactación



En la gráfica 4 se puede apreciar que existe una relación inversa entre la humedad óptima y la energía de compactación. Esto se debe a que a una muestra en la cual

se ha logrado una mayor densidad no se necesita agregarle una gran cantidad de agua debido a que los vacíos son menores que aquellas muestras en las cuales la relación de vacíos es mayor y obtienen una densidad menor.

8.6. Relaciones encontradas entre los pesos específicos secos máximos y las humedades óptimas en las diferentes formas de ejecución de los ensayos de compactación tipo Proctor modificado.

Con el fin de cuantificar las diferencias obtenidas en ensayos de compactación tipo Proctor modificado, se determinó una relación entre los pesos específicos secos máximos de los ensayos realizados en forma manual y los ensayos realizados utilizando la máquina compactadora, de igual manera se estableció una relación entre las humedades óptimas de dichas formas del ensayo de compactación Proctor modificado, las cuales se presentan a continuación.

- $k_{\gamma d}$: RELACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO DE LOS ENSAYOS TIPO PROCTOR MODIFICADO EN FORMA MANUAL Y LOS ENSAYOS EN FORMA MECÁNICA.

$$k_{\gamma d} = \frac{\gamma_{dmaxManual}}{\gamma_{dmaxMecánica}}$$

$$k_{\gamma d} = \frac{1,867}{1,819}$$

$$k_{\gamma d} = 1,026$$

Esta relación se obtuvo con el fin de poder estimar el valor del peso específico seco máximo obtenido en un ensayo realizado de forma manual a partir del valor obtenido en una prueba mecánica. Esto podría lograrse solamente multiplicando el valor del peso específico seco máximo obtenido en la prueba mecánica por 1.026.

- K_{ω} : RELACIÓN EN LA HUMEDAD ÓPTIMA DE LOS ENSAYOS TIPO PROCTOR MODIFICADO EN FORMA MANUAL Y LOS ENSAYOS EN FORMA MECÁNICA.

$$K_{\omega} = \frac{\omega_{maxManual}}{\omega_{maxMecánica}}$$

$$K_{\omega} = \frac{13,80}{14,23}$$

$$K_{\omega} = 0,969$$

Esta relación se obtuvo con el fin de poder estimar el valor de la humedad óptima obtenida en un ensayo realizado de forma manual a partir del valor obtenido en una prueba mecánica. Esto podría lograrse solamente multiplicando el valor de la humedad óptima obtenida en la prueba mecánica por 0.969.

8.7. Comparación de los resultados obtenidos en forma manual con los resultados obtenidos en forma mecánica

A continuación se presentan los pesos específicos secos máximos y las humedades óptimas obtenidas en las pruebas Proctor modificado realizadas de forma manual y mecánica, así como también las diferencias en porcentaje presentadas en dichos parámetros de compactación. Vale la pena aclarar que los parámetros obtenidos en los ensayos realizados de forma manual se tomaron como los valores teóricos.

Tabla 11. Errores entre los pesos específicos secos máximos y humedades óptimas de los ensayos realizados en forma manual y los realizados en forma mecánica.

Nº	MANUAL		MECÁNICO		% ERROR	
	ω óptima (%)	μd max (g/cm ³)	ω óptima (%)	μd max (g/cm ³)	% ERROR ω óptima	% ERROR μd max
1	14,7	1,875	15,5	1,829	5,4	4,6
2	12,7	1,889	14,5	1,787	14,2	10,2
3	15,1	1,851	15,2	1,813	0,7	3,8
4	14,6	1,862	12,4	1,82	15,1	4,2
5	14,5	1,871	14,9	1,795	2,8	7,6
6	14,6	1,8	14	1,769	4,1	3,1
7	14,5	1,938	15,9	1,804	9,7	13,4
8	12,4	1,841	16	1,796	29,0	4,5
9	14,8	1,822	14,5	1,789	2,0	3,3
10	12,2	1,839	16,2	1,806	32,8	3,3
11	14,5	1,865	14,6	1,826	0,7	3,9
12	13,3	1,881	14	1,854	5,3	2,7
13	12,7	1,881	14	1,831	10,2	5
14	12,6	1,875	14,7	1,856	16,7	1,9
15	13,6	1,846	14	1,862	2,9	1,6
16	13,8	1,877	13,4	1,834	2,9	4,3
17	12	1,906	11,7	1,814	2,5	9,2
18	12,3	1,839	13,6	1,831	10,6	0,8
21	14,8	1,909	13	1,823	12,2	8,6
22	13,8	1,859	14,6	1,802	5,8	5,7
23	14,2	1,878	15,2	1,789	7,0	8,9
24	14	1,873	14,2	1,802	1,4	7,1
25	14	1,887	15,1	1,796	7,9	9,1
26	15	1,822	15,8	1,862	5,3	4
27	12,3	1,886	15,4	1,834	25,2	5,2
28	13,8	1,852	14,3	1,803	3,6	4,9
29	13,3	1,868	13,5	1,851	1,5	1,7
	MANUAL		MECÁNICO		% ERROR	
30	15,5	1,839	12,1	1,869	21,9	3
PROMEDIO	13,80	1,867	14,23	1,819	9,5	5,42
Desviación estándar	1,00	0,03	1,23	0,03		
Coefficiente de variación	7,24	1,57	8,65	1,42		

