Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO EN DIFERENTES LABORATORIOS DE MECÁNICA DE SUELOS

Firmado electrónicamente por: José Francisco Goméz Rivera
Motivo: Informe final TESIS
Fecha: 25/04/2024 20:18:34
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Byron Estuardo Melgar Sett
Asesorado por el Ing. José Juan Istupe Ibañez

Guatemala, abril 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO EN DIFERENTES LABORATORIOS DE MECÁNICA DE SUELOS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

BYRON ESTUARDO MELGAR SETT
ASESORADO POR EL INGENIERO JOSÉ JUAN ISTUPE IBAÑEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ABRIL 2024

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

FACULTAD DE INGENIERÍA

NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a. i)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Vladimir Cruz Lorente
VOCAL V	Ing. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Inga. José Francisco Gómez Rivera (a. i)
EXAMINADOR	Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco
EXAMINADOR	Ing. Mario Estuardo Arriola Avila
EXAMINADOR	Ing. Wuilliam Ricardo Yon Chavarría
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez.

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO EN DIFERENTES LABORATORIOS DE MECÁNICA DE SUELOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado de Ingeniería, con fecha 05 de noviembre de 2018.

Byron Estuardo Melgar Sett

Guatemala, febrero de 2024

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Jefe del Departamento de Materiales
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala
Presente:

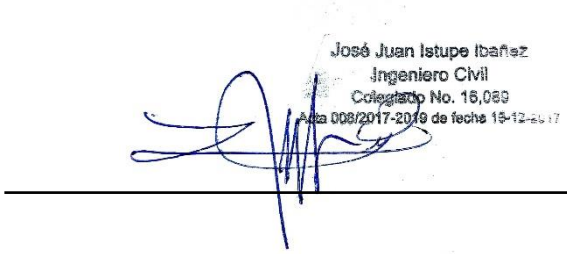
Estimado Ingeniero:

Por este medio me dirijo a usted para informarle que habiendo asesorado al estudiante **Byron Estuardo Melgar Sett** con carné No. 2014 08495, en el trabajo de graduación **"Comparación de resultados del ensayo Proctor Modificado en diferentes laboratorios de mecánica de suelos"** y llenando éste los objetivos t5razados, extiendo la aprobación del mismo.

Por lo tanto, el autor de este trabajo y yo como asesor, nos hacemos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me despido de usted.

Atentamente,



Ing. Juan José Istupe Ibañez
Asesor de Tesis
Investigador Laboratorista
Escuela de Ingeniería Civil
Colegiado No. 16,089

USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala
FACULTAD DE INGENIERÍA

http://civil.ingenieria.usac.edu.gt
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Guatemala, 05 de noviembre de 2018

Ingeniero
José Gabriel Ordóñez Morales
Jefe del Departamento de Materiales y
Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil

Respetado Ingeniero.

Por medio de la presente comunico a usted, que la facultad de Ingeniería a través de la Escuela de Ingeniería Civil ha aprobado el tema para trabajo de graduación **COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO, EN DIFERENTES LABORATORIOS DE MECÁNICA DE SUELOS** del estudiante universitario Byron Estuardo Melgar Sett con No. de Carné 201408495 como asesor al Ing. José Juan Istupe Ibañez.

Así mismo se le recuerda que el trabajo de graduación deberá ser estructurado conforme a lo indicado en el Reglamento de trabajos de Graduación de la Facultad de Ingeniería, presentando según se señala en las especificaciones para la elaboración del informe final y se recomienda que el contenido esté comprendido entre 40 y 80 hojas, con énfasis en el aporte del estudiante en el tema desarrollado.

ID Y ENSEÑAD A TODOS

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Hugo Leonel Montenegro
Director Escuela Ingeniería Civil

Asesor
Interesado

Más de 138 años de Trabajo y Mejora Continua

ESCUELA DE
INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

SIST.LNG.DIRECTOR.11.EIC.2024

El Director de la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor, el visto bueno del Coordinador de Área, al trabajo de graduación titulado: **COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO, EN DIFERENTES LABORATORIOS DE MECÁNICA DE SUELOS**, presentado por: **Byron Estuardo Melgar Sett**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ingeniero Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil

Guatemala, marzo de 2024

Decanato
Facultad e Ingeniería

24189101- 24189102

LNG.DECANATO.OIE.155.2024

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR MODIFICADO, EN DIFERENTES LABORATORIOS DE MECÁNICA DE SUELOS.**, presentado por: **Byron Estuardo Melgar Sett** después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Firmado electrónicamente por: José Francisco Goméz Rivera
Motivo: Informe final TESIS
Fecha: 25/04/2024 18:23:49
Lugar: Facultad de Ingeniería, USAC.

Ing. José Francisco Gómez Rivera
Decano a.i.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO a.i.
Facultad de Ingeniería

Guatemala, abril de 2024

Para verificar validez de documento ingrese a https://www.ingenieria.usac.edu.gt/firma-electronica/consultar-documento

Tipo de documento: Correlativo para orden de impresión Año: 2024 Correlativo: 155 CUI: 2721973271901

Escuelas: Ingeniería Civil, Ingeniería Mecánica Industrial, Ingeniería Química, Ingeniería Mecánica Eléctrica, - Escuela de Ciencias, Regional de Ingeniería Sanitaria y Recursos Hidráulicos (ERIS). Postgrado Maestría en Sistemas Mención Ingeniería Vial. Carreras: Ingeniería Mecánica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería en Ciencias y Sistemas. Licenciatura en Matemática. Licenciatura en Física. Centro de Estudios Superiores de Energía y Minas (CESEM). Guatemala, Ciudad

ACTO QUE DEDICO A:

