

**COMPARACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD
ÓPTIMA EN LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PARA LAS ARENAS
LIMOSAS DE LA UPB SECCIONAL BUCARAMANGA.**

**ANGÉLICA MARÍA CAMARGO GÓMEZ
MAYRA ALEJANDRA RANGEL FLÓREZ**

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

2014

**COMPARACIÓN DEL PESO ESPECÍFICO SECO MÁXIMO Y HUMEDAD
ÓPTIMA EN LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PARA LAS ARENAS
LIMOSAS DE LA UPB SECCIONAL BUCARAMANGA**

**ANGÉLICA MARÍA CAMARGO GÓMEZ
MAYRA ALEJANDRA RANGEL FLÓREZ**

Trabajo de grado para optar el título de ingeniera civil.

Director:

Ing. Msc. GERARDO BAUTISTA GARCÍA

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

2014

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, 08/03/2014

DEDICATORIA

Dedicado a...

A Dios por ser siempre ese sentimiento de alegría, tranquilidad y serenidad en cada momento de esta etapa de vida que esta próxima a culminar espero ser digno por tan valioso esfuerzo.

A mis padres y hermana, no hay un día en el que no le agradezca a Dios el haberme colocado entre ustedes, la fortuna más grande es tenerlos conmigo y el tesoro más valioso son todos y cada uno de los valores que me inculcaron.

A Diego Armando, esposo incondicional, bella persona que demuestra la sencillez sin juzgar, gracias por tu amor y apoyo, factor fundamental que me brindan equilibrio.

Mayra Alejandra Rangel Flórez.

Dedicado a...

A Dios por iluminar mi camino en este nuevo logro.

A mis padres por apoyo incondicional y constante durante el transcurso de este proyecto.

A mis profesores, por sus enseñanzas, conocimientos y experiencias que me compartieron y a todos mis compañeros que me motivaron a seguir adelante.

Angélica María Camargo Gómez

AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han formado parte de este proyecto a las que queremos darle un agradecimiento muy especial por sus consejos, apoyo, que de una u otra manera hicieron que esto sea posible.

A nuestro director de tesis, Ing. GERARDO BAUTISTA por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación ha logrado en el desarrollo de este proyecto.

También agradecer a los profesores durante toda nuestra carrera profesional porque todos han aportado con un granito de arena en esta formación.

De igual manera al señor HELI RUEDA, laboratorista de la universidad Pontificia Bolivariana, quien con su experiencia ayudo en la ejecución de todos los ensayos de este proyecto de grado.

Para ellos muchas gracias y que Dios bendiga.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. OBJETIVOS.....	14
1.1 OBJETIVO GENERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
3. JUSTIFICACIÓN.....	17
4. ANTECEDENTES.....	18
5. MARCO TEÓRICO	20
5.1 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN	21
5.1.1 Proctor Modificado	22
5.1.2 Proctor Estándar	24
5.1.3 Harvard Miniatura	26
5.2 TIPOS DE SUELOS	27
5.2.1 Arcillas	28
5.2.2 Arenas.....	28
5.2.3 Gravas	28
5.2.4 Limos	28
5.2.5 Suelos Turbosos.....	29
5.2.6 Suelos Orgánicos.....	29
5.2.7 Suelos Cementados.....	29
5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS.....	30
5.3.1 Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS).....	30
5.3.2 Sistema de Clasificación AASHTO	38
6. METODOLOGÍA	41
6.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	41

6.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRA	41
6.3 ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN.	41
6.4 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN	42
6.5 ANÁLISIS Y RESULTADOS	42
7. RESULTADOS OBTENIDOS.....	43
7.1 RESULTADOS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	43
7.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO, ESTÁNDAR Y HARVARD MINIATURA.	45
8. ANALISIS DE RESULTADOS.....	48
8.1. CLASIFICACIÓN DEL SUELO	48
8.2 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN	48
8.3 DETERMINACIÓN DE LAS ENERGIAS DE COMPACTACIÓN EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS.	49
8.4 RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA DE COMPACTACION Y EL PESO ESPECÍFICO SECA MAXIMO	52
8.5 RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN Y LA HUMEDAD ÓPTIMA.	55
8.7 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO CON LOS RESULTADOS DE LAS RELACIONES DE HARVARD MINIATURA.....	61
9. CONCLUSIONES	64
10. RECOMENDACIONES.....	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Tipos de suelos.....	27
Figura 2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Suelos de grano grueso)...	31
Figura 3. Carta de Plasticidad.....	36
Figura 4. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Suelos de grano fino)...	37
Figura 5. Carta de Plasticidad.....	44

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Curva Granulométrica.	43
Gráfica 2. Peso específico máximo vs Humedad Óptima	49
Gráfica 3. Peso específico seco máximo vs Energía de compactación (lineal)	52
Gráfica 4. Peso específico seco máximo vs Energía de compactación (Exponencial)	53
Gráfica 5. Peso específico seco máximo vs Energía de compactación (Polinómica)	54
Gráfica 6. Humedad Óptima vs Energía de Compactación (Lineal).....	55
Gráfica 7. Humedad Óptima vs Energía de Compactación (Exponencial).....	56
Gráfica 8. Humedad Óptima vs Energía de Compactación (Polinómica).....	56

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Comparación entre ensayo Proctor modificado y Proctor estándar.	26
Tabla 2. Sistema de clasificación AASHTO	39
Tabla 3. Resultados ensayos de granulometría.....	43
Tabla 4. Resultados de ensayos límites de plasticidad.....	44
Tabla 5. Resultados Ensayos de Compactación.....	45
Tabla 6. Energía de Compactación Proctor Modificado.....	50
Tabla 7. Energía de Compactación Proctor Estándar.....	51
Tabla 8. Energía de Compactación Harvard Miniatura.	51
Tabla 9. Comparación Proctor modificado y Harvard miniatura.....	61

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Comparación del peso específico seco máximo y humedad óptima en los ensayos de compactación para las arenas limosas de la UPB seccional Bucaramanga

AUTOR: Angélica María Camargo Gómez- Mayra Alejandra Rangel Flórez.

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil.

DIRECTOR: Gerardo Bautista García.

RESUMEN

El presente trabajo de grado tuvo como objetivo la comparación del peso específico seco máximo y humedad óptima en los ensayos de compactación para las arenas limosas de la UPB seccional Bucaramanga.

Para llevar a cabo el presente trabajo, se tomaron muestras alteradas pero representativas para determinar su clasificación por medio de los ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla No 200 y límites líquido y plástico. Una vez clasificado el suelo se procedió a realizar los ensayos de compactación Proctor estándar, Proctor modificado y Harvard miniatura con el fin de hallar el peso específico seco máximo y la humedad óptima en cada uno de esos ensayos. En total se realizaron 30 ensayos Proctor modificado, 30 Proctor estándar y 30 Harvard miniatura.

Una vez realizados todos los ensayos se procedió a establecer relaciones entre los pesos específicos secos máximos de cada ensayo, así como también relaciones entre las humedades óptimas de dichos ensayos. Además se analizó la variación del peso específico máximo y la humedad óptima con la energía de compactación aplicada en cada ensayo.

PALABRAS CLAVES: Proctor, compactación, densidad, humedad, arenas, vacíos.

GENERAL SUMMARY OF WORK GRADE

TITLE: Comparison of maximum dry unit weight and optimum moisture in compaction tests for silty sands of the sectional UPB Bucaramanga.

AUTHOR: Angélica María Camargo Gómez- Mayra Alejandra Rangel Flórez.

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil.

DIRECTOR: Gerardo Bautista Garcia.

ABSTRACT

The present work aimed grade comparison of maximum dry unit weight and optimum moisture for compaction testing silty sands Bucaramanga branch UPB.

To perform this work, altered representative samples were taken to determine their classification by particle size testing sieve with No 200 mesh washing, liquid and plastic limit. Once the land classified proceeded to perform the standard Proctor and modified Proctor compaction tests Harvard thumbnail to find the maximum dry unit weight and optimum moisture in each of these trials. A total of 30 trials modified Proctor, 30 standard Proctor and 30 miniature Harvard were made.

The tests were made, It was proceeded to establish relationships between the maximum dry unit weights of each test, as well as relations between the optimum moisture of such tests. Also the variation of the maximum unit weight and optimum moisture against energy compaction applied in each trial was analyzed.

KEYWORDS: Proctor, compaction, density, humidity, sand, void.

INTRODUCCIÓN

La compactación de los suelos es importante para aumentar su densidad y su resistencia, disminuir los vacíos y las deformaciones producidas por las cargas posteriores al proceso de compactación.

Es claro que entre mayor sea la energía utilizada durante un proceso de compactación, mayor será la densidad obtenida para el material utilizado y menor será la relación de vacíos final de dicho material.

Es importante previo a la compactación de un material in-situ, conocer tanto la densidad seca máxima que se puede lograr con dicho material, así como también la humedad con la cual dicha densidad se alcanza. Estos parámetros se obtiene en el laboratorio mediante pruebas de uso común y una vez dichos parámetros se determinan, se procede a compactar el material en campo con la humedad optima y el equipo adecuado, para de esta forma lograr un grado de compactación igual o superior al requerido según el tipo de capa granular o relleno.

Los dos ensayos de compactación más utilizados son el Proctor modificado y Proctor estándar, estos ensayos (especialmente el modificado) demandan de un esfuerzo físico considerable por parte del operador, por tal motivo a través del presente trabajo de grado se establecieron constantes que permiten estimar los parámetros de compactación que se obtendrían en estos ensayos a partir de los logrados en un ensayo en el cual la energía de compactación aplicada es baja, como lo es el ensayo Harvard miniatura.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Establecer una relación entre la densidad seca máxima y la humedad óptima de compactación para las arenas limosas de la Universidad Pontificia Bolivariana, por medio de tres ensayos de compactación: Proctor estándar, Proctor modificado y Harvard miniatura

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana, el sitio donde se van a tomar las muestras para el desarrollo del presente trabajo
- Realizar los ensayos de clasificación para identificar el tipo de suelo con el que se va a trabajar
- Determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima de compactación por medio de los ensayos Proctor estándar, Proctor modificado y Harvard miniatura.
- Establecer una relación entre los resultados obtenidos en todos los ensayos de compactación.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En 1933 R.R. PROCTOR estableció un ensayo de laboratorio conocido como Proctor estándar, el cual reproducía las densidades obtenidas con los equipos de esa época, la energía de compactación del suelo en el ensayo estándar es de $593,7 \text{ kJ/m}^3$.¹

Hacia mediados de la década de los 40's del siglo pasado aparecieron en el mercado equipos de compactación, con los cuales se obtenían densidades muy superiores a las de la prueba estándar, por lo tanto, el ensayo sufrió modificaciones aumentando el peso del martillo de compactación, la altura de caída de este, el número de golpes y el número de capas, de tal forma que la energía de compactación aplicada con el equipo modificado es de 2710 kJ/m^3 .

El ensayo más utilizado en Colombia es el Proctor modificado, ya que, reproduce en el laboratorio la energía de compactación suministrada en campo por los equipos actuales, como ya se mencionó atrás, dicho ensayo es el de mayor tiempo de ejecución, el que utiliza el martillo más pesado (10 lb), el de mayor altura de caída (18"), el de mayor números de capas (5) y el de mayor número de golpes por capa (55) por lo tanto es el que mayor esfuerzo requiere por parte del operador.

El uso del ensayo de compactación Harvard miniatura no es muy común debido a la poca energía suministrada, no comparable con las de los equipos de compactación en campo. El presente trabajo pretende establecer una relación entre el peso específico seco máximo y la humedad óptima obtenidos en el ensayo Harvard miniatura y los obtenidos en los ensayos Proctor estándar y

¹ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980.

Proctor modificado y de esta forma establecer la equivalencia de dichas variables entre sí.

3. JUSTIFICACIÓN

Debido al gran esfuerzo físico que tiene que realizar un laboratorista durante la ejecución de un ensayo Proctor modificado es importante obtener correlaciones con los resultados de dicha prueba a partir de los obtenidos por medio de otros ensayos de compactación en los cuales se aplique una menor energía y que por lo tanto requieran de un esfuerzo físico menor, estos ensayos son el Proctor estándar y el Harvard miniatura

Por medio de este trabajo se pretende establecer las constantes de correlación entre las humedades óptimas de compactación de los ensayos mencionados atrás y las constantes de correlación entre los pesos específicos secos máximos de dichos ensayos.

Muy probablemente las constantes de correlación no son iguales para los diferentes tipos de suelos. En la investigación propuesta solamente se van a estudiar las arenas limosas presentes en las instalaciones de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga.

4. ANTECEDENTES

Actualmente existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en el laboratorio unas condiciones dadas de compactación de campo. Históricamente, el primer método, en el sentido de la técnica actual, es el debido R. R. Proctor y es conocida hoy en día como “Prueba Proctor Estándar “. La prueba consiste en compactar el suelo en tres capas dentro de un molde de dimensiones y forma determinadas por medio de golpes con un pistón que se deja caer libremente desde una altura específica.