En la tabla 11 se puede apreciar los errores en las humedades óptimas obtenidas en las pruebas realizadas de forma mecánica con respecto a las logradas en las pruebas realizadas de forma manual varían entre 0,7% y 32,8% con un error promedio del 9,5%.

En la tabla 11 se puede apreciar los errores en los pesos específicos secos máximos obtenidos en las pruebas realizadas de forma mecánica con respecto a los logrados en las pruebas realizadas de forma manual varían entre 0,8% y 13,4% con un error promedio del 5,42%.

8.8. Comparación de los resultados obtenidos en forma manual con los resultados obtenidos en forma mecánica ajustados por el coeficiente $k_{\gamma d}$.

Una vez encontrado el coeficiente de ajuste por densidad $k_{\gamma d}$ y por humedad K_{ω} se procedió a multiplicar los valores de peso específico seco máximo y humedad óptima obtenidos en los ensayos realizados en forma mecánica por dichos coeficientes y compararlos con los obtenidos en los ensayos manuales.

Tabla 12. Coeficientes de ajuste de la densidad seca máxima $k_{\gamma d}$ y la humedad óptima K_{ω} .

$k_{\gamma d}$	1,026
K_{ω}	0,969

Tabla 13. Pesos específicos secos y humedades óptimas corregidas por los coeficientes $k_{\gamma d}$ y K_{ω} .

Nº	MANUAL		MAQUINA		CORREGIDO		% ERROR	% ERROR
	ω optima (%)	μd max (g/cm3)	ω optima (%)	μd max (g/cm3)	ω optima (%)	μd max (g/cm3)	% ERROR ω optima	% ERROR μd max
1	14,7	1,875	15,5	1,829	15,020	1,877	2,2	0,1
2	12,7	1,889	14,5	1,787	14,051	1,833	10,6	2,9
3	15,1	1,851	15,2	1,813	14,729	1,860	2,5	0,5
4	14,6	1,862	12,4	1,82	12,016	1,867	17,7	0,3
5	14,5	1,871	14,9	1,795	14,438	1,842	0,4	1,6
6	14,6	1,8	14	1,769	13,566	1,815	7,1	0,8
7	14,5	1,938	15,9	1,804	15,407	1,851	6,3	4,5
8	12,4	1,841	16	1,796	15,504	1,843	25,0	0,1
9	14,8	1,822	14,5	1,789	14,051	1,836	5,1	0,7
10	12,2	1,839	16,2	1,806	15,698	1,853	28,7	0,8
11	14,5	1,865	14,6	1,826	14,147	1,873	2,4	0,5
12	13,3	1,881	14	1,854	13,566	1,902	2,0	1,1
13	12,7	1,881	14	1,831	13,566	1,879	6,8	0,1
14	12,6	1,875	14,7	1,856	14,244	1,904	13,1	1,6
15	13,6	1,846	14	1,862	13,566	1,910	0,3	3,5
16	13,8	1,877	13,4	1,834	12,985	1,882	5,9	0,2
17	12	1,906	11,7	1,814	11,337	1,861	5,5	2,4
18	12,3	1,839	13,6	1,831	13,178	1,879	7,1	2,2
21	14,8	1,909	13	1,823	12,597	1,870	14,9	2,0
22	13,8	1,859	14,6	1,802	14,147	1,849	2,5	0,5
23	14,2	1,878	15,2	1,789	14,729	1,836	3,7	2,3
24	14	1,873	14,2	1,802	13,760	1,849	1,7	1,3
25	14	1,887	15,1	1,796	14,632	1,843	4,5	2,3
26	15	1,822	15,8	1,862	15,310	1,910	2,1	4,9
27	12,3	1,886	15,4	1,834	14,923	1,882	21,3	0,2
28	13,8	1,852	14,3	1,803	13,857	1,850	0,4	0,1
29	13,3	1,868	13,5	1,851	13,082	1,899	1,6	1,7
30	15,5	1,839	12,1	1,869	11,725	1,918	24,4	4,3
PROMEDIO	13,80	1,867	14,23	1,819	13,792	1,8658	8,6	1,6
Desviación estándar	1,00	0,03	1,23	0,03	1,19	0,03		
Coefficiente de variación	7,24	1,57	8,65	1,42	8,65	1,42		