Mis padres	Byron Melgar Prado y Claudia Sett Caballeros por su paciencia y brindarme su apoyo para lograr esta meta.
Mi hermana	María Alejandra Melgar Sett por sus consejos y apoyo para alcanzar mis objetivos.
Mis abuelos	Augusto Sett (q. e. p. d.) y Enma Prado, por su cariño y consejos para mi carrera profesional.
Mi esposa	Mishell Amezquita, por su constante apoyo y amor incondicional.
Mi hija	Camila Paulette, por ser mi motivación de cada día y el mayor tesoro de mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi *alma mater* e inspiración para seguir esta carrera.
Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos	Por ser la facilitadora de la adquisición de conocimiento que me permite obtener el título de Ingeniero Civil.
Mi asesor	Ing. José Juan Istupe por su apoyo y seguimiento constante para presentar este trabajo de graduación.
Mis amigos	Por formar un grupo de trabajo durante toda la carrera universitaria
Laboratorios participantes	Por la facilidad e importancia brindada durante el ensayo de muestras.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES V
LISTA DE SÍMBOLOS IX
GLOSARIO XI
RESUMEN XIII
OBJETIVOS XV
INTRODUCCIÓN XVII
1. GENERALIDADES 1
1.1. Importancia de la mecánica de suelos 1
1.2. Antecedentes 1
1.2.1. Problemática por malos resultados en los laboratorios 2
1.3. Ubicación de los distintos laboratorios 2
1.4. Protocolo aceptado para que los laboratorios funciones correctamente 3
2. COMPACTACIÓN DE SUELOS 5
2.1. Definición de la compactación de suelos 5
2.1.1. Teoría de la compactación 5
2.1.2. Contenido de humedad, densidad y grado de compactación. 7
2.1.3. Curva de compactación 8
2.1.4. Humedad óptima y densidad seca máxima 10
2.1.5. Factores que influyen en la compactación 11
2.2. Plasticidad 11
2.2.1. Límite líquido (LL) 13
2.2.2. Límite plástico (LP) 14

2.2.3. Índice de plasticidad (IP) 16
2.3. Granulometría 17
2.4. Clasificación de suelos 21
2.4.1. Sistema de clasificación de los suelos AASHTO 22
2.4.2. Sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS 28
2.5. Gravedad especifica 35
2.6. Peso especifico 37
2.7. Densidad del suelo 39
2.8. Propiedades de los suelos compactados 39
2.8.1. Permeabilidad hidráulica del suelo 39
2.8.1.1. Agua en el suelo 40
2.8.1.2. Agua freática 41
2.8.1.3. Agua gravitacional 42
2.8.1.4. Agua retenida 43
2.8.2. Coeficiente de permeabilidad 44
2.9. Compresibilidad 45
2.10. Resistencia al corte 46
2.11. Comportamiento de los suelos compactados 49
3. PROCTOR MODIFICADO 51
3.1. Alcance 51
3.2. Equipo 52
3.3. Muestra 56
3.4. Preparación del equipo 56
3.5. Calibración 56
3.6. Procedimiento 57
3.7. Ejemplo ilustrativo 61
3.8. Informe 64
4. PROTOCOLO 67

4.1. Banco de material 67
4.2. Material de referencia 68
4.2.1. Material 68
4.2.2. Homogenización del suelo 69
4.2.3. Curva de Diseño 70
4.2.4. Manipulación de la muestra 72
4.2.5. Id de laboratorios participantes 74
4.3. Metodología de Análisis 74
4.3.1. Media 75
4.3.2. Mediana 75
4.3.3. Moda 76
4.3.4. Varianza 76
4.3.5. Desviación estándar 77
4.3.6. Valor Z 78
5. RESULTADOS 79
5.1. Valor de referencia 79
5.2. Resultados de laboratorios participantes 82
5.2.1. Densidad seca óptima laboratorios participantes ... 82
5.2.2. Humedad óptima de laboratorios participantes 84
5.3. Curva Peso Unitario Seco Vs. Humedad Óptima de los laboratorios 85
5.4. Análisis de resultados 90
5.4.1. Densidad seca óptima 90
5.4.2. Porcentaje de Humedad 92
CONCLUSIONES 95
RECOMENDACIONES 97
REFERENCIAS 99
APÉNDICES 101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1. República de Guatemala 3
Figura 2. Curva de compactación 9
Figura 3. Copa de Casagrande 14
Figura 4. Prueba de limite plástico 15
Figura 5. Tipos de tamices 18
Figura 6. Gráfico de plasticidad para el sistema unificado de clasificación de los suelos 34
Figura 7. Procedimiento auxiliar para la clasificación de suelos en laboratorio SUCS. 35
Figura 8. Equipo para determinar el peso específico de una muestra de suelo 38
Figura 9. Estado del agua en el suelo 41
Figura 10. Ley de Darcy 42
Figura 11. Altura de ascensión capilar para agua retenida 44
Figura 12. Esfuerzo cortante actuando en un elemento de suelo 46
Figura 13. Envolvente de falla 48
Figura 14. Equipo de compactación para Proctor 53
Figura 15. Molde cilíndrico de 101.66 mm (4.0”) para ensayos de suelos 54
Figura 16. Molde cilíndrico de 152.4 mm (5.0”) para ensayos de suelos 55
Figura 17. Curva Peso Unitario Seco Vs. Humedad Óptima 64
Figura 18. Recolección del material de referencia en el banco de materiales 67
Figura 19. Curva de diseño 71

Figura 20. Embalaje de muestras Proctor Modificado para distintos laboratorios....73
Figura 21. Grafica de valores de densidad seca optima....80
Figura 22. Gráfica de valores para porcentaje de humedad óptima....81
Figura 23. Grafica de valores de densidad seca optima laboratorios participantes....83
Figura 24. Gráfica de valores de densidad seca óptima de laboratorios participantes....85
Figura 25. Gráfica Laboratorio A....86
Figura 26. Gráfica Laboratorio B....86
Figura 27. Gráfica Laboratorio C....87
Figura 28. Gráfica Laboratorio D....87
Figura 29. Gráfica Laboratorio E....88
Figura 30. Gráfica Laboratorio F....88
Figura 31. Gráfica Laboratorio G....89
Figura 32. Gráfica Laboratorio H....89
Figura 33. Valores de Z de grupo y del método para la densidad seca óptima....91
Figura 34. Valores de Z de grupo y del método para el porcentaje de humedad....93
Figura 35. Curva de diseño....103