Con este procedimiento de compactación, Proctor estudió la influencia que ejercía en el proceso el contenido inicial del agua en el suelo, encontrando que tal valor era de vital importancia en la compactación lograda. En efecto observó que a contenidos de humedad crecientes, a partir de valores bajos, se obtenían más altos pesos específicos y, por lo tanto, mejores compactaciones del suelo, pero que esta tendencia no se mantenía indefinidamente, sino que a partir de cierta humedad, los pesos específicos secos obtenidos disminuían, resultando peores compactaciones. Proctor puso de manifiesto que, para un suelo existe una humedad llamada “óptima”, que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación.

Con la aparición de nuevos equipos de compactación una década más tarde, Proctor modificó las dimensiones del molde de compactación, del pistón y su altura de caída, para reproducir de una mejor manera la energía suministrada en campo por los nuevos equipos de compactación, a esta nueva prueba se le llamó Proctor Modificado. En el año 2003 en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga, el estudiante Néstor Giovanny Rueda, realizó un proyecto de grado titulado “CALIBRACIÓN DE EQUIPOS Y ANÁLISIS DE MÉTODOS ALTERNOS PARA DETERMINACIÓN DE HUMEDAD,

COMPACTACIÓN Y LIMITE DE CONTRACCIÓN EN DIFERENTES TIPOS DE SUELO “. Para cada método se realizaron diferentes ensayos y se hicieron comparaciones de los resultados obtenidos con cada uno, para determinar la confiabilidad en los diferentes tipos de suelo estudiados.

5. MARCO TEÓRICO

La compactación de un suelo suele conocerse como un método de estabilización, es un factor muy importante ya que gracias a él se mejoran las propiedades físicas de dicho suelo debido a que el esfuerzo que imparte a este da un incremento en la resistencia al corte, un incremento en su densidad, una disminución de la contracción, una disminución en la permeabilidad y una disminución en la compresibilidad. Es indispensable conocer el tipo de suelo al que se le desea aplicar la compactación ya que no todos los suelos se comportan de igual manera, todos los criterios de compactación deben estar fundados según su resistencia, permeabilidad, según las propiedades de diseño requeridas para que sean totalmente útiles los datos que suministran las gráficas obtenidas en el laboratorio después de dicho ensayo. Por ejemplo en suelos muy finos se ve una variación en la permeabilidad al comparar la compactación dada en el lado húmedo con respecto al lado seco.

La reducción de la relación de vacíos se puede presentar de varias maneras como la acomodación de las partículas, fractura de granos unidos entre ellos seguida por reordenación y distorsión de las partículas y sus capas absorbidas. La energía que se gasta en este proceso es suministrada por el esfuerzo de compactación de la máquina de compactar. La eficiencia de la energía gastada depende del tipo de partículas que componen el suelo y de la manera como se aplica el esfuerzo de compactación.

La compactación relativa se da para comparar los datos obtenidos en la compactación in situ con los obtenidos en el laboratorio; está dada como la densidad del suelo compactado en campo sobre la densidad máxima del laboratorio por cien.²

$$\text{Compac. Relativa} = \frac{\rho_{\text{suelo compactado Campo}}}{\rho_{\text{max Laboratorio}}} * 100 \quad (1)$$

Los resultados obtenidos a partir del ensayo proporciona una curva, en la cual el pico más alto dicta el contenido de humedad óptima a la cual el suelo llega a la densidad seca máxima. Por medio de los ensayos se ha podido determinar que Por lo general la compactación es más eficaz en los materiales bien gradados que contiene una cantidad mayor de finos que en los materiales de gradación uniforme que carecen de finos.

5.1 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

A partir de 1993 en Ing. R. Proctor dio inicio al estudio racional de la compactación. Este investigador verificó, que un mismo suelo, conforme a su contenido de humedad, reacciona de manera diferente a la compactación, alcanzando valores diversos de compactación.

Proctor impacto muestras de suelo en un recipiente cilíndrico, utilizando diferentes contenidos de humedad. Después de compactar la muestra en el cilindro y determinar su densidad, la retiraba del cilindro, la desmenuzaba y aumentaba el agua repitiendo la operación de compactación. Con los valores de densidad y humedad, obtenidos de la compactación de cada muestra, Proctor pudo trazar la curva de compactación (la misma para todos los suelos), que a su vez le permitió encontrar la densidad máxima y la humedad óptima del suelo. Y es este

² BOWLES, Joseph. Manual de laboratorio de suelos. Mc Graw Hill

precisamente el método desarrollado por Proctor y utilizado actualmente para realizar la compactación del suelo.³

La prueba de Proctor hace relación a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que se ha compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad, esta prueba sirve para determinar el peso específico seco máximo ρ_d Max que puede alcanzar un material, así como su humedad óptima w_0 a la que se le debe hacer compactación.⁴

El ensayo de compactación, se repite el número de veces necesarios para poder elaborar una curva de contenido de humedad contra densidad seca, en la cual el pico más alto hace referencia al contenido de humedad óptimo, a la cual el suelo llega a la densidad seca máxima.

5.1.1 Proctor Modificado. en este ensayo de compactación, Proctor estudio la influencia que ejercía en el proceso el contenido inicial de agua del suelo, observo que a contenidos de humedad crecientes, a partir de valores bajos se obtenían más altos pesos específicos secos y, por lo tanto, mejores compactaciones de suelos, pero que esa tendencia no se mantenía indefinidamente, sino que al pasar por la humedad de un cierto valor, los pesos específicos secos obtenidos disminuían, resultando peores compactaciones en la muestra, es decir, que existe una humedad inicial denominada humedad optima, que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación y, por consiguiente, la mejor compactación del suelo.⁵

³ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. p.79-88.

⁴ CRESPO V, Carlos. Mecánica de suelos y cimentaciones, Monterrey, México. Editorial Limusa S.A de C.V 1990 p.102

⁵ BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. P.186

Para dicho ensayo tomamos una muestra representativa de suelo el que queda en el tamiz número 4, le agregamos un contenido de agua específico; en un molde de dimensiones dadas colocamos dicho suelo, se deben compactar 5 capas, cada una con 55 golpes con un martillo de 10 Lb dejándolo caer desde una altura aproximada de 45 cm; el procedimiento se repite para suficientes contenidos de agua y así obtener una relación entre el contenido de humedad y el peso unitario seco. Luego de aplicar la fuerza se pesa dicho suelo con el molde removiendo el suelo que sobresalga a este. Se desencofra y se saca la muestra compactada del molde y se corta verticalmente y se toma una muestra para llevar al horno. Se continúa con el mismo procedimiento hasta que disminuya o no haya cambio en la masa unitaria.

5.1.1.1 Procedimiento Proctor modificado

- Se humedece la muestra con agua, hasta un 4 por ciento por debajo del contenido óptimo de humedad.
- Se prepara la muestra compactando en el molde de (con el collar ajustado) en cinco capas aproximadamente iguales. Se compacta cada capa mediante 56 golpes distribuidos uniformemente con el martillo con una caída libre de 460 mm por encima de la altura aproximada del suelo compactado. Durante la compactación, el molde deberá permanecer firme sobre un soporte denso, uniforme, rígido y estable.
- Posteriormente a la compactación se quita el collar de extensión, se nivela cuidadosamente el suelo que sobresale en el molde usando una regla metálica. Se pesa el molde con el suelo húmedo, en kilogramos, con aproximación de 5 g. (en libras con aproximación de 0.01 lb).

- Se extrae la muestra compactada del molde. Se toma una muestra representativa acorde con la norma INV E –122 del material de una de las caras del corte; se pesa inmediatamente y se seca en un horno a 110 ± 5 °C ($230^\circ \pm 9$ °F) por un tiempo mínimo de 12 horas, esto con el fin de determinar el contenido de agua. La muestra para humedad no deberá tener una masa menor de 300 g.
- Se rompe la muestra moldeada y se esparce, Se agrega agua en cantidad suficiente para aumentar la humedad del suelo 1 ó 2 puntos de porcentaje, y se repite el procedimiento anterior para cada incremento de agua. Esta serie de determinaciones se debe continuar hasta que disminuya o no haya cambio en la masa unitaria húmeda, en kg/m^3 , del suelo compactado.⁶

5.1.2 Proctor Estándar. En este ensayo se toma una muestra representativa de suelo del tamiz #4, se le agrega un porcentaje de humedad (agua) específico; la muestra se coloca en un molde cilíndrico de dimensiones dadas, se debe compactar en 3 capas dicho suelo, cada capa con 25 golpes con un martillo de 5,5Lb dejándolo caer desde una altura aproximada de 35 cm. Se repite dicho procedimiento para distintos porcentajes de humedad; para cada ensayo luego de la compactación se pesa el molde con el suelo. Además se saca el suelo compactado y se toma una muestra para llevar al horno. Se continúa con el mismo procedimiento hasta que disminuya o no haya cambio en la masa unitaria.

5.1.2.1-Procedimiento Proctor estándar

- Se humedece la muestra con agua, hasta un 4 por ciento por debajo del contenido óptimo de humedad.

⁶ COLOMBIA, INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Relaciones de humedad – masa unitaria seca de suelos (ensayo normal de compactación). Bogotá D.C. 2007

- Se prepara la muestra compactando en el molde de 101.6 mm (4") de diámetro (con el collar ajustado) en tres capas aproximadamente iguales y que den una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5"). Se compacta cada capa mediante 25 golpes distribuidos uniformemente con el martillo con una caída libre de 305 mm (12") por encima de la altura aproximada del suelo compactado. Durante la compactación, el molde deberá permanecer firme sobre un soporte denso, uniforme, rígido y estable.
- Posteriormente a la compactación se quita el collar de extensión, se nivela cuidadosamente el suelo que sobresale en el molde usando una regla metálica. Se pesa el molde con el suelo húmedo, en kilogramos, con aproximación de 5 g. (en libras con aproximación de 0.01 lb).
- Se extrae la muestra compactada del molde. Se toma una muestra representativa acorde con la norma INV E –122 del material de una de las caras del corte; se pesa inmediatamente y se seca en un horno a 110 ± 5 °C ($230^\circ \pm 9$ °F) por un tiempo mínimo de 12 horas, esto con el fin de determinar el contenido de agua. La muestra para humedad no deberá tener una masa menor de 300 g.
- Se rompe la muestra moldeada y se esparce, Se agrega agua en cantidad suficiente para aumentar la humedad del suelo 1 ó 2 puntos de porcentaje, y se repite el procedimiento anterior para cada incremento de agua. Esta serie de determinaciones se debe continuar hasta que disminuya o no haya cambio en la masa unitaria húmeda, en kg/m^3 , del suelo compactado.⁷

⁷ COLOMBIA, INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Relaciones de humedad – masa unitaria seca de suelos (ensayo normal de compactación). Bogotá D.C. 2007

Tabla 1. Comparación entre ensayo Proctor modificado y Proctor estándar.

ENSAYOS	PROCTOR MODIFICADO	PROCTOR ESTANDAR
# capas	5	3
golpes/capa	56	25
peso martillo (N)	44,76	24,5
Altura caída(m)	0,46	0,305
vol. Molde(cm3)	2122,22	957,99

Fuente. Autor.

5.1.3 Harvard Miniatura⁸. Este método en el laboratorio es usado en materiales finos, plásticos y con partículas menores a 2 mm, fue desarrollado por el profesor S.D Wilson, en la universidad de Harvard. Consiste en la compactación del suelo por medio de presión, para lo cual se requiere una cámara cilíndrica metálica de 3.3 cm de diámetro y 7,2 cm de altura, el molde está unido a una extensión removible de 3,4 cm de altura y además de una barra metálica que actúa como un embolo y aplica presión.

5.1.3.1 Procedimiento de Harvard Miniatura

- Determinar el peso del molde de compactación del Harvard miniatura.
- Cada porción del material debe ser compactado así:
 - ✓ Asegurar a la prensa de sujeción el molde y el collar
 - ✓ Colocar la cantidad de material suficiente (3 capas)
 - ✓ Nivelar la superficie a compactar.
 - ✓ Insertar el pistón en el molde y presionar fuertemente hasta que el resorte este comprimido a la carga total calibrada.
 - ✓ Soltar el pistón y colocar una nueva porción de suelo y asi proseguir con los 25 golpes.
 - ✓ Repetir el procedimiento hasta alcanzar las 3 capas.