En la tabla 13 se puede apreciar que al multiplicar las humedades óptimas obtenidas en los ensayos mecánicos por su coeficiente de ajuste, los errores cometidos en las humedades corregidas respecto a las humedades obtenidas de forma manual varían entre 0,3% y 24,4% con un error promedio del 8,6%.

También en la tabla 13 se puede apreciar que al multiplicar los pesos específicos secos máximos obtenidos en los ensayos mecánicos por su coeficiente de ajuste, los errores cometidos en los pesos específicos secos máximos corregidos respecto a los pesos específicos secos máximos obtenidos de forma manual varían entre 0,1% y 4,9% con un error promedio del 1,6%.

9. CONCLUSIONES

- Con la información obtenida en otros trabajos de grado acerca del suelo presente en el costado nororiental del edificio k y al presente en el segundo nivel de parqueaderos para estudiantes en la Universidad Pontificia Bolivariana, se encontró que el tipo de suelo correspondiente a una arcilla inorgánica de baja compresibilidad (CL) necesaria para este trabajo de grado, estaba presente en el segundo nivel de parqueaderos para estudiantes.
- Después de tener la ubicación del material requerido, se realizaron 3 ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla N° 200 y 3 de límites de Atterberg encontrando un suelo fino con un alto contenido de arenas cuyo nombre fue definido ingresando a la carta de plasticidad de Casagrande como una arcilla inorgánica de baja compresibilidad (CL) según el sistema unificado de clasificación de suelos.
- Se realizaron 30 ensayos de compactación Proctor modificado de forma manual y se encontró que la humedad óptima promedio de la arcilla inorgánica de baja compresibilidad estudiada es del 13,80 % y el peso específico seco máximo promedio es de $1,867 \text{ g/cm}^3$.
- Se realizaron 30 ensayos de compactación Proctor modificado utilizando la maquina compactadora y se encontró que la humedad óptima promedio de la arcilla inorgánica de baja compresibilidad estudiada es del 14,23 % y el peso específico seco máximo promedio es de $1,819 \text{ g/cm}^3$.
- De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de compactación tipo Proctor modificado realizados tanto de forma manual así como también de forma mecánica se puede evidenciar que entre más alta sea la densidad seca máxima menor será la humedad óptima y viceversa. Esto se debe a que un suelo que

ha sido intensamente compactado (es decir tiene una menor relación de vacíos) tiene una capacidad menor para absorber agua.

- Si se desea calcular la energía de compactación se debe conocer el volumen del molde utilizado, el número de capas, el número de golpes por capa y tanto el peso como la altura del martillo usado. Con los implementos suministrados en el laboratorio de Geotecnia y Pavimentos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga se obtuvo una energía de compactación de $2713,31 \text{ Kj/m}^3$ en la prueba Proctor modificado realizada de forma manual mientras que para la prueba realizada de forma mecánica se obtuvo una energía de compactación de $2637,89 \text{ Kj/m}^3$.
- Una de las razones que motivó la ejecución del presente trabajo de grado fue el poder estimar de manera aproximada los parámetros de compactación correspondientes a ensayos tipo Proctor modificado realizados de forma manual sobre las arcillas inorgánicas de baja compresibilidad de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga a partir de los obtenidos en pruebas realizadas de forma mecánica. En el caso del peso específico seco bastaría con multiplicar el obtenido en la prueba mecánica por el coeficiente $k_{\gamma d} = 1,026$ y de esta forma se obtendría un resultado aproximado de dicho parámetro correspondiente a la prueba manual. De la misma manera si se desea estimar el valor de la humedad óptima correspondiente a una prueba Proctor modificado realizada de forma manual, bastaría con multiplicar la obtenida en una prueba realizada de forma mecánica por el coeficiente $K_{\omega} = 0,96$.
- Al comparar las humedades óptimas de compactación obtenidas tanto en las pruebas realizadas de forma manual así como también las realizadas de forma mecánica se observa que el error promedio en la humedad lograda en las pruebas mecánicas es del 9,5% con respecto a las pruebas realizadas de forma

manual. Una vez afectadas las húmedas de las pruebas mecánicas por el coeficiente de ajuste $K_{\omega} = 0,96$ el error promedio logra reducirse al 8,6%.