TABLAS

Tabla 1. Límites de Atterberg....13
Tabla 2. Clasificación de suelos según su índice plástico (IP)....16
Tabla 3. Tamaño de tamices....19
Tabla 4. Sistema de clasificación AASHTO....27
Tabla 5. Sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS....33

Tabla 6. Gravedad específica de los sólidos de algunos suelos 36
Tabla 7. Compresibilidad según su límite líquido..... 45
Tabla 8. Parámetros para realizar el ensayo de compactación 60
Tabla 9. Datos del ensayo de compactación, para obtener el peso unitario seco máximo y humedad óptima..... 62
Tabla 10. Tipos de graduación para material de sub-base y base triturada..... 69
Tabla 11. Porcentajes para curva de diseño. 70
Tabla 12. Porcentajes en peso para curva de diseño. 72
Tabla 13. Interpretación de la variable Z. 78
Tabla 14. Muestra referencia..... 79
Tabla 15. Valores de densidad seca optima..... 80
Tabla 16. Valores de porcentaje de humedad óptima 81
Tabla 17. Resultados Laboratorios..... 82
Tabla 18. Valores de densidad seca optima laboratorios participantes..... 83
Tabla 19. Valores de porcentaje de humedad optima de laboratorios participantes 84
Tabla 20. Densidad seca óptima 90
Tabla 21. Valores Z Densidad seca óptima..... 91
Tabla 22. Porcentaje de Humedad 92
Tabla 23. Valores Z Porcentaje de humedad 93
Tabla 24. Análisis final de laboratorios 94
Tabla 25. Tipos de graduación para material de Sub-base y Base Triturada 102
Tabla 26. Diseño seleccionado para realizar curva 103
Tabla 27. Peso retenido en los tamices..... 104
Tabla 28. Interpretación de la variable Z 106

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Φ	Ángulo
Cm^3	Centímetro cúbico
Gr	Gramo
=	Igual
Kg	Kilogramo
Lb	Libra
>	Mayor
≥	Mayor que
≤	Menor que
<	Menor
m	Metro
mm	Milímetro
N	Newton
Ft	Pie
Plg	Pulgada
%	Porcentaje

GLOSARIO

AASHTO American Association of State Highway and Transportation Officials, por sus siglas en inglés.

Adherencia Resistencia que oponen las partículas al deslizamiento entre si.

Asentamiento Reacomodamiento de la estructura granular del suelo debido a las fuerzas aplicadas sobre él.

ASTM *American Society for Testing and Materials,* por sus siglas en inglés.

Densidad Relación entre el peso de un suelo por la unidad de volumen

Cohesión Fuerza de atracción entre partículas producida por el agua de constitución del suelo.

Compactabilidad Grado en que un cuerpo opone resistencia a la compactación.

Confinamiento Acción de reducir un cuerpo dentro de límites.

Densidad seca Cantidad de masa de suelo seco contendido en un volumen determinado.

Densificación	Aumento de la cantidad de masa de un material en un mismo volumen.
Estabilización	Proceso para mejorar las propiedades mecánicas y físicas de los suelos, a través de métodos confiables
Módulo de balastro	Relación existente entre la fuerza aplicada al terreno y el asentamiento.
Peso específico	Relación entre la unidad de peso por la unidad de volumen del suelo.
Plasticidad	Propiedad mecánica de un suelo para deformarse y mantenerse deformado por la aplicación de esfuerzos
Puzolana	Material silíceo o aluminio-silíceo a partir del cual se producía históricamente el cemento.
Resistencia al corte	Capacidad del suelo de soportar esfuerzos transversales a la dirección de la carga.
Roca madre	Roca no modificada por la acción de los organismos, la cual subyace a la primera capa de suelo.
Suelo	Parte superficial de la corteza terrestre que resiste los esfuerzos aplicados por las estructuras.

RESUMEN

En la ingeniería civil la compactación de suelos es una rama de vital importancia ya que con ella se logra un aumento de resistencia y disminución de la capacidad de deformación de un suelo.

El principal objetivo de la compactación en la construcción es realizar un mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo de cimentación, para que las estructuras que van a construirse puedan transferir la carga de forma uniforme hacia el suelo.

En la mecánica de suelos el ensayo Proctor Modificado es uno de los más importantes procedimientos de estudio y control de calidad de la compactación de un terreno, con este ensayo se puede determinar la densidad seca máxima de una muestra en relación con su grado de humedad, a una energía de compactación determinada.

La comparación de resultados de los laboratorios donde realizará el método de ensayo de Proctor Modificado brindará información para que la exactitud y precisión del método sea de mayor calidad en el país. Además, se podrá dar seguimiento y verificar posibles errores que se estén ejecutando en las actividades del laboratorio para poder realizar medidas preventivas y eliminar estas fallas.

OBJETIVOS

General

Realizar una comparación entre diferentes laboratorios de mecánica de suelos con el ensayo Proctor Modificado.

ESPECÍFICOS

1. Identificar los diferentes laboratorios dedicados a los estudios de la Mecánica de Suelos, ubicado en la Ciudad de Guatemala.

2. Recolectar muestras de suelos procedentes del mismo sitio y distribuirlas a los diferentes laboratorios.

3. Solicitar el ensayo Proctor Modificado según norma AASHTO T 180-19 a cada uno de los laboratorios identificados, verificando los protocolos asignados.

4. Comparar los resultados del ensayo Proctor Modificado obtenidos de los diferentes laboratorios.

INTRODUCCIÓN

El ensayo de compactación de suelos Proctor es utilizado para obtener índices para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasantes, capas de base y subbase a través de la compactación del suelo, mediante su densificación por medios mecánicos, disminuyendo la cantidad de vacíos, y manteniendo el contenido de humedad relativamente constante.