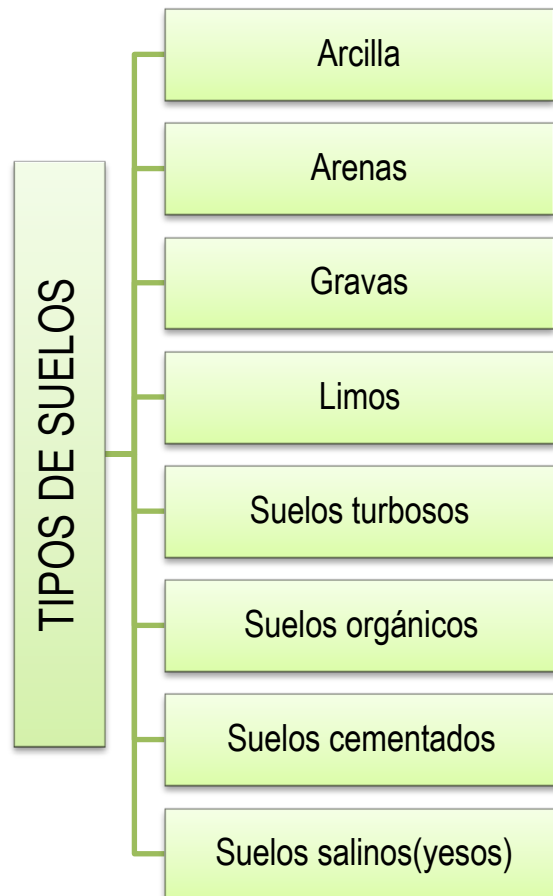
⁸ PRCEDIMIENTO HARVARD MINIATURA.
<http://es.slideshare.net/bryanlrenatorreblanca/ensayo-de-permeabilidad-y-miniatura-de-harvard>

- Retirar la muestra compactada.
- Determinar la masa del molde y suelo compactado.

5.2 TIPOS DE SUELOS ⁹

Gracias a la erosión y a la actividad de los seres vivos, la porción externa de la corteza rocosa terrestre, su superficie, se convierte en aquello que conocemos como suelo.

Figura 1. Tipos de suelos



Fuente. Autor.

⁹ JIMENEZ S., José A. Tipos de suelos. En: Mecánica de suelos y sus aplicaciones a la ingeniería. Madrid. Editorial Dossat. 1954. p. 126-138.

5.2.1 Arcillas. Los suelos llamados “arcillas” contienen en realidad solo una parte de arcilla propiamente dicha, tal como la hemos definido como fracción granulométrica. Esta parte llega a ser, a veces, inferior al 25 por 100.

Proviene de la sedimentación en los cauces de los ríos o erosiones generadas por los cambios geológicos, son sensibles a la humedad, pero las circunstancias hacen que esta sensibilidad sea más o menos perjudicial.

5.2.2 Arenas. Con su elevado rozamiento interno y su escasa compresibilidad, las arenas constituyen con frecuencia un terreno ideal para el ingeniero.

Las arenas pueden ser también peligrosas si las circunstancias hidrológicas pueden dar nacimiento al fenómeno de arenas vivas. Las excavaciones en arenas por debajo del nivel freático son muy difíciles, ya que aparte del problema del agotamiento, la corriente de agua que brota de los taludes convierte a estos en inestables. También son peligrosas las arenas por su densidad inferior a la crítica, en las que una pequeña perturbación puede causar asentamientos repentinos.

5.2.3 Gravas. Estos suelos provienen, en general, del acarreo por las aguas o glaciares, su único problema mecánico es con la permeabilidad, su clasificación puede hacerse por la naturaleza mineralógica de la roca; esta y la intensidad de la erosión mecánica subida en el arrastre determina la forma de los elementos, angulosos o redondeados, cúbicos o en lajas.

5.2.4 Limos. Proviene del depósito fluvial, en cauces o desembocaduras de los ríos. Su cohesión es pequeña, y en ocasiones también su rozamiento interno, tienen una proporción elevada de arcillas, son relativamente permeables y se dejan penetrar rápidamente por el agua.

Son suelos resistentes, pero hay que protegerlos de la influencia del agua, su aspecto es muy parecido al de la arcilla pero la diferencia se basa en la cohesión del suelo, que es mucho mayor en las arcillas.

5.2.5 Suelos Turbosos. Son suelos constituidos casi exclusivamente por materia orgánica, poco transformada, en la cual son perfectamente perceptibles, su color es generalmente negro o pardo, solo se forman en sitios pantanosos, en los que la humedad protege la materia orgánica de su total descomposición.

Sus propiedades desde el punto de vista del constructor son muy malas, ya que su capacidad para sostener cargas es muy reducida, y, sobre todo, son muy comprensibles y varían enormemente de volumen con la desecación.

5.2.6 Suelos Orgánicos. Contienen materia orgánica, pero en proporción menos que los suelos turbosos, y sobre todo, transformada por la acción del tiempo, el clima y los organismos vivos del suelo (insectos, bacterias, etc.). La materia orgánica se encuentra en forma de humus. Estos humus aumentan la comprensibilidad del suelo y disminuye el rozamiento. También son de color oscuro.

5.2.7 Suelos Cementados. En estos suelos las partículas se hallan unidas por una sustancia resistente llamada caliza. Los suelos más importantes en este grupo son las margas, suelos arcillosos con carbonato cálcico. Según la cantidad de esta última sustancia, varían las propiedades del suelo en una extensa gama que va desde rocas calizas ligeramente arcillosas, que son rocas verdaderas, hasta las arcillas margosas, que apenas difieren de las arcillas cálcicas ordinarias. Esto ocurre siempre que la cantidad de carbonato cálcico no exceda del 10 por 100.

5.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SUELOS

Existen varios métodos de clasificación de suelos, entre los más conocidos tenemos el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (S.U.C.S) y el Sistema Unificado de Clasificación de suelos, el de la Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Transportes (AASHTO).

5.3.1 Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS). El sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) deriva de un sistema desarrollado por Arturo Casagrande para identificar y agrupar suelos. Este sistema divide los suelos primeros en dos grandes grupos, de granos gruesos y de granos finos, los cuales se distinguen por el tamizado a través de la malla N° 200. Se considera que un suelo es grueso, si más del 50% (en peso) de una muestra representativa es retenida por dicha malla, y se considera que un suelo es fino, si más del 50% (en peso) de una muestra representativa pasa por ésta.

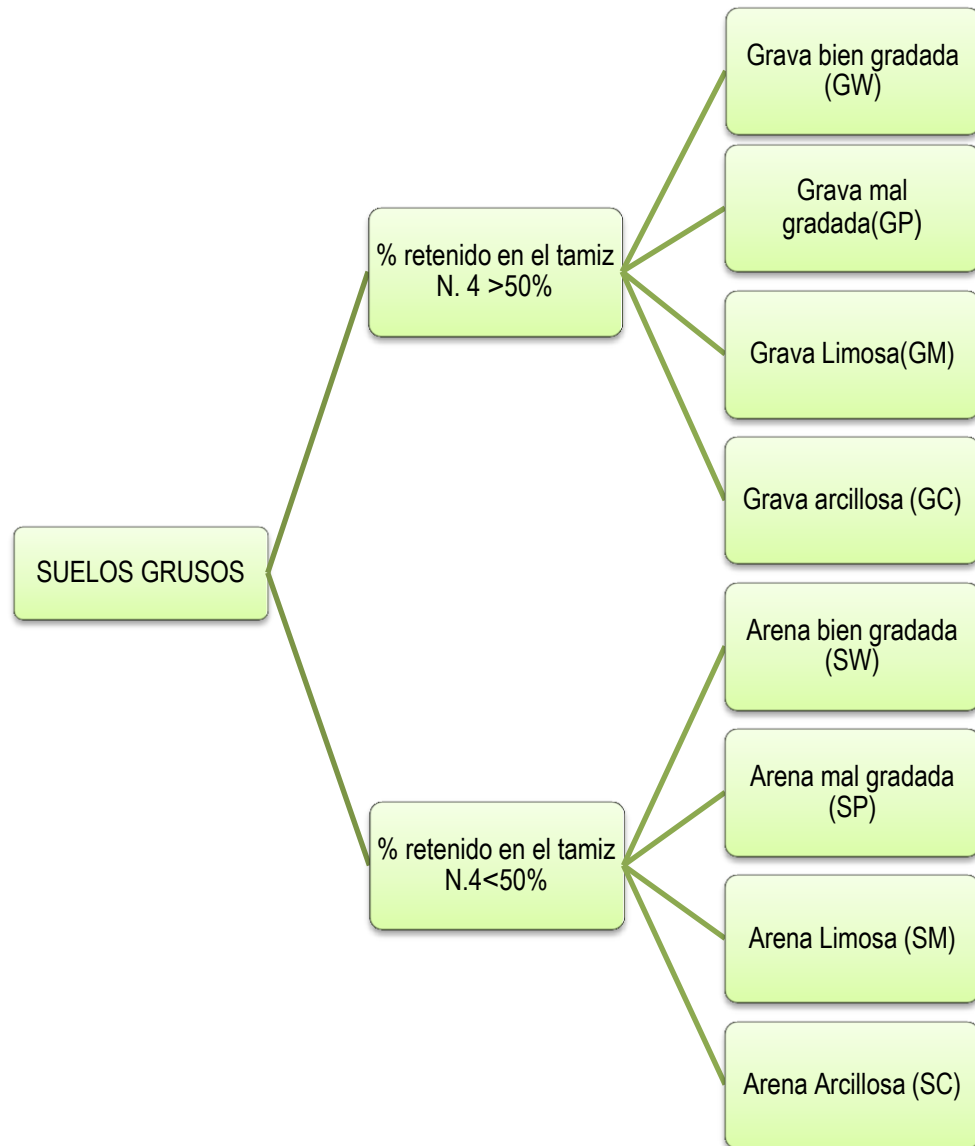
5.3.1.1 Suelos gruesos¹⁰: El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres de los suelos más típicos de este grupo. El significado es:

- Gravas y suelos en que predominan estas. Símbolo G (gravel)
- Arenas y suelos arenosos. Símbolo S (sand)

Las gravas y las arenas se subdividen en cuatro tipos.

¹⁰ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. p.69-72.

Figura 2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Suelos de grano grueso).



Fuente. Autor

Gravas □[G]: Un suelo es considerado grava cuando más del 50% (en peso), de la fracción gruesa, es retenida por el tamiz N° 4.

Arenas □[S]: Un suelo se considera arena cuando más del 50% (en peso) de la fracción gruesa pasa por el tamiz N° 4.

Una vez efectuados los ensayos de clasificación para determinar los parámetros si es una Grava o una arena están bien o mal gradadas son el coeficiente de uniformidad C_u y el coeficiente de curvatura C_c .¹¹

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (2) \quad C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10}D_{60}} \quad (3)$$

Dónde:

- D_{60} = Tamaño en mm tal que el 60% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.
- D_{30} = Tamaño en mm tal que el 30% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.
- D_{10} = Tamaño en mm tal que el 10% de una muestra de suelo es menor que ese tamaño.

- **GW**

Son gravas limpias que cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 4, y un C_c entre 1 y 3. Presentan gran diversidad en dimensiones y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.

- **SW**

Son arenas limpias que cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 6, y un C_c entre 1 y 3. Presentan una amplia gama de dimensiones y cantidades apreciables de todos los tamaños intermedios.

¹¹ JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRIGUEZ, Alfonso. Clasificación e identificación de suelos. En: Mecánica de suelos: fundamentos de la mecánica de suelos. México. Limusa Noriega Editores, tomo 1. 2000. p. 153-159

- **GP**

Gravas limpias con una apariencia uniforme, donde predomina un solo tamaño teniendo ausencia de los intermedios. Estas gravas no cumplen con los parámetros de gradación, de C_u mayor a 4, y C_c entre 1 y 3.

- **SP**

Arenas limpias con aspecto uniforme, donde hay un tamaño predominante, y se nota la ausencia de los intermedios. Estas arenas no cumplen con los parámetros de gradación, de C_u mayor a 6, y C_c entre 1 y 3.

Los suelos a continuación presentan un alto porcentaje de finos ($>12\%$), queriendo decir que los finos si afectan la resistencia de la fracción gruesa y su capacidad de drenaje.

Se debe tener en cuenta para su clasificación la plasticidad, la cual está dada por el límite líquido y el índice de plasticidad.

- **GM**

Gravas con finos, cuya plasticidad varía entre nula a media, ubicando a la fracción de suelo en la carta de plasticidad, por debajo de la línea A, o por encima donde el índice de plasticidad es menor a 4.

- **SM**

Arenas con finos, cuya plasticidad varía entre nula a media, ubicando a la fracción de suelo en la carta de plasticidad, por debajo de la línea A, o por encima donde el índice de plasticidad es menor a 4.

- **GC**

Gravas con finos, cuya plasticidad varía entre media a alta, ubicando a la fracción de suelo en la carta de plasticidad, por encima de la línea A y el índice de plasticidad es mayor a 7.

- **SC**

Arenas con finos, cuya plasticidad varía entre media a alta, ubicando a la fracción de suelo en la carta de plasticidad, por encima de la línea A y el índice de plasticidad es mayor a 7.