- Al comparar los pesos específicos secos máximos obtenidos tanto en las pruebas realizadas de forma manual así como también las realizadas de forma mecánica se observa que el error promedio en los pesos específicos secos máximos logrados en las pruebas mecánicas es del 5,42% con respecto a los logrados en las pruebas realizadas de forma manual. Una vez afectados los pesos específicos secos máximos de las pruebas mecánicas por el coeficiente de ajuste $k_{\gamma d} = 1,026$ el error promedio logra reducirse al 1,6%.
- Los coeficientes de ajuste tanto del peso específico seco máximo como de la humedad óptima obtenidos en este trabajo de grado se calcularon con el fin de reducir el esfuerzo físico realizado por el laboratorista en las pruebas de compactación Proctor modificado realizadas sobre las arcillas inorgánicas de baja compresibilidad, motivando el uso de la maquina compactadora de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.
- Al realizar ensayos de compactación tipo Proctor modificado de forma mecánica se tiene la certeza de obtener un error constante en todos los resultados obtenidos en dicha forma, esto debido a que la maquina compactadora siempre tiene la misma eficiencia, mientras que en los ensayos de forma manual la compactación depende del operador (estado físico y emocional) y por lo tanto es evidente que existe una variación de los resultados.
- Implementar el uso de la maquina compactadora en la realización de ensayos de compactación resulta beneficioso debido a que la maquina no sufre variación alguna en el transcurso de los ensayos, mientras un operador que realice la compactación en forma manual se ve afectado por las condiciones a las cuales

se ve sometido en el transcurso de la realización de los ensayos, por lo tanto la eficiencia de la maquina compactadora es mayor que la de producida por un operador en ensayos manuales.

- Los errores obtenidos en los ensayos realizados de forma mecánica presentan un margen de error considerable debido a la falta de mantenimiento requerida para estos equipos.

10.RECOMENDACIONES

- Es fundamental darle continuidad al tema estudiado este trabajo de grado obteniendo las relaciones entre los pesos específicos secos máximos y las humedades de compactación obtenidas en las pruebas tipo Proctor modificado realizadas tanto de forma manual así como también de forma mecánica estudiando otros tipos de suelos.
- Debido a la vibración producida por la maquina compactadora los tornillos se desgastan periódicamente, por lo tanto es conveniente tener en depósito almacenados varios juegos de estos.
- Los ensayos requeridos para la realización de este trabajo de grado se basaron en las normas INVIAS 2012. Estas normas requieren de un mayor número de muestras por ensayo así como también de un mayor tiempo de curado de las mismas, por tal motivo se recomienda adquirir un mayor número de recipientes para preservar las humedades.
- En el momento de realizar un ensayo de compactación tipo Proctor modificado de forma manual es importante que este sea ejecutado por un solo operador debido a que si otra persona interfiere puede generar accidentes en el laboratorio.
- Para los ensayos de compactación tipo Proctor modificado realizados en forma mecánica es indispensable que el operador de la maquina compactadora este pendiente de la misma en todo el ensayo debido a que su vibración genera que los tornillos (usados para ajustar el molde en la base

giratoria) se salgan y el molde pierda su lugar específico por lo que es necesario detener inmediatamente la máquina.

- Extraer las muestras de los moldes cuando ya han sido compactados se convierte en un trabajo difícil para el operador debido a que la muestra se adhiere a las paredes del molde y se endurece, por lo tanto necesita aplicar una gran fuerza e invertir tiempo significativo en sacar la muestra, para disminuir estos factores se recomienda adquirir un extractor para Proctor.
- Al realizar cualquier actividad en el laboratorio de Geotecnia y Pavimentos se recomienda utilizar todos los utensilios de seguridad (gafas, guantes, tapa bocas, bata, botas), esto con el fin de evitar accidentes y/o enfermedades.

BIBLIOGRAFÍA

JUÁREZ BADILLO, Eulio y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelos: fundamentos de la mecánica de suelos. México. Limusa Noriega Editores, tomo 1, 2000. 642 p.

BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. 213 p.

BOWLES, Joseph E. Propiedades Geofísicas de los suelos. Editorial McGraw-Hill. 1982. 366 p.

CRESCO V., Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones. 4 ed. México. Editorial Limusa Noriega Editores. 1999. 639 p.

COLOMBIA, INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Especificaciones generales de construcción de carreteras y normas de ensayo. Bogotá D.C. 2007. 10 p.

ESCUELA DE INGENIEROS MILITARES. Manual de laboratorio de suelos. Editorial Margabby Ltda. 1989. 61 p.