Los resultados de este ensayo son utilizados para el mejoramiento del terreno, aumentar la resistencia a corte del suelo y disminuir la compresibilidad; por lo tanto, disminuir asentamientos y la relación de vacíos, para disminuir así la permeabilidad del suelo.

Durante el desarrollo del ensayo existen variables fuera del control humano, que pudieran influir en el resultado obtenido de peso específico seco máximo y porcentaje de humedad óptimo, como el clima durante el desarrollo del ensayo, el porcentaje de humedad en el ambiente, equipo utilizado y superficie donde se realice el ensayo.

1. GENERALIDADES

Los laboratorios que realizan pruebas o ensayos para verificar las características de un material tienen la necesidad de conocer si los resultados que obtienen son confiables. Esta necesidad se debe a que son los generadores de datos que se utilizan para la aceptación o rechazo de los materiales o técnicas que se controlan constantemente y, estas decisiones tienen un gran impacto en los resultados de las empresas, clientes y proveedores.

1.1. Importancia de la mecánica de suelos

La importancia de un estudio de suelos depende de la magnitud y del tipo de proyecto que se va a realizar, con los resultados que proporcione el estudio de suelos se pueden tomar decisiones acerca del tipo de cimentación a utilizar y la profundidad de la misma. En el caso de la compactación se espera que se mejoren las propiedades físicas y mecánicas del suelo de cimentación para que las estructuras que se van a construir puedan transferir la carga de forma uniforme hacia el suelo.

1.2. Antecedentes

En Guatemala no existe ninguna comparación entre los resultados que brindan los laboratorios para asegurar la calidad con la que son elaborados los ensayos de Proctor Modificado, únicamente existe la “Intercomparación de concreto”, que es un evento donde se analiza la calidad y confiabilidad de los resultados de los laboratorios de concreto, usando la misma muestra y modelos estadísticos.

1.2.1. Problemática por malos resultados en los laboratorios

Las características que se busca mejorar al compactar un suelo son la resistencia al corte, la flexibilidad, incrementar su estabilidad volumétrica, la permeabilidad, entre otras.

En términos generales algunos de los problemas que puede causar unos malos resultados de laboratorio son: una compactación muy intensa puede provocar un suelo muy susceptible al agrietamiento o poco estable al absorber agua, un suelo fino intensamente compactado podrá ser poco deformable, pero si absorbe agua, su deformabilidad puede hacerse extrema, de manera que el esfuerzo al compactarlo pueda resultar altamente contraproducente, dando lugar a un suelo aún más deformable que en su estado natural.

Cuando por compactar de más un suelo se le hacen adquirir características indeseables, se dice que ha sido sobre compactado.

1.3. Ubicación de los distintos laboratorios

Los laboratorios que participan en esta comparación de resultados se encuentran dentro de la república de Guatemala.

Figura 1.

República de Guatemala

Nota. Mapa de la República de Guatemala. Obtenido del Instituto Geográfico Nacional (2023). *Mapa de la República de Guatemala 2023* [Mapa]. (http://www.ign.gob.gt/geografia.html), consultado 15 de mayo 2023. De dominio público.

1.4. Protocolo aceptado para que los laboratorios funciones correctamente

El protocolo aceptado será el que dicta el ensayo de Proctor Modificado que se encuentra en la norma AASHTO T 180-19: *Standard Method of test for Moisture – Density relations of soils using a 4.54 kg (10 lb) rammer and a 457 mm (18 in)* drop; también se puede encontrar la norma ASTM D-1557-07: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3)), este primer tipo de ensayo abarca los procedimientos de compactación utilizados en los laboratorios, para determinar la relación entre el contenido de agua y peso unitario seco de los suelos, este ensayo aplica únicamente para aquellos suelos que tienen el 30 % o menos en peso de sus partículas retenidas en el tamiz de ¾".

2. COMPACTACIÓN DE SUELOS

Se entiende por compactación todo aquel proceso que aumente el peso volumétrico de un material granular. Las principales ventajas de tener un suelo compactado son:

- Aumentar la resistencia al corte y por consiguiente, lograr una mejora en la estabilidad y capacidad de carga de cimentaciones y pavimentos.
- Disminuir la compresibilidad y así reducir asentamientos del suelo.
- Disminuir la relación de vacíos y, por consiguiente, reducir la permeabilidad.
- Reducir el potencial de expansión, contracción o expansión por congelamiento.

2.1. Definición de la compactación de suelos

La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contactos las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos, lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades mecánicas.

2.1.1. Teoría de la compactación

El acomodo de las partículas en un suelo que se ha tratado de mejorar no solo depende de las características del dispositivo que se utilizó para compactar, sino fundamentalmente de la humedad que tenía en ese momento el material.

Si las partículas están secas, la fricción intergranular opone una resistencia mayor al desplazamiento relativo de ellas, que si se encuentran lubricadas por una partícula de agua; por el contrario, si la masa tiene humedad elevada, el agua llena los vacíos que podrían ser ocupados por partículas en un arreglo más denso. Esto es cierto en suelo con un alto porcentaje de finos y no en las arenas gruesas y gravas. Por lo tanto, existe un contenido de agua con el que se obtiene el máximo peso volumétrico.

Una vez definido un procedimiento de compactación y una energía de este, se comprueba que la densidad alcanzada por el suelo varía con la humedad, de manera que se encuentra una densidad óptima para una humedad inferior a la de saturación. El estado de compactación queda definido por dos variables, la densidad seca y la húmeda.

Para medir el grado de compactación de un material o un relleno se debe establecer la densidad seca del material. En la obtención de la densidad seca se debe tener en cuenta los parámetros de la energía utilizada durante la compactación y también depende del contenido de humedad durante el mismo.

Para obtener una buena compactación será necesario controlar debidamente la cantidad de agua, debido a que, si esta es muy poca, no existirá lubricación y no se podrá disminuir la fricción existente entre las partículas; en caso de que el agua sea en exceso las partículas podrán ser separadas por el agua.