Los suelos cuyo contenido de finos se encuentra entre 5% y 12%, el S.U.C.S. los considera casos frontera, asignándoles un símbolo doble. O en caso de que el material no cae claramente dentro de un grupo mencionado anteriormente, se asigna doble nomenclatura.

- **Gravas limosas bien gradadas [GW – GM]**

Cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 4, y un C_c entre 1 y 3. Y son ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de limos, es decir por debajo de la línea A, o por encima con un índice de plasticidad menor a 4.

- **Gravas limosas mal gradada [GP-GM]**

No cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 4, y un C_c entre 1 y 3. Están ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de los limos, es decir por debajo de la línea A, o por encima con un índice de plasticidad menor a 4.

- **Gravas arcillosas bien gradada [GW-GC]**

Cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 4, y un C_c entre 1 y 3. Están ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de las arcillas, es decir por encima de la línea A, con un índice de plasticidad mayor a 7.

- **Grava arcillosa mal graduada [GP-GC]**

No cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 4, y un C_c entre 1 y 3. Están ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de las arcillas, es decir por encima de la línea A, con un índice de plasticidad mayor a 7.

- **Arenas limosas bien gradadas [SW-SM]**

Cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 6, y un C_c entre 1 y 3. Se ubican en la carta de plasticidad en la zona de los limos, es decir por debajo de la línea A, o por encima con un índice de plasticidad menor a 4.

- **Arenas limosas mal gradadas [SP-SM]**

No cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 6, y un C_c entre 1 y 3. Se encuentran ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de los limos, es decir por debajo de la línea A, o por encima con un índice de plasticidad menor a 4.

- **Arenas arcillosas bien gradadas [SW –SC]**

Cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 6, y un C_c entre 1 y 3. Se encuentran ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de las arcillas, es decir por encima de la línea A, con un índice de plasticidad mayor a 7.

- **Arenas arcillosas mal gradadas [SP-SC]**

No cumplen con los parámetros de gradación, con un C_u mayor a 6, y un C_c entre 1 y 3. Se encuentran ubicadas en la carta de plasticidad en la zona de las arcillas, es decir por encima de la línea A, con un índice de plasticidad mayor a 7.¹²

5.3.1.2 Suelos finos: También en este caso el sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, escogidas por un criterio similar usado para los suelos gruesos y dando lugar a las siguientes divisiones:

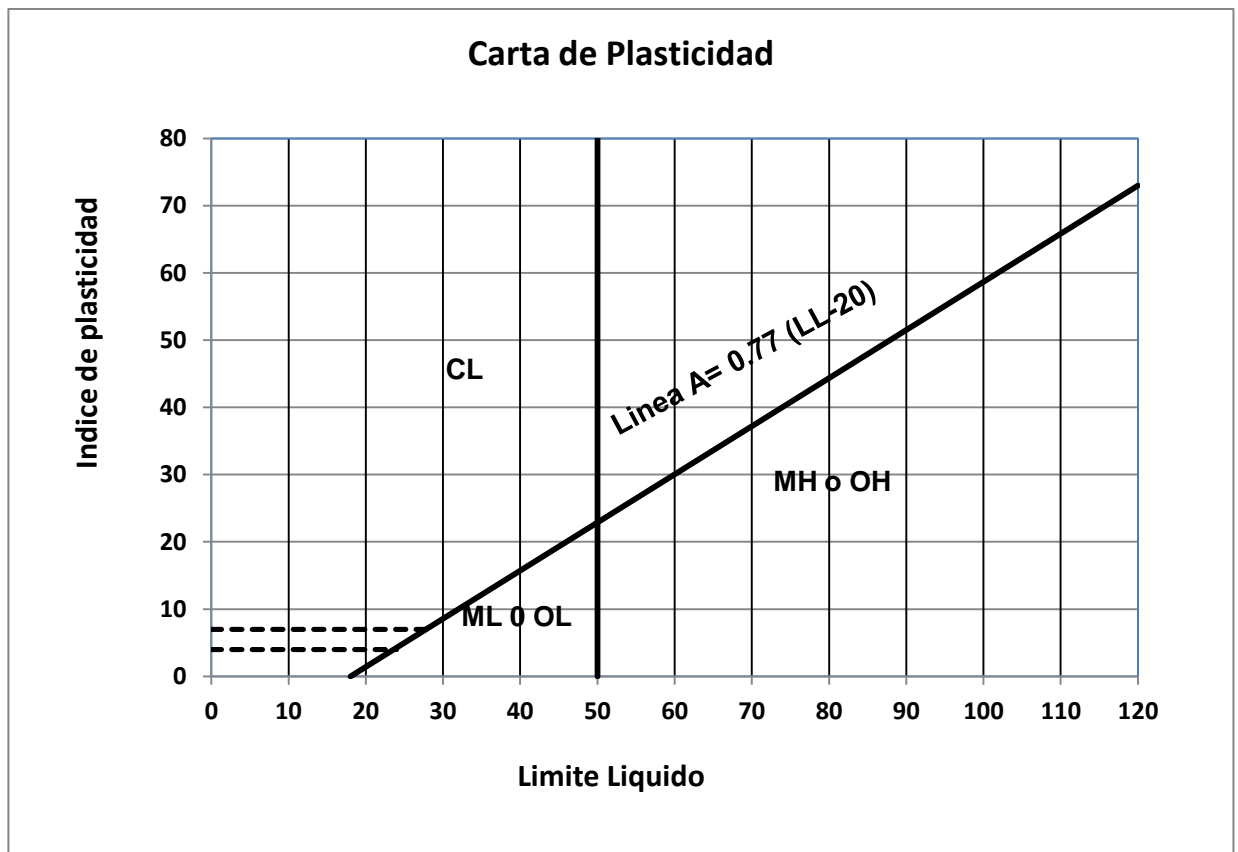
¹² BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. p.69-72.

BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. p.70

- Limos orgánicos, símbolo **M**
- Arcillas inorgánicas, símbolo **C**
- Limos y arcillas, símbolo **O**

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdivide, según su límite líquido en dos grupos. Si este es menor al 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo de la letra **L** (low compressibility). Los suelos finos con límite mayor de 50%, osea los de alta compresibilidad, se añade el símbolo **H** (high compressibility).

Figura 3. Carta de Plasticidad.¹³

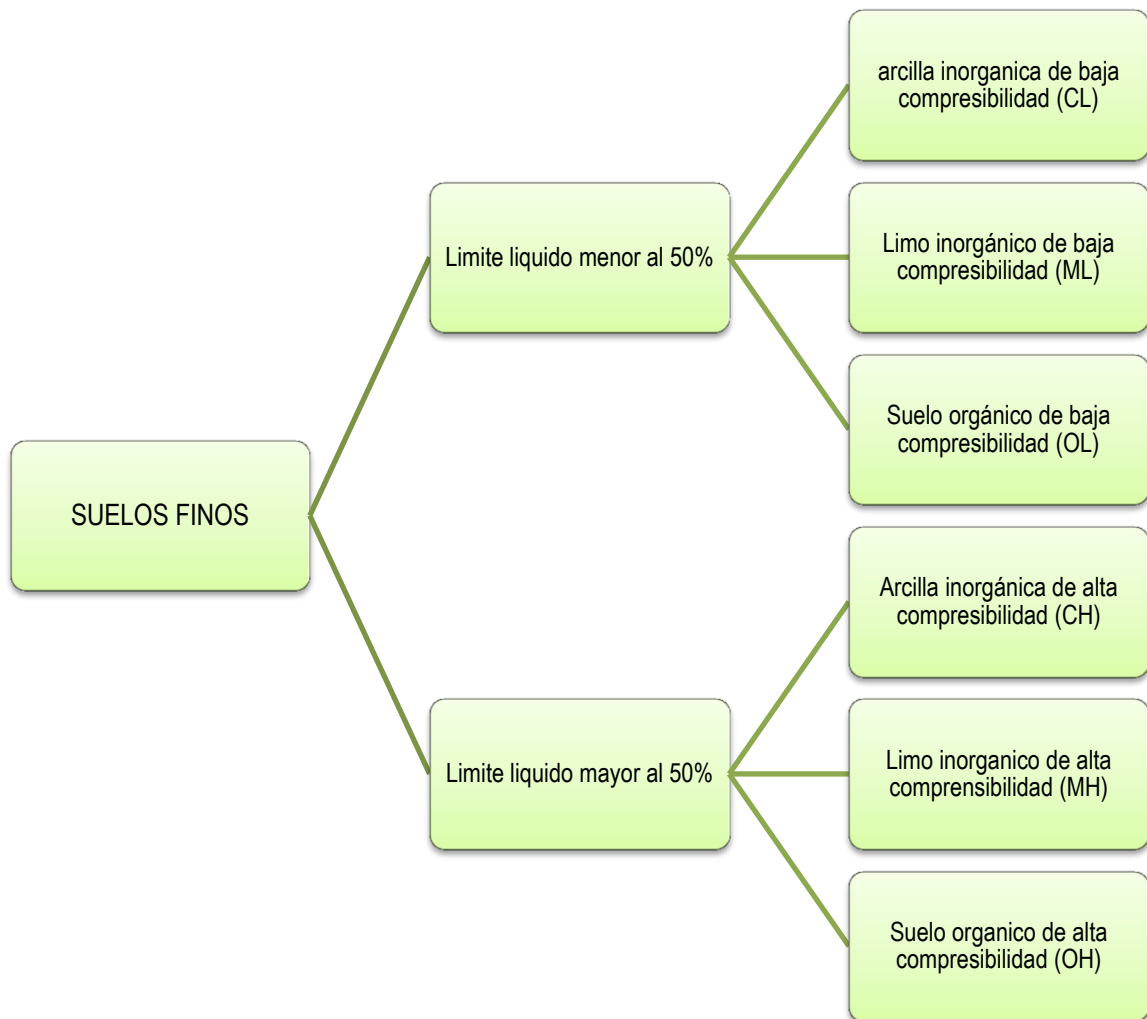


Fuente. Autor

¹³ BOWLES, Joseph E. Clasificación de suelos. En: Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial McGraw-Hill. 1980. p.75.

Si más del 12% del material pasa a través del tamiz No 200; M=limo; C=arcilla. La designación limo o arcilla se determina después de obtener los valores de los límites líquido y plástico de la fracción menor al tamiz No 40, y utilizando los criterios de la carta de plasticidad de la figura 3. Este cuadro es otra contribución de Casagrande al sistema, y la línea A que se encuentra en él, es conocida como la línea A de Casagrande.

Figura 4. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Suelos de grano fino).



Fuente. Autor.

- **Grupo CL y CH**

El grupo CL comprende la zona sobre de la línea A, de la carta de plasticidad, definida por $LL < 50\%$ e $IP > 7\%$ donde:

LL: limite líquido.

IP: limite plástico

El grupo CH corresponde a la zona arriba de la línea A, definida por $LL > 50\%$.

- **Grupo ML y MH**

El grupo ML comprende la zona debajo de la línea A, definida por $LL < 50\%$, y la porción sobre la línea A con $IP < 4$. El grupo MH corresponde a la zona debajo de la línea A, definida por $LL > 50\%$.

Los suelos finos que caen sobre la línea A y con $4\% < IP < 7\%$ se consideran como caso frontera, asignándole el símbolo doble CL-ML.

- **Grupos OL y OH.**

Las zonas correspondientes a estos dos grupos son los mismos que la de los grupos ML y MH, si bien los orgánicos están siempre en lugares próximos a la línea A.

- **Grupos Pt**

El límite líquido de estos suelos puede estar entre 300% y 500%, quedando su posición en la carta de plasticidad debajo de la línea A, el índice plástico normalmente varía entre 100% y 200%.

5.3.2 Sistema de Clasificación AASHTO. El sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) es uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos, desarrollado por Terzaghi y Hogentogler en 1928.

Este sistema de clasificación está basado en los resultados de la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el límite plástico. Se divide en dos grandes grupos: suelos granulares y suelos limo-arcillosos, los cuales se subdividen en 7 grupos.

Tabla 2. Sistema de clasificación AASHTO

Clasificación General	Materiales Granulares (35% o menos del total para el tamiz No 200)							Materiales limo-arcillosos (más del 35% del total pasa el tamiz No 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de Grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Porcentaje de material que pasa el tamiz No 10											A-7-6
No 40	50 máx										
No 200	30 máx 15 máx	50 máx 25 máx	51 máx 10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 min	36 min	36 min	36min
Características de la fracción que pasa el tamiz No 40											
Límite Líquido, wL											
Índice Plástico, IP											
Índice de Grupo	6 máx 0		NP 0	40 máx 10 máx 0	41 máx 10 máx 0	40 máx 11 máx 4 máx	40 máx 11 máx 4 máx	40 máx 10 máx. 8 máx	41 máx 10 máx 12 máx	40 máx 11 máx 16 máx	40 máx 11 máx 20 máx

Los suelos clasificados dentro los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares de los cuales el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N.200. Los suelos que tienen más del 35% de partículas pasan a través del tamiz N. 200

se clasifican dentro de los grupos de material fino A-4, A-5, A-6 y A-7. Estos suelos son principalmente limo y material de tipo arcilla.