La situación anterior demuestra que es necesario determinar la cantidad de agua en la cual se obtenga una excelente lubricación que permita la mayor densidad posible, llamada “Densidad Máxima o Peso Unitario Seco Máximo”; y a la cantidad de agua necesaria para obtener dicha densidad recibe el nombre de “Humedad Óptima”.

2.1.2. Contenido de humedad, densidad y grado de compactación.

Se puede decir que la densidad seca de un suelo producida por la compactación depende del porcentaje de humedad que contenga y de la intensidad de la fuerza de compactación que se le aplique. La compactación de un suelo se mide y se verifica pro la densidad seca del suelo, esto es, el peso de las partículas sólidas por unidad de volumen, las unidades de la densidad son: kgm3 o lb/pie3. La comparación de la densidad seca actual con la densidad seca máxima resulta el porcentaje de compactación.

- Contenido de humedad: es la relación, expresada como porcentaje, del peso del agua en una masa dada de suelo, al peso de las partículas sólidas, es decir, el contenido en agua de un volumen de tierra.

- Densidad: como todo cuerpo poroso, el suelo tiene dos densidades, la real y la aparente:

    - Densidad real: es la relación entre la unidad de peso y la unidad de volumen de la fase sólida de un suelo, siendo más o menos constante.
    - Densidad aparente: refleja el contenido total de porosidad en un suelo y es importante para el manejo de los suelos ya que refleja la compactación y facilidad de circulación de agua y aire en un suelo.

- Grado de compactación: en un terreno se expresa en porcentaje respecto al ensayo Proctor; es decir, una compactación del 85 % de Proctor Modificado quiere decir que alcanza el 85 % de la máxima densidad del Proctor Modificado. El porcentaje puede ser mayor al 100 %.

2.1.3. Curva de compactación

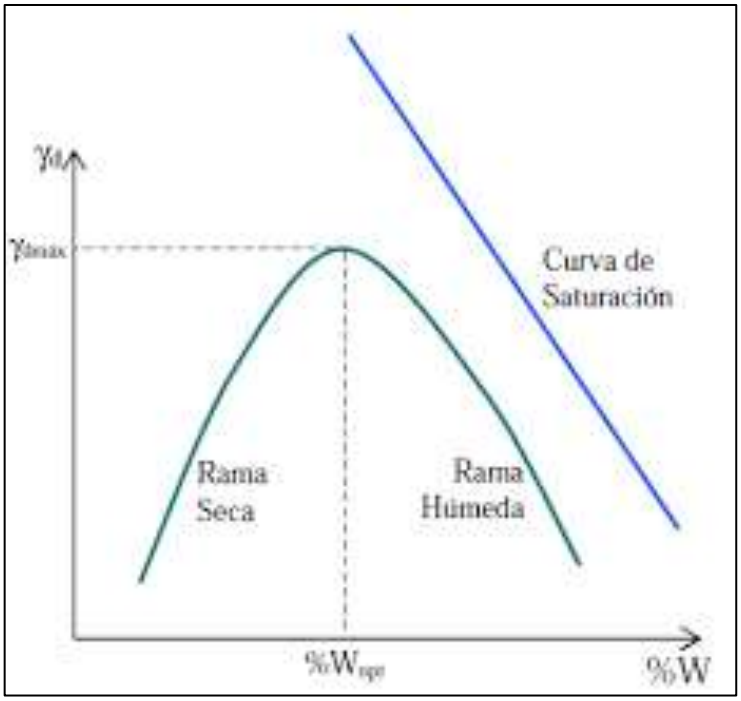
La máxima compactación seca para una masa de suelo se puede alcanzar mediante los ensayos de laboratorio o en obra por medio de la compactación, depende sobre todo del tipo de suelo. Compactando un suelo a diferentes contenidos de humedad, se puede llevar los valores de las densidades secas expresadas en kg/m3 o lb/pie3 y en las abscisas los porcentajes de humedad. A esta curva resultante se le denomina, curva de compactación.

Cuando se compacta un suelo bajo diferentes condiciones de humedad y se relacionan las densidades secas con los contenidos de humedad respectivos, se obtiene una curva de compactación. La tendencia de la curva de compactación define la densidad máxima seca del suelo. El contenido de humedad correspondiente a este valor se conoce como humedad óptima.

Esta curva tiene una rama ascendente, llega a un punto máximo para después decrecer, la parte alta es el punto para el cual corresponde la “Densidad Seca Máxima o PUSmax” y el porcentaje de humedad respectiva será “Humedad Óptima %Hopt”. La curva se asemeja generalmente a una parábola y también es llamada curva Proctor. En la vida real, la compactación se realiza sobre materiales que serán utilizados pare relleno en la construcción de terraplenes, pero también en proyectos destinados al mejoramiento de las propiedades mecánicas del terreno.

Figura 2.

Curva de compactación



Nota. Ejemplo de una curva de compactación. Librería del Ingeniero (2023). *Ensayo de Compactación del suelo – Excel*. (https://www.libreriaingeniero.com/2017/09/ensayo-de-compactacion.html), consultado el 03 de julio de 2023.

Para un contenido de agua dado, el peso específico máximo teórico se obtiene cuando no existe aire en los espacios vacíos, es decir, cuando el grado de saturación es igual al 100 %. De esta manera, el peso específico seco máximo a un contenido agua dado, con cero vacíos de aire se expresa como:

$$\gamma_{sat} = \frac{G_s \gamma_W}{1 + e}$$

Donde:

- γ_{sat} = peso específico saturado
- γ_W = peso específico del agua
- e = relación de vacios
- G_s = densidad relativa de los sólidos del suelo

2.1.4. Humedad óptima y densidad seca máxima

La humedad óptima es la que se corresponde con el máximo de la curva de densidad. La rama seca es la que se corresponde al suelo bajo de humedad, donde la fricción y cohesión dificultan su densificación. La rama húmeda, es asintótica a la línea de saturación que se desplaza hacia la derecha de la humedad óptima de compactación, dado que la energía de compactación de un suelo muy húmedo la absorbe el agua y no el esqueleto mineral.

Para obtener la humedad óptima y la densidad seca máxima, existen diferentes métodos, que se pueden resumir en dos grupos.

- Métodos dinámicos: son aquellos en los que la energía de compactación se aplica por medio de golpes de pisón (mazo o martillo) dinámicamente (Proctor).

- Métodos estáticos: son aquellos métodos en que la energía de compactación es aplicada por medio de presión hidráulica (prensa hidráulica) o estática (CBR). Estos procedimientos se realizan con el equipo adecuado.

2.1.5. Factores que influyen en la compactación

En este apartado se describen los factores que tiene relación a los factores que intervienen en la compactación.

- Tipo de suelo: tiene influencia la granulometría del suelo, forma de sus partículas, contenido de finos, cantidad, gravedad específica, entre otros.
- Energía específica: es la presión aplicada al suelo por unidad de volumen, durante cualquier proceso de compactación.
- Método de compactación: en el campo y laboratorio existen diferentes métodos de compactación, la elección de uno de ellos influirá en los resultados a obtenerse.
- Humedad: el contenido óptimo de humedad permitirá alcanzar la densidad seca máxima, si el contenido de humedad está por debajo del óptimo, el suelo es rígido y difícil de comprimir, originando densidades bajas y contenidos de aire elevados, cuando esta por el encima del óptimo, el contenido de aire se mantiene, pero aumenta la humedad produciendo la disminución de la densidad seca.

2.2. Plasticidad

La consistencia es el grado de cohesión que tienen las partículas de los suelos arcillosos, estos pueden tener diferentes grados de cohesión dependiendo de la cantidad de agua que contengan, esto da a lugar a los estados de consistencia. Las partículas de una arcilla muy seca pueden estar tan estables como las de un ladrillo, con plasticidad nula y estas mismas partículas con un gran contenido de agua pueden presentar las propiedades de un lodo semilíquido o inclusive, las de una suspensión líquida.

Debido a los anterior, los límites de *Atterberg* o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. La arcilla, por ejemplo, al agregarle agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido.

El contenido de agua con que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro y en Mecánica de Suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades, para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad), es decir, la propiedad que tienen algunos suelos de deformarse sin agrietarse, ni producir rebote elástico. El método para medir estos límites de humedad fue ideado por *Atterberg* a principios del siglo XX, a través de dos ensayos que definen los límites del estado plástico.

Los límites de *Atterberg* son propiedades índices de los suelos, con que se definen la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo. *Atterberg* dividió y consideró tres límites o estados de consistencia: el límite de contracción que es la frontera convencional entre el estado sólido y semisólido, el límite líquido que se define como la frontera entre estado plástico y semilíquido. También se denomina al límite líquido como la frontera entre el estado plástico y líquido.

Tabla 1.

Límites de Atterberg

Sólido	Semisólido	Plástico	Semilíquido	Líquido
Límite de contracción	**Limite plástico**	**Limite líquido**		

Nota. Tabla de ejemplificación de estado de material en comparación con su límite de Atterberg. Elaboración propia, realizado en Microsoft Excel.

En los granos gruesos de los suelos, las fuerzas de gravitación predominan fuertemente sobre cualquier otra fuerza; por ello, todas las partículas gruesas tienen un comportamiento similar.

En los suelos de granos muy finos, sin embargo, fuerzas de otros tipos ejercen acción importante; ello es debido a que en estos granos, la relación de área – volumen alcanza valores de consideración y fuerzas electromagnéticas desarrolladas en la superficie de los compuestos minerales cobran significación.

2.2.1. Límite líquido (LL)

El límite líquido está definido, como el contenido de humedad en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado plástico para pasar al estado líquido o semilíquido, en donde el suelo toma las propiedades y apariencias de una suspensión. Puesto que no existe una separación muy clara entre los estados de consistencia semilíquido, plástico y semisólido, se ha ideado el procedimiento estándar para la determinación de este límite; el cual se denomina "método mecánico" el que ideó *Casagrande* y también denominado "Copa de *Casagrande".*

Figura 3.

Copa de Casagrande

Nota. Copa de Casagrande. Obtenido del Consejo Superior de Investigaciones Recuperado de: (https://museovirtual.csic.es/csic75/instrumentos/cuchara_atterberg/c_atterberg.html), consultado el 05 de julio de 202. De dominio público.

2.2.2. Límite plástico (LP)

El límite plástico está definido como el contenido de humedad en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado semisólido y es estado plástico; en el estado semisólido el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado y en el estado plástico el suelo se comporta plásticamente. Arbitrariamente, también se define como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro se rompe o se agrieta, cuando se enrolla a un diámetro aproximado de tres milímetros (1/8 pulgadas), al rodarse con la palma de la mano sobre una superficie lisa.

Esta prueba es muy subjetiva (dependiendo del operador) que el ensayo del límite líquido pues la definición del agrietamiento del cilindro de suelo, así como el diámetro de tres milímetros están sujetos a la interpretación del operador. El diámetro del cilindro de suelo puede establecerse por comparación con un alambre común o de soldadura del mismo diámetro. Con la práctica, se encuentra que los valores del límite plástico pueden reproducirse sobre el mismo suelo por parte de diferentes laboratorios dentro de un rango del uno al tres por ciento.

Figura 4.

Prueba de limite plástico

Nota. Análisis visual de límite plástico. Obtenido de Apuntes de Geotécnica con énfasis en laderas *Límites de Atterberg - Límite Plástico*. (http://geotecnia-sor.blogspot.com/2010/11/consistencia-del-suelo-limites-de_25.html), consultado el 05 de julio de 2023. De dominio público.

2.2.3. Índice de plasticidad (IP)

Numéricamente es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), el cual representa l variación de humedad que puede tener un suelo que se conserva en estado plástico. Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la calidad y tipo de arcilla presente en la muestra, sin embargo, el índice de plasticidad depende generalmente, de la cantidad de arcilla en el suelo:

$$IP = LL - LP$$

Atterberg clasificó el IP en diferentes secciones, que varían de cero hasta 17, en los cuales los suelos se comportan de acuerdo a la magnitud del índice de plasticidad, es decir que se muestra un indicativo para razonar como trabaja el suelo en el terreno.