La ecuación para establecer el índice de grupo es la siguiente: ¹⁴

$$GI = 0.2a + 0.005ac + 0.01bd \quad (4)$$

Dónde:

- a = Porcentaje de material que pasa por la malla No 200 mayor que 35% pero menor que 75%, dado como un número entero positivo ($1 \leq a \leq 40$).
- b = Porcentaje de material que pasa por la malla No 200 mayor que 15% pero menor que 55%, dado como un número entero positivo ($1 \leq b \leq 40$).
- c = Parte del límite líquido mayor que 40 pero menor que 60, dada como un número entero positivo ($1 \leq c \leq 20$).
- d = Parte del índice de plasticidad mayor que 10 pero menor que 30, dada como un número entero positivo ($1 \leq d \leq 20$).

¹⁴ BRAJA M., Das. Propiedades geotécnicas del suelo. En: Principios de Ingeniería de Cimentaciones. México. Editorial Thomson. 5 ed. 2006. p.15.

6. METODOLOGÍA

6.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se hizo una revisión de libros, normas técnicas relacionadas con la temática objeto de estudio, dentro de los temas realizados se encuentran: clasificación de los suelos y formas de reproducir en el laboratorio las energías de compactación suministradas en campo por los diferentes equipos existentes.

6.2 RECOLECCIÓN DE MUESTRA

Antes de realizar ensayos de laboratorios para caracterizar la arena limosa objeto de estudio se buscaron posibles fuentes de material. Estas posibles fuentes de material se ubicaron en: el talud frente a la entrada del edificio k2, el parqueadero de estudiantes de la UPB y en el costado noroccidental de la cafetería campestre, siendo este último el sitio escogido.

6.3 ENSAYOS DE CLASIFICACIÓN.

Con las muestras recolectadas en los sitios escogidos como posibles fuentes de material, se realizaron los ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla No 200 y límites de Atterberg. Teniendo en cuenta los resultados de estos ensayos se decidió utilizar el material proveniente del costado noroccidental de la cafetería campestre, ya que este es el único de los tres que pertenece al grupo de las arenas limosas (SM) según el sistema unificado de clasificación de suelos.

6.4 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

Sobre muestras de la arena limosa escogida se realizaron 30 ensayos Proctor modificado, 30 ensayos Proctor estándar y 30 Harvard miniatura con el fin de obtener la humedad óptima y el peso específico seco máximo representativos en cada tipo de ensayo y posteriormente establecer relaciones entre ellos.

6.5 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Con los pesos específicos secos máximos, las humedades óptimas y las energías de compactación usadas en cada tipo de ensayo se hallaron constantes y se establecieron tendencias entre estas variables.

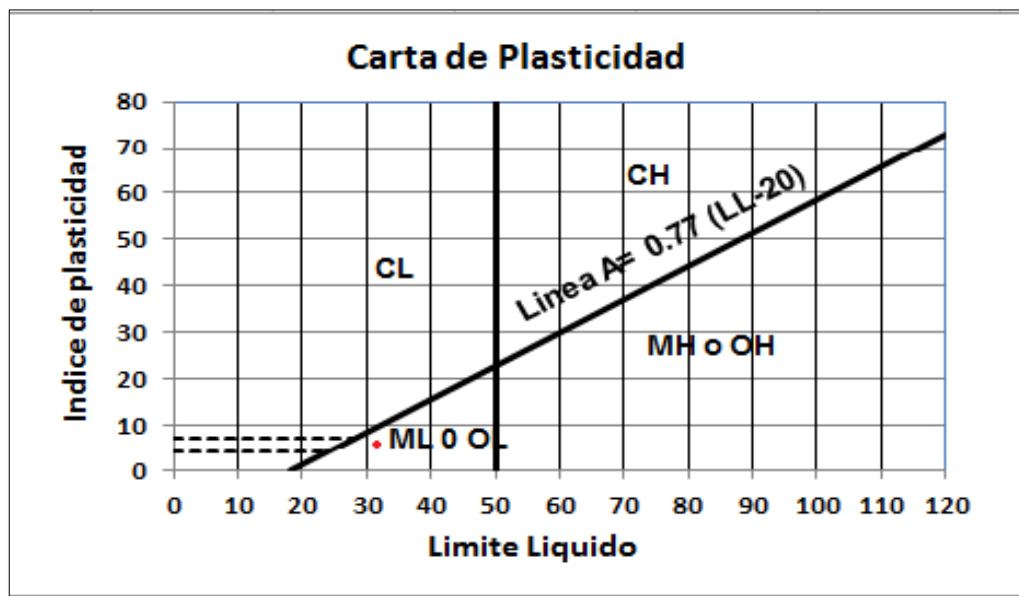
Pertenece a un suelo arenoso con alto porcentaje de finos: %Gravas=55,99 y %Finos=37,31%.

Tabla 4. Resultados de ensayos límites de plasticidad.

Ensayo	Límite Líquido %	Límite Plástico %	Índice de Plasticidad %
1	30,9	24,46	6,44
2	32,52	25,8	6,72
3	32,52	25,8	6,72
Promedio	31,98	25,35	6,63

Un límite líquido (LL) de 31,98%, un límite plástico (LP) de 25,35% y un índice de plasticidad (IP) de 6,63.

Figura 5. Carta de Plasticidad



Fuente. Autor.

Según se puede apreciar en la tabla 4 y la figura 5 que el suelo objeto de estudio en este trabajo corresponde a un suelo grueso, en el cual predominan la fracción arenosa, así mismo se puede inferir que la plasticidad de la fracción de material que pasa por la malla No 40 es baja ubicándose en la zona de los limos.

7.2 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO, ESTÁNDAR Y HARVARD MINIATURA.

Se realizaron ensayos de compactación Proctor Modificado (30) Proctor Estándar (30) y Harvard Miniatura (30), a continuación se presentan las densidades secas máximas y las humedades óptimas obtenidas en estos ensayos.

Tabla 5. Resultados Ensayos de Compactación

ensayo	PROCTOR MODIFICADO		PROCTOR ESTANDAR		HARVARD MINIATURA	
	W opt (%)	ρd máx. (g/cm ³)	W opt (%)	ρd máx. (g/cm ³)	W opt (%)	ρd máx. (g/cm ³)
1	10,25	1,95	15	1,777	15	1,754
2	12,73	1,95	13,5	1,762	16	1,738
3	11,00	1,95	14	1,78	15,5	1,738
4	12,00	1,93	14	1,763	15	1,74
5	12,00	1,93	14	1,773	14,5	1,745
6	11,50	1,93	13,5	1,77	15	1,72
7	10,50	1,93	15	1,81	15,5	1,738
8	10,75	1,90	13	1,78	15	1,74
9	10,60	1,91	13,5	1,8	15,5	1,73
10	11,00	1,96	13,2	1,785	14,5	1,75
11	12,00	1,91	13,8	1,765	15	1,74
12	12,00	1,99	13,5	1,792	14,5	1,754
13	11,50	1,94	14,5	1,777	15	1,756
14	8,50	1,99	13,4	1,777	14,7	1,73
15	12,50	1,89	13,5	1,769	14	1,74
16	10,00	1,92	13	1,783	14,5	1,735

ensayo	PROCTOR MODIFICADO		PROCTOR ESTANDAR		HARVARD MINIATURA	
	W opt (%)	d máx. (g/cm3)	W opt (%)	d máx. (g/cm3)	W opt (%)	d máx. (g/cm3)
17	7,20	1,94	12,8	1,774	15,5	1,748
18	9,50	1,90	12	1,77	15	1,74
19	9,34	1,90	13,5	1,76	15,5	1,738
20	10,50	1,97	13	1,772	15,5	1,728
21	10,00	1,90	13	1,769	14,5	1,757
22	10,00	1,97	13	1,77	14,5	1,75
23	12,50	1,90	13	1,777	14	1,73
24	12,00	1,99	14	1,773	14,5	1,745
25	11,50	1,94	13,5	1,782	14	1,745
26	8,50	1,98	13,5	1,775	15	1,738
27	12,70	1,88	13	1,772	15,5	1,74
28	10,00	1,92	13,5	1,775	14,5	1,75
29	9,50	1,90	13	1,78	15	1,74
30	10,00	1,97	13	1,765	15,5	1,745
PROMEDIO	10,74	1,96	13,47	1,776	14,92	1,741
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,37	0,03	0,634	0,011	0,522	0,009
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	12,77	1,67	4,706	0,603	3,500	0,504

Fuente. Autor

En la tabla 5 se observan los promedios del peso específico seco máximo y la humedad óptima de la arena limosa de la UPB, así como también su desviación estándar y el coeficiente de variación.

- En el ensayo Proctor modificado se obtuvo una humedad óptima promedio de 10,74% con una desviación estándar del 1,37% y un peso específico seco máximo promedio de 1,96 g/cm³ con una desviación estándar de 0,03 g/cm³.

- En el ensayo Proctor Estándar se obtuvo una humedad óptima promedio de 13,47% con una desviación estándar del 0,634% y un peso específico seco máximo promedio de 1,776 g/cm³ con una desviación estándar de 0,011 g/cm³
- Harvard Miniatura se obtuvo una humedad óptima promedio de 14,92% con una desviación estándar del 0,522% y un peso específico seco máximo promedio de 1,741 g/cm³ con una desviación estándar de 0,009 g/cm³.

8. ANÁLISIS DE RESULTADOS

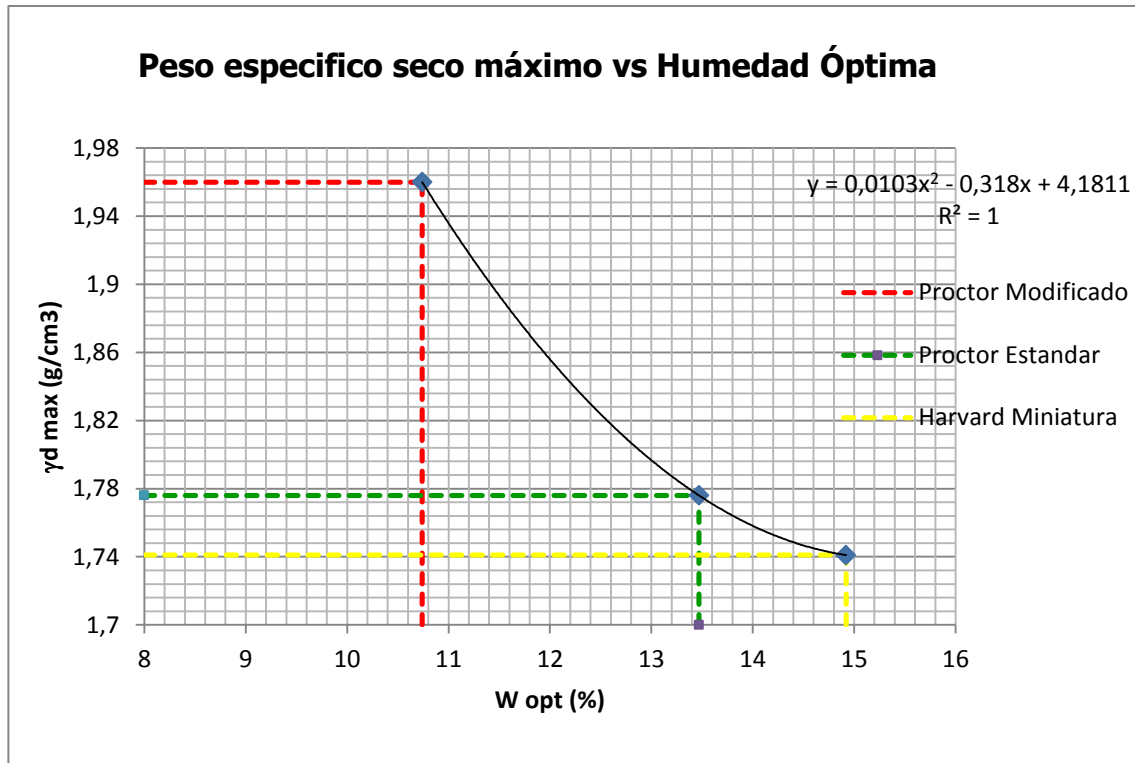
8.1. CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Dado que el suelo ensayado tiene un contenido de gravas del 6.85%, de arenas del 55.84% y de finos de 37.31%, el material estudiado corresponde a un suelo grueso, cabe resaltar que su contenido de finos es alto (superior al 12%), por lo tanto para clasificar este suelo se requiere del conocimiento de la naturaleza de dichos finos, este conocimiento se obtuvo por medio de los ensayos de límites de plasticidad los cuales arrojaron un límite líquido del 31.98% y un índice de plasticidad del 6.63%. Al ingresar a la carta de plasticidad de Casagrande con el límite líquido y el índice de plasticidad el suelo se ubica en la zona de los limos, por lo tanto el suelo estudiado en este proyecto de grado corresponde a una arena limosa (SM) según el sistema unificado de clasificación de suelos.

8.2 ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

Una vez realizados los noventa ensayos de compactación (30 Proctor modificado, 30 Proctor estándar y 30 Harvard miniatura), se observa que el mayor peso específico seco máximo corresponde al obtenido en el ensayo Proctor modificado, sin embargo la menor humedad óptima también se obtiene en dicho ensayo. Así mismo se evidencia que el menor peso específico seco máximo se obtiene en el ensayo Harvard miniatura, prueba en la cual se obtiene la mayor humedad óptima. (Gráfica a continuación).

Gráfica 2. Peso específico máximo vs Humedad Óptima



Fuente. Autor

8.3 DETERMINACIÓN DE LAS ENERGÍAS DE COMPACTACIÓN EN LOS ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS.

Para calcular la energía de compactación utilizada en las pruebas Proctor modificado, Proctor estándar y Harvard miniatura, se utilizó la siguiente ecuación (Bowles, Joseph. Manual de Mecánica de suelos. Mc Graw Hill. Pg. 80):

$$CE = \frac{N^{\circ} \text{ DE CAPAS} * N^{\circ} \text{ DE GOLPES} * W \text{ DEL MARTILLO} (N) * A. \text{ DE CAIDA}}{VOLUMEN \text{ MOLDE} (cm^3) * 10^{-3}} \quad (5)$$

- **Proctor Modificado**

El ensayo de compactación Proctor modificado se realizó utilizando un molde cuyo volumen interior es de 2122, 22 cm³, un martillo cuyo peso es de 10 Lb (44,76 N)

cuya altura de caída 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 6. Energía de Compactación Proctor Modificado.

# Capas	5
Golpes/capa	56
Peso martillo (N)	44,76
Altura caída(m)	0,46
Vol. Molde(cm3)	2122,22

Fuente. Autor

$$CE = \frac{5 * 56 * 44,76 * 0,46}{2122,22 * 10^{-3}}$$

$$CE = 2687,01 \text{ kJ/m}^3$$

Con estos datos y usando la ecuación 5 se obtuvo una energía de compactación de 2687,01 kJ/m³.

- **Proctor Estándar**

El ensayo de compactación Proctor estándar se realizó utilizando un molde cuyo volumen interior es de 957,99 cm³, un martillo cuyo peso es de 5,5 Lb (24,5 N) cuya altura de caída es de 12 pulgadas (0,305 m). El número de capas usado para compactar fue de 3 y a cada capa se le aplico 25 golpes.

Tabla 7. Energía de Compactación Proctor Estándar.

# Capas	3
Golpes/capa	25
Peso martillo (N)	24,5
Altura caída(m)	0,305
Vol. Molde(cm3)	957,99

Fuente. Autor.

$$CE = \frac{3 * 25 * 24,5 * 0,305}{957,99 * 10^{-3}}$$

$$CE = 585,014 \text{ KJ/m}^3$$

Con estos datos y usando la ecuación 5 se obtuvo una energía de compactación de 585,014 kJ/m^3 .

- **Harvard Miniatura**

El ensayo de compactación Harvard miniatura se realizó utilizando un molde cuyo volumen interior es de 59,31 cm^3 , un martillo cuyo peso es de 0,07 N cuya altura de caída es de 0,03 m. El número de capas usado para compactar fué de 3 y a cada capa se le aplicó 25 golpes.

Tabla 8. Energía de Compactación Harvard Miniatura.

# Capas	3
Golpes/capa	25
Peso martillo (N)	0,07
Altura caída(m)	0,03
Vol. Molde(cm3)	59,31

$$CE = \frac{3 * 25 * 0,07 * 0,03}{59,31 * 10^{-3}}$$

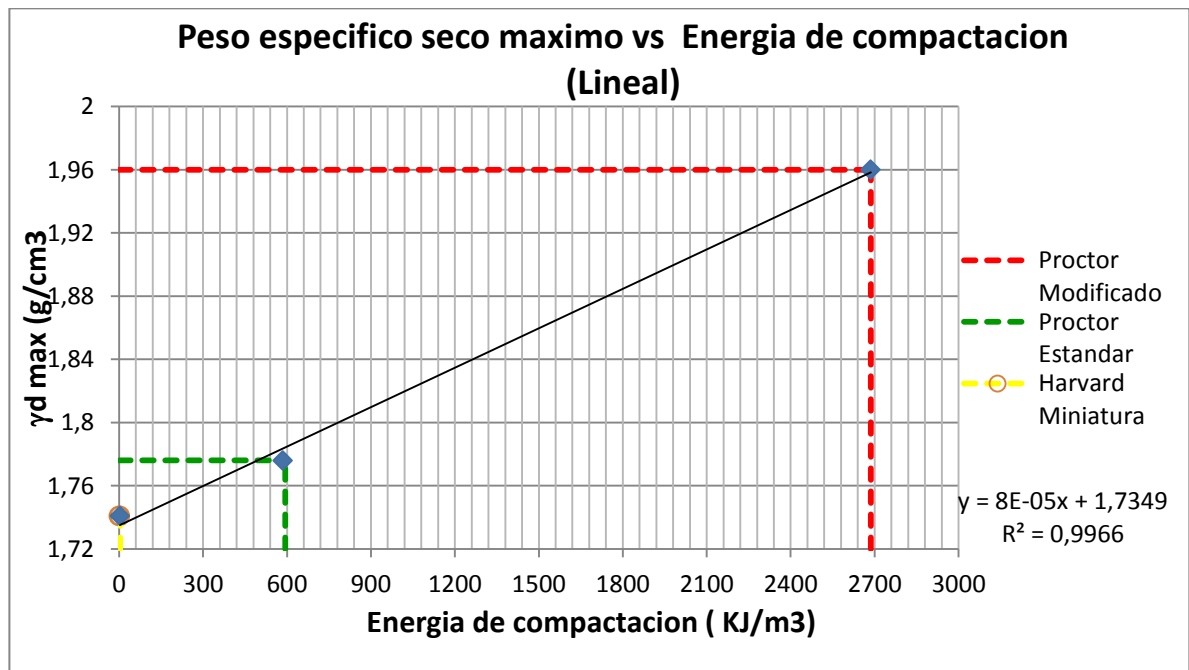
$$CE = 3 \text{ KJ/m}^3$$

Con estos datos y usando la ecuación 5 se obtuvo una energía de compactación de 3 kJ/m^3 .

8.4 RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN Y EL PESO ESPECÍFICO SECA MÁXIMO

Como era de esperarse se encontró una relación directamente proporcional entre la energía de compactación aplicada en cada ensayo y el peso específico seco máximo obtenido en cada uno de ellos.

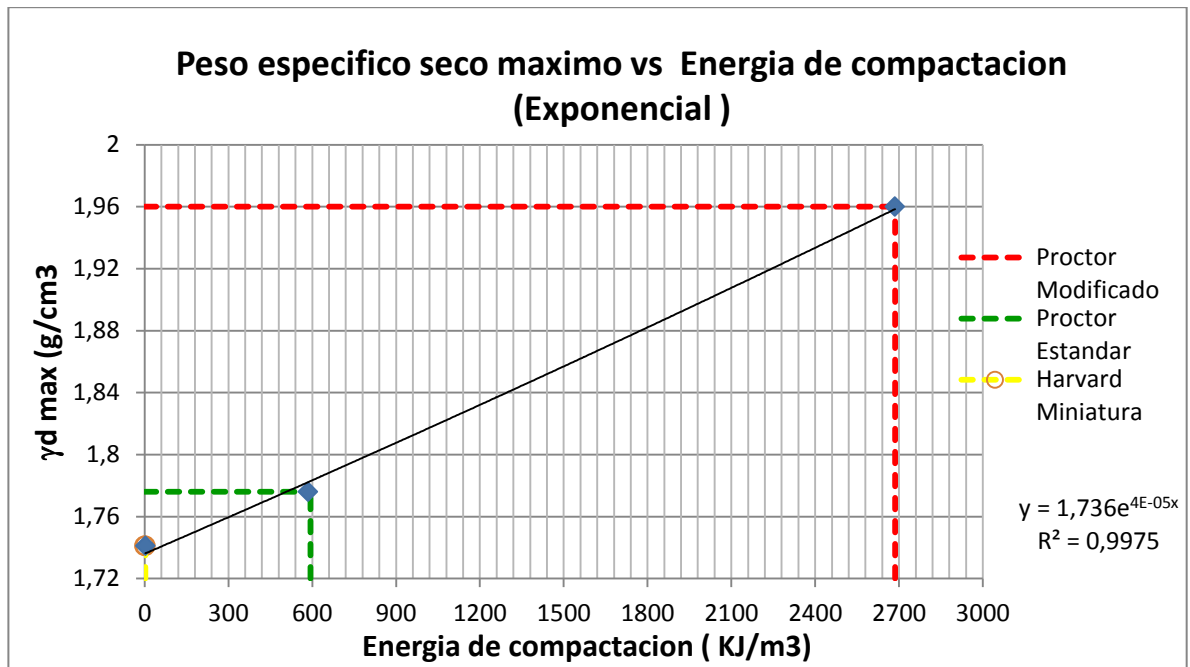
Gráfica 3. Peso específico seco máximo vs Energía de compactación (lineal)



Fuente. Autor.

En la gráfica 3 se observa la variación del peso específico seco máximo con la energía de compactación aplicada en cada uno de los ensayos de laboratorio, en esta grafica se hizo una regresión línea, observándose una relación directa entre estas dos variables.

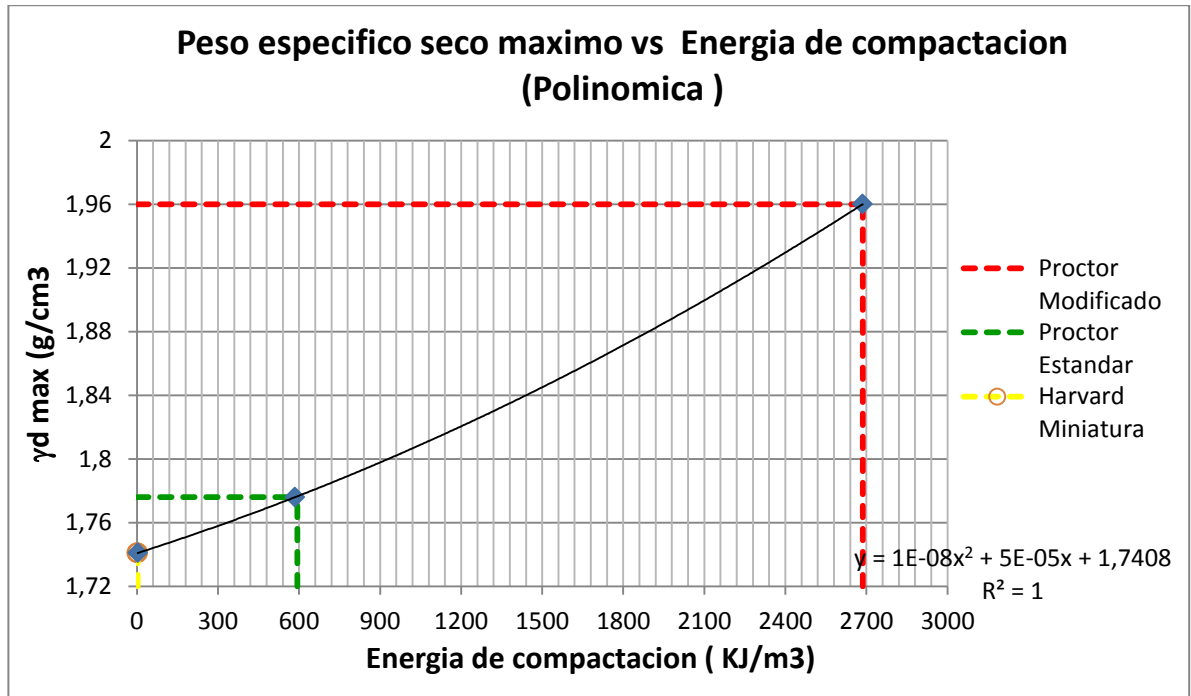
Gráfica 4. Peso específico seco máximo vs Energía de compactación (Exponencial)



Fuente. Autor

En la gráfica 4 se observa la variación del peso específico seco máximo con la energía de compactación aplicada en cada uno de los ensayos de laboratorio, en esta gráfica se hizo una regresión exponencial, observándose una relación directa entre estas dos variables

Gráfica 5. Peso específico seco máximo vs Energía de compactación (Polinómica)