Tabla 2.

Clasificación de suelos según su índice plástico (IP)

Si IP = 0	Si no es posible determinar uno de los dos límites (LL o LP), o si la diferencia es negativa (IP), el suelo se clasifica como No Plástico (NP)
Si IP < 7	El suelo tiene una baja plasticidad
Si 7 < IP < 17	El suelo es medianamente plástico
Si IP > 17	Suelo altamente plástico

Nota. Clasificación de suelos según su índice plástico. Obtenido del Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. (2004). *Índice Plástico*

2.3. Granulometría

La variedad en el tamaño de las partículas del suelo es casi ilimitada; por definición, los granos de mayor tamaño son los que se pueden mover con gran facilidad, mientras que los más finos son tan pequeños que se no se puede apreciar con un microscopio corriente. Las partículas producidas por la meteorización mecánica rara vez son de diámetro inferior a 0, 001 mm y generalmente, son mucho mayores. Para clasificar por tamaño de partículas gruesas, el procedimiento más expendido es el del tamizado. Sin embargo, al aumentar la finura de las partículas, el tamizado se hace cada vez más difícil teniéndose entonces que recurrir al procedimiento de sedimentación.

La información obtenida del análisis granulométrico puede en ocasiones utilizarse para predecir movimientos del agua a través del suelo, aun cuando los ensayos de permeabilidad se utilizan más comúnmente. El análisis granulométrico es un intento de determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de un grano presentes en una masa de suelo dada, obviamente para obtener un resultado satisfactorio la muestra debe ser estadísticamente representativa de la masa de suelo.

Para lograr esto se obtiene la cantidad de material que pasa a través de un tamiz con una malla dada pero que es retenido en un siguiente tamiz, cuya malla tiene diámetros ligeramente menores a la del anterior. Es evidente que el material retenido de esta forma en cualquier tamiz consiste en partículas de muchos tamaños, los cuáles son menores al tamaño de la malla anterior que pasó.

Los bastidores de los tamices son de bronce centrifugado o de acero inoxidable con bordes laminados, fondos extendidos para que se adapten a todos los armazones, recipientes o fondos separadores del mismo diámetro. Esto permite que se puedan apilar. Los tamices de bronce son más económicos; los tamices de acero inoxidable son de más larga duración, con una malla resistente al pandeo.

Figura 5.

Tipos de tamices

Nota. Tamices para suelos. Obtenido de MyM instrumentos técnicos (2014). *Tipos de tamices.* Recuperado de *(*https://www.myminstrumentostecnicos.com/equipos-de-laboratorio/tamices/tipos-de-tamices/), consultado el 05 de julio de 2023. De dominio público.

El número del tamiz, los micrones, la apertura nominal en milímetros y pulgadas están descritos en una placa de metal permanente pegada en cada tamiz. Todos los tamices deben de cumplir con la norma *AASHTO M92*; *ASTM E11.*

Tabla 3.

Tamaño de tamices

Tamaño de Tamices Norma USA y sus Equivalentes		
No. Alternativo	**Abertura nominal (pulgadas)**	**Abertura estándar (mm)**
4”	4	100
3 ½”	3.5	90
3”	3	75
2 ½”	2,5	63
2.12”	2,12	53
2”	2	50
1 ¾”	1,75	4,5
1 ½”	1,5	37,5
1 ¼”	1,25	31,5
1.06”	1,06	26,5
1”	1	25
7/8”	0,875	22,4
¾”	0,75	19
5/8”	0,625	16
0.53	0,53	13,2
½”	0,5	12,5
7/16”	0,434	11,2
3/8”	0,375	9,5
5/16”	0,312	8
0.265”	0,265	6,7
¼”	0,25	6,3
1/8”	0,125	3,17
No.3	0,223	5,6
No.4	0,187	4,75
No.5	0,157	4
No.6	0,131	3,35
No.7	0,11	2,8
No.8	0,094	2,36
No.10	0,078	2
No.12	0,066	1,7
No.14	0,055	1,4

Continuación de la 3.

No.16	0,046	1,18
No.18	0,039	1
Tamaño de Tamices Norma USA y sus Equivalentes		
No. Alternativo	**Abertura nominal (pulgadas)**	**Abertura estándar (mm)**
No.20	0,033	0,85
No.25	0,027	0,71
No.30	0,023	0,6
No.35	0,019	0,5
No.40	0,016	0,425
No.45	0,013	0,355
No.50	0,011	0,3
No.60	0,009	0,25
No.70	0,008	0,212
No.80	0,007	0,18
No.10	0,005	0,15
No.120	0,0049	0,125
No.140	0,0041	0,106
No.170	0,0035	0,09
No.200	0,0029	0,075
No.230	0,0024	0,062
No.270	0,002	0,053
No.325	0,0017	0,045
No.400	0,0014	0,038

Nota. Tamaño de tamices para norma USA y sus equivalentes. Obtenido de ELE international (2007). *Testing Equipment for construction materials.*

Todos los sistemas de clasificación utilizan el tamiz No.200 como punto divisorio; las clasificaciones se basan generalmente en términos de la cantidad retenida o la cantidad que pasa a través del tamiz No. 200. Ocasionalmente es deseable conocer la escala aproximada de partículas de suelo menores que el tamiz No. 200. Para este caso, el método del hidrómetro es el más utilizado.

2.4. Clasificación de suelos

Debido a la gran cantidad de suelos que se presentan en la naturaleza, la Mecánica de Suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos. Cada uno de estos métodos tiene, prácticamente su campo de aplicación según la necesidad y uso que las haya fundamentado.