Fuente. Autor

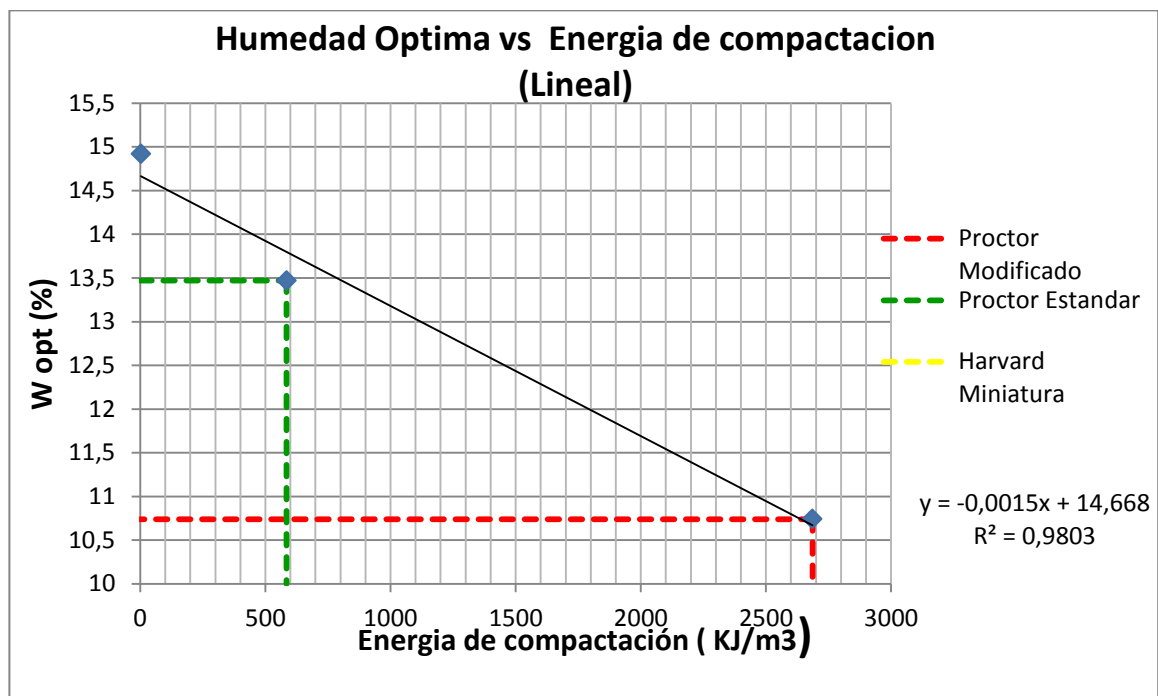
En la gráfica 5 se observa la variación del peso específico seco máximo con la energía de compactación aplicada en cada uno de los ensayos de laboratorio, en esta grafica se hizo una regresión polinómica (grado 2), observándose una relación directa entre estas dos variables.

Tal como se puede apreciar en las gráficas 3, 4, 5 es claro que a una mayor energía de compactación se obtiene un mayor peso específico seco. En estas graficas se puede ver la variación de la densidad seca máxima con la energía de compactación (tendencia lineal, exponencial y polinómica), correspondiendo el mejor ajuste la tendencia polinómica de grado 2.

8.5 RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN Y LA HUMEDAD ÓPTIMA.

A continuación se presentan tres gráficas, las cuales muestran la variación de la humedad óptima obtenida en cada ensayo de compactación con respecto a la energía aplicada en cada una de estos ensayos.

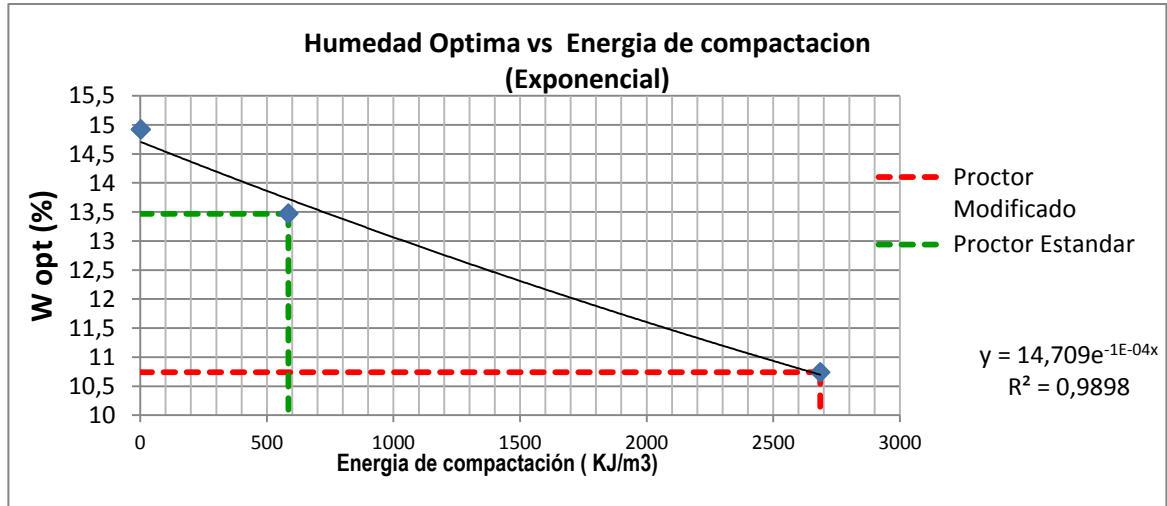
Gráfica 6. Humedad Óptima vs Energía de Compactación (Lineal)



Fuente. Autor.

En la gráfica 6 se observa la variación de la humedad óptima con la energía de compactación aplicada en cada uno de los ensayos de laboratorio, en esta gráfica se hizo una regresión línea, observándose una relación inversa entre estas dos variables

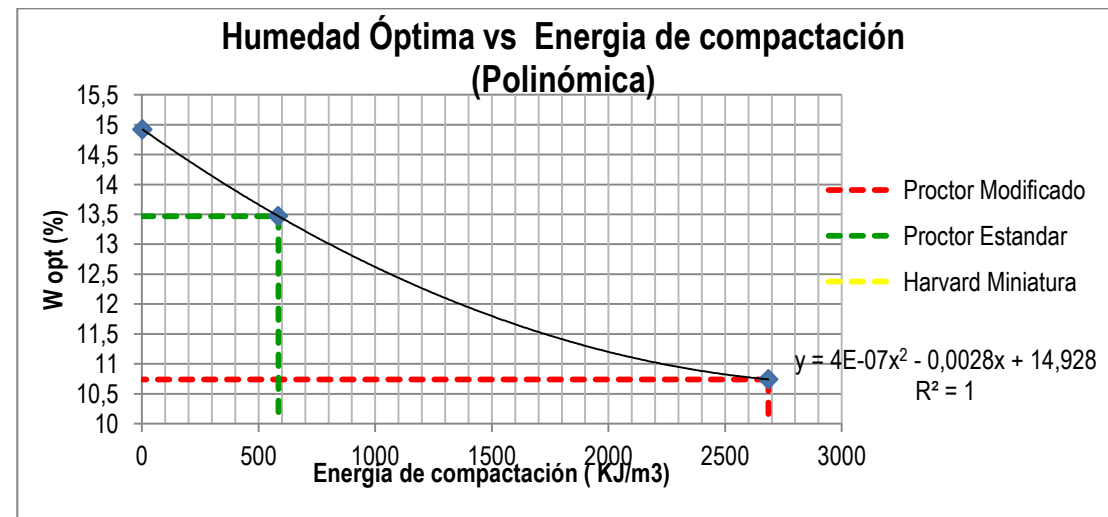
Gráfica 7. Humedad Óptima vs Energía de Compactación (Exponencial)



Fuente. Autor.

En la gráfica 7 se observa la variación de la humedad óptima con la energía de compactación aplicada en cada uno de los ensayos de laboratorio, en esta gráfica se hizo una regresión exponencial, observándose una relación inversa entre estas dos variables

Gráfica 8. Humedad Óptima vs Energía de Compactación (Polinómica)



En la gráfica 8 se observa la variación de la humedad óptima con la energía de compactación aplicada en cada uno de los ensayos de laboratorio, en esta gráfica se hizo una regresión polinómica (grado 2), observándose una relación inversa entre estas dos variables.

Tal como se puede observar en las gráficas 6.7 y 8 es claro que a una mayor energía de compactación se obtiene una menor humedad óptima. En estas gráficas se puede ver la variación de la humedad óptima con la energía de compactación (tendencia lineal, exponencial y polinómica), correspondiendo el mejor ajuste la tendencia polinómica (grado 2)

8.6 RELACIONES ENCONTRADAS ENTRE LOS PESOS ESPECÍFICOS SECOS MÁXIMOS Y ENTRE LAS HUMEDADES ÓPTIMAS EN LOS DIFERENTES ENSAYOS DE COMPACTACIÓN

De acuerdo con resultados obtenidos en todos los ensayos de compactación se determinaron relaciones entre los pesos específicos secos máximos de los diferentes ensayos al igual que relaciones entre las humedades óptimas de dichos ensayos.

Debido a que a mayor energía de compactación se requiere de una mayor energía por parte del laboratorista se determinaron estas relaciones con el fin de poder estimar el peso específico seco máximo y la humedad óptima que se obtendrían en un ensayo de compactación de alta energía a partir de los resultados de uno de menor energía,

- $K\gamma_{d1}$: RELACIÓN DEL PESO ESPECIFICO SECO MÁXIMO DEL PROCTOR MODIFICADO Y DEL HARVARD MINIATURA

$$K\gamma_{d1} = \frac{\gamma_{dmaxPM}}{\gamma_{dmaxHM}} \quad (6)$$

$$K\gamma_{d1} = \frac{1,96}{1,7414}$$

$$K\gamma_{d1} = 1,126$$

Esta relación es útil si se quisiera conocer el peso específico seco máximo de un ensayo Proctor modificado realizados sobre una arena limosa, bastaría con multiplicar el peso específico seco máximo obtenido en una prueba Harvard miniatura multiplicarlo por 1.126.

- Kw_1 : RELACIÓN DE LA HUMEDAD OPTIMA DEL PROCTOR MODIFICADO Y DEL HARVARD MINIATURA

$$kw_1 = \frac{W_{optPM}}{W_{optHM}} \quad (7)$$

$$kw_1 = \frac{10,74}{14,923}$$

$$kw_1 = 0,7197$$

Si se quiere conocer de manera aproximada la humedad óptima del Proctor modificado, esta podría estimarse al multiplicar la obtenida en la prueba Harvard miniatura por 0,7197.

- $K\gamma_{d2}$: RELACIÓN DEL PESO ESPECIFICO SECO MÁXIMO DEL PROCTOR ESTÁNDAR ESTÁNDAR Y DEL HARVARD MINIATURA

$$K\gamma_{d2} = \frac{\gamma_{dmaxPE}}{\gamma_{dmaxHM}} \quad (8)$$

$$K\gamma_{d2} = \frac{1,7759}{1,7414}$$

$$K\gamma_{d2} = 1,020$$

Esta relación es útil si se quisiera conocer el peso específico seco máximo de un ensayo Proctor estándar realizados sobre una arena limosa, bastaría con multiplicar el peso específico seco máximo obtenido en una prueba Harvard miniatura multiplicarlo por 1.020.

- Kw_2 : RELACIÓN DE LA HUMEDAD OPTIMA DEL PROCTOR ESTÁNDAR Y DEL HARVARD MINIATURA

$$kw_2 = \frac{W_{optPE}}{W_{optHM}} \quad (8)$$

$$kw_2 = \frac{13,473}{14,923}$$

$$kw_2 = 0,9028$$

Si se quiere conocer de manera aproximada la humedad óptima del Proctor estándar, esta podría estimarse al multiplicar la obtenida en la prueba Harvard miniatura por 0.9028

- $K\gamma_{d3}$: RELACIÓN DEL PESO ESPECIFICO SECO MÁXIMO DEL PROCTOR MODIFICADO Y DEL PROCTOR ESTÁNDAR

$$K\gamma_{d3} = \frac{\gamma_{dmaxPM}}{\gamma_{dmaxPE}} \quad (9)$$

$$K\gamma_{d3} = \frac{1,96}{1,7759}$$

$$K\gamma_{d3} = 1,1037$$

Esta relación es útil si se quisiera conocer el peso específico seco máximo de un ensayo Proctor modificado realizados sobre una arena limosa, bastaría con multiplicar el peso específico seco máximo obtenido en una prueba de Proctor estándar 1.1037.

- Kw_3 : RELACIÓN DE LA HUMEDAD OPTIMA DEL PROCTOR MODIFICADO Y DEL PROCTOR ESTÁNDAR

$$kw_3 = \frac{W_{optPM}}{W_{optPE}} \quad (9)$$

$$kw_3 = \frac{10,74}{13,473}$$

$$kw_3 = 0,7971$$

Si se quiere conocer de manera aproximada la humedad óptima del Proctor modificado, esta podría estimarse al multiplicar la obtenida en la prueba del Proctor estándar por 0,7971.

8.7 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE PROCTOR MODIFICADO CON LOS RESULTADOS DE LAS RELACIONES DE HARVARD MINIATURA.

CONSTANTES

PESO ESPECIFICO SECO MAXIMO	1,126
HUMEDAD OPTIMA	0,7197

Tabla 9. Comparación Proctor modificado y Harvard miniatura

ensayo	PROCTOR MODIFICADO TEÓRICO		HARVARD MINIATURA TEÓRICO		PROCTOR MODIFICADO EXPERIMENTAL	
	W opt (%)	γ _d máx. (g/cm ³)	W opt (%)	γ _d máx. (g/cm ³)	W opt (%)	γ _d máx. (g/cm ³)
1	10,25	1,95	15	1,754	10,80	1,98
2	12,73	1,95	16	1,738	11,52	1,96
3	11,00	1,95	15,5	1,738	11,16	1,96
4	12,00	1,93	15	1,74	10,80	1,96
5	12,00	1,93	14,5	1,745	10,44	1,96
6	11,50	1,93	15	1,72	10,80	1,94
7	10,50	1,93	15,5	1,738	11,16	1,96
8	10,75	1,90	15	1,74	10,80	1,96
9	10,60	1,91	15,5	1,73	11,16	1,95
10	11,00	1,96	14,5	1,75	10,44	1,97
11	12,00	1,91	15	1,74	10,80	1,96
12	12,00	1,99	14,5	1,754	10,44	1,98
13	11,50	1,94	15	1,756	10,80	1,98
14	8,50	1,99	14,7	1,73	10,58	1,95
15	12,50	1,89	14	1,74	10,08	1,96
16	10,00	1,92	14,5	1,735	10,44	1,95
17	7,20	1,94	15,5	1,748	11,16	1,97
18	9,50	1,90	15	1,74	10,80	1,96
19	9,34	1,90	15,5	1,738	11,16	1,96
20	10,50	1,97	15,5	1,728	11,16	1,95
21	10,00	1,90	14,5	1,757	10,44	1,98
22	10,00	1,97	14,5	1,75	10,44	1,97
23	12,50	1,90	14	1,73	10,08	1,95
24	12,00	1,99	14,5	1,745	10,44	1,96
25	11,50	1,94	14	1,745	10,08	1,96

ensayo	PROCTOR MODIFICADO TEÓRICO		HARVARD MINIATURA TEÓRICO		PROCTOR MODIFICADO EXPERIMENTAL	
	W opt (%)	ld máx. (g/cm3)	W opt (%)	ld máx. (g/cm3)	W opt (%)	ld máx. (g/cm3)
26	8,50	1,98	15	1,738	10,80	1,96
27	12,70	1,88	15,5	1,74	11,16	1,96
28	10,00	1,92	14,5	1,75	10,44	1,97
29	9,50	1,90	15	1,74	10,80	1,96
30	10,00	1,97	15,5	1,745	11,16	1,96
PROMEDIO	10,736	1,960	14,923	1,741	10,740	1,961
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	1,37	0,03	0,5224	0,00877	0,38	0,01
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	12,77	1,67	3,500	0,504	3,5	0,50

Fuente. Autor

Tabla 10. Porcentaje de error Proctor Modificado Experimental

ensayo	PROCTOR MODIFICADO EXPERIMENTAL		PORCENTAJE DE ERROR	
	W opt (%)	gd máx. (g/cm3)	%error W	%error ld
1	10,8	1,98	5,37	1,54
2	11,52	1,96	9,51	0,51
3	11,16	1,96	1,45	0,51
4	10,8	1,96	10,00	1,55
5	10,44	1,96	13,00	1,55
6	10,8	1,94	6,09	0,52
7	11,16	1,96	6,29	1,55
8	10,8	1,96	0,47	3,16
9	11,16	1,95	5,28	2,09
10	10,44	1,97	5,09	0,51
11	10,8	1,96	10,00	2,62
12	10,44	1,98	13,00	0,50
13	10,8	1,98	6,09	2,06
14	10,58	1,95	24,47	2,01
15	10,08	1,96	19,36	3,70

16	10,44	1,95	4,40	1,56
17	11,16	1,97	55,00	1,55
18	10,8	1,96	13,68	3,16
19	11,16	1,96	19,49	3,16
20	11,16	1,95	6,29	1,02
21	10,44	1,98	4,40	4,21
22	10,44	1,97	4,40	0,00
23	10,08	1,95	19,36	2,63
24	10,44	1,96	13,00	1,51
25	10,08	1,96	12,35	1,03
26	10,8	1,96	27,06	1,01
27	11,16	1,96	12,13	4,26
28	10,44	1,97	4,40	2,60
29	10,8	1,96	13,68	3,16
30	11,16	1,96	11,60	0,51
PROMEDIO	10,745	1,962	0,08	1,40

9. CONCLUSIONES

- Después de buscar un material correspondiente a una arena limosa (SM) en diferentes sectores de la Universidad Pontificia Bolivariana (parqueadero de estudiantes, talud frente a la entrada del edificio k2 y costado noroccidental de la cafetería campestre), se encontró el material objeto de estudio en el costado noroccidental de la cafetería campestre.
- Una vez definida la fuente del material se procedió a realizar los ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla No 200 y de límites de Atterberg obteniendo un material grueso en el cual predomina la fracción arenosa y con un contenido de finos no plásticos superior al 12% (37.31%), correspondiendo a una arena limosa (SM) en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
- Mediante el ensayo de compactación Proctor modificado, se determinó que la humedad óptima promedio del suelo estudiado es de 10,74 % y el peso específico seco máximo promedio es de $1,96 \text{ g/cm}^3$. En el ensayo Proctor estándar el valor de la humedad óptima promedio obtenida fue de 13,47% y el peso específico seco máximo promedio fue $1,776 \text{ g/cm}^3$. Y finalmente mediante el ensayo Harvard miniatura se determinó una humedad óptima promedio de 14,92% y un peso específico seco máximo promedio fue de 1,741%
- De los resultados de los diferentes ensayos de compactación realizados, se puede concluir que entre mayor sea la densidad seca máxima, menor será la humedad óptima, es decir existe una relación inversa entre estos dos parámetros. Este comportamiento se debe probablemente a que cuando un suelo tiene una relación de vacíos alta (densidad baja), este tiene una mayor capacidad para absorber agua.

- Para la determinación de la energía de compactación es necesario conocer el número de capas, el número de golpes por cada capa, el peso del martillo y su altura, al igual que el volumen del molde. Con los equipos utilizados en el laboratorio de suelos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga se obtuvieron las siguientes energías de compactación: 2686,1 kJ/m³ en el ensayo Proctor modificado, 585 1 kJ/m³ en el ensayo Proctor estándar y 3 kJ/m³ en el ensayo de Harvard miniatura.
- Después de analizar los resultados obtenidos en el presente trabajo de grado, se puede concluir que existe una relación directa entre la densidad seca máxima y la energía de compactación aplicada al suelo. Con los pesos específicos secos máximos obtenidos y las energías de compactación suministradas se realizaron tres gráficas (regresiones lineal, exponencial y polinómica) que evidencian esta relación directa, correspondiendo la regresión polinómica de grado 2 la del mejor ajuste. Este comportamiento es lógico, ya que al aplicar una energía de compactación alta se reducen los vacíos en un determinado volumen de suelo y por lo tanto se aumenta la densidad.
- Así mismo los resultados muestran una relación inversa entre la humedad óptima y la energía de compactación aplicada en cada ensayo. Con las humedades óptimas y las energías de compactación de cada ensayo se construyeron tres gráficas (regresiones lineal, exponencial y polinómica) que evidencian esta relación inversa, correspondiendo la regresión polinómica de grado 2 la del mejor ajuste. Esta relación inversa entre estos dos parámetros indica que al aplicarle al suelo una energía de compactación alta no se requiere una gran cantidad de agua para obtener una alta densidad.
- Dando solución al objetivo principal del presente trabajo de grado, el cual consiste en poder estimar los parámetros de compactación que se obtendrían

en ensayos que requieran una alta energía, a partir de los parámetros obtenidos en ensayos de baja energía de compactación, se obtuvieron relaciones entre los pesos específicos secos de los diferentes ensayos de laboratorios al igual que entre las humedades óptimas de dichos ensayos.

- Si se quisieran conocer los parámetros de compactación que se obtendrían en ensayos Proctor modificado a partir de los obtenidos en pruebas Harvard miniatura realizadas sobre las arenas limosas objeto de estudio en este trabajo, bastaría con multiplicar el peso específico seco máximo obtenido en el Harvard miniatura por una constante $K\gamma_{d1} = 1,126$ para obtener el peso específico seco máximo que se obtendría en el Proctor modificado. Así mismo si se quisiera conocer la humedad óptima que se obtendría en ensayos tipo Proctor modificado a partir de la obtenida en pruebas Harvard miniatura, esta se debe multiplicar por una constante $kw_1 = 0,7197$.
- Si se quisieran conocer los parámetros de compactación que se obtendrían en ensayos Proctor estándar a partir de los obtenidos en pruebas Harvard miniatura realizadas sobre las arenas limosas objeto de estudio en este trabajo, bastaría con multiplicar el peso específico seco máximo obtenido en el Harvard miniatura por una constante $K\gamma_{d2} = 1,020$ para obtener el peso específico seco máximo que se obtendría en el Proctor estándar. Así mismo si se quisiera conocer la humedad óptima que se obtendría en ensayos tipo Proctor estándar a partir de la obtenida en pruebas Harvard miniatura, esta se debe multiplicar por una constante $kw_2 = 0,9028$
- Si se quisieran conocer los parámetros de compactación que se obtendrían en ensayos Proctor modificado a partir de los obtenidos en pruebas tipo Proctor estándar realizadas sobre las arenas limosas objeto de estudio en este trabajo, bastaría con multiplicar el peso específico seco máximo obtenido en la prueba estándar por una constante $K\gamma_{d3} = 1,1037$ para obtener el peso específico seco

máximo que se obtendría en el Proctor modificado. Así mismo si se quisiera conocer la humedad óptima que se obtendría en ensayos tipo Proctor modificado a partir de la obtenida en las pruebas estándar , esta se debe multiplicar por una constante $k_{w_3} = 0,7971$

- Todas estas relaciones se obtuvieron con el fin de reducir el tiempo de ejecución de los ensayos que requieren una energía de compactación alta a partir de los resultados obtenidos en pruebas que demanden una menor energía. Además de esta reducción en el tiempo de ejecución de los ensayos también se logra una disminución en el esfuerzo físico que tendrá que emplear el laboratorista.

10. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con la investigación iniciada en el presente trabajo de grado, estimando las relaciones existentes entre los pesos específicos secos máximos y las humedades óptimas obtenidas en los diferentes ensayos de compactación en otros suelos.
- Es recomendable siempre utilizar los mismos equipos y utensilios (moldes, martillos y balanzas) con el fin de aplicar siempre la misma energía de compactación en cada tipo de ensayo.
- Debido a que se han encontrado diferencias en los parámetros de compactación obtenidos en pruebas Proctor modificado realizadas de forma manual y las realizadas en la máquina de compactación, se sugiere realizar una investigación en la cual se establezcan dichas diferencias.
- Para los ensayos de compactación, Proctor modificado y Proctor estándar se recomienda tener precaución a la hora del manejo del martillo, debido a su peso puede generar accidentes en el laboratorio, esta recomendación se refiere a la ejecución de estos ensayos por parte de un solo operador, evitando que una segunda persona rote el martillo.
- Es fundamental utilizar todos los utensilios de seguridad (gafas, guantes, tapa bocas, bata, botas), con el fin de evitar tanto accidentes durante la ejecución de los ensayos así como también prevenir enfermedades respiratorias.
- Con el fin de evitar que los moldes tanto de Proctor modificado y Proctor estándar giren durante la compactación de las muestras, es recomendable adecuar un espacio y en este instalar unas anclas que eviten dicho giro

BIBLIOGRAFÍA

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

BRAJA M., Das. Principios de Ingeniería de Cimentaciones. 5 ed. México. Editorial Thomson. 2006. 742 p.

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

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

JIMÉNEZ S., José A. Mecánica de suelos y sus aplicaciones a la ingeniería. Madrid. Editorial Dossat. 1954. 533 p.

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

MORENO CÁCERES, Diana Patricia. RAMÍREZ FORERO, Robinson Jair. Mejoramiento del ángulo de fricción interna en arenas arcillosas mediante la adición de geotextil tejido t-2400. Bucaramanga, 2012, Trabajo de grado (Ingeniería Civil). Universidad Pontificia Bolivariana.

PRCEDIMIENTO

HARVARD

MINIATURA.

<http://es.slideshare.net/bryanlnerenatorreblanca/ensayo-de-permeabilidad-y-miniatura-de-harvard>