La existencia de esta variedad de sistemas de clasificación de suelos se debe, al hecho de que tanto el Ingeniero Civil, como el Geólogo y el Agrónomo analizan el suelo desde diferentes puntos de vista. Sin embargo, lo que es fundamental es el hecho de que cualquier clasificación que quiera abarcar las necesidades correspondientes debe estar basada en las propiedades mecánicas de los suelos, ya que estas son fundamentales en las variadas aplicaciones de la ingeniería.

En general, la textura de un suelo se refiere a su apariencia superficial, la cual es influenciada por el tamaño de los granos presentes en él. La clasificación por texturas permite dividir el suelo en categorías básicas dependiendo del tamaño presente: grava, arena, limo y arcilla, pero en la naturaleza la presentación habitual de los suelos es una mezcla de ellos, en este caso el nombre del suelo depende de los componentes principales o según el tamaño de grano que predomina en cantidad, según el caso el suelo se puede clasificar como arcillo limoso, areno arcilloso, franco arenoso.

En nuestro medio los métodos aceptados y utilizados son los siguientes: el sistema de clasificación de suelos *AASHTO (American Association of State High-Way and Transportation Officials)* y el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos SUCS o USCS *(unified Soil Classification System)* también llamado sistema de clasificación *ASTM.*

2.4.1. Sistema de clasificación de los suelos AASHTO

Está destinada principalmente a clasificar los suelos de acuerdo a su adaptabilidad para ser usados en la construcción de pavimentos en carreteras y caminos. El sistema *AASHTO* se usa principalmente para clasificación de las capas de carreteras. No se usa en la construcción de cimentaciones.

Este sistema describe un procedimiento para clasificar suelos en sietes grupos principales: desde A-1 hasta A-7, basado en el tamaño del grano (granulometría) y en la plasticidad (límite líquido e índice de plasticidad). Para evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para subrasante de un camino se desarrolló también un número denominado como índice de grupo (IG).

- Grupo A-1: el material clasificado en este grupo es una mezcla bien gradada de fragmentos de piedra o grava, arena gruesa, arena fina y un aglomerante no plástico o poco plástico.

    - Grupo A-1-a: en este sub-grupo se clasifican aquellos materiales que están formados, principalmente, de fragmentos de piedra o grava con o sin un aglomerante fino bien gradado.

- Grupo A-1-b: aquellos materiales que están formados de arena gruesa o con aglomerante bien gradado o sin él.

- Grupo A-2: incluye todos los materiales que contienen hasta un 35 % del material que pasa la malla No.200 y que no pueden clasificarse en los grupos A-1 y A-3, por sobrepasar las limitaciones de dichos grupos debido a un exceso en la proporción de finos, en la plasticidad o en ambas.
  - Sub-grupo A-2-4 y A-2-5: además de sobrepasar en un 35 % de la malla No.200; en la fracción que pasa por la malla No.40 tiene características de los grupos A-4 y A-5. Quedan incluidos los materiales como gravas y arenas gruesas, con una porción de limo o un índice de plasticidad q mayor a la limitación del grupo A-1 y arenas finas que contienen limo no plástico en cantidad superior a las limitaciones del grupo A-3.

  - Sub-grupo A-2-6 y A-2-7: aquí se incluyen los materiales similares a los de los grupos A-2-4 y A-2-5, con la diferencia de que el material fino contiene arcilla plástica que tiene las características de los grupos A-6 y A-7. Los efectos combinados del aumento por encima de 10 del índice plástico y del aumento por encima del 15 % de lo que pasa de la malla No.200 se reflejan en los valores del índice de grupo desde cero a cuatro (materiales limo-arcillosos).

- Grupo A-4: a este grupo pertenecen los suelos limosos sin plasticidad o poco plásticos, que tienen más del 75 % de sus partículas pasando por la malla No.200. También incluye este grupo a mezclas de limo fino y hasta un 64 % de arenas y gravas que carecen de la fracción que pasa de la malla No.200. El índice de grupo varía de uno a ocho, notándose un

aumento en el porcentaje de material grueso a medida que se reduce el índice de grupo.

- Grupo A-5: similares al grupo anterior, pero con la diferencia que son del tipo diatomáceo o micáceo. Estos suelos pueden ser muy elásticos según se refleja por su alto límite líquido. Su índice de grupo varía de 1 a 12, indicando los valores crecientes, el efecto combinado de la disminución del porcentaje de material grueso y el aumento de su límite líquido.

- Grupo A-6: arcillas plásticas que tienen el 75 % o más del material pasado de la malla No.200. Con la humedad estos suelos suelen experimentar fuertes cambios de volumen. Su índice de grupo caría de 1 a 16, indican los valores crecientes el efecto del aumento del índice plástico y la disminución del porcentaje de material grueso.

- Grupo A-7: similares al grupo anterior, excepto que tiene el límite líquido muy alto como es característico de los suelos del grupo A-5. Pueden ser elásticos y están sujetos a grandes cambios de volumen, estos suelos tienen un índice de grupo que varía de 1 a 20. Reflejándose el efecto combinado del aumento del límite líquido, el índice plástico y la disminución del porcentaje del material grueso, en los valores crecientes del índice de grupo.

    - Sub-grupo A-7-5: materiales con un índice plástico muy alto con relación a su límite líquido y que están sujetos a extremos cambios de volumen con los cambios de humedad.

En la figura 6 se presenta la clasificación según *AASHTO* donde se describen otras propiedades de los suelos descritos anteriormente y donde

además se muestran algunas recomendaciones para el uso adecuado en carreteras.

- Tamaño de grano: de distinguen tres tamaños principales: grava, arena y finos (limo y arcilla). Los bloques de roca (tamaño superior a los 75mm) encontrados dentro de la muestra de suelo, se excluyen de la porción de análisis para la clasificación, pero se registra la cantidad presente.
- Plasticidad: el término limo es aplicado a aquellas fracciones finas donde el índice de plasticidad es inferior o igual a 10, el término arcilloso a las fracciones con plasticidad superior o igual a 11.
- Índice de grupo (IG): el índice de grupo incluyendo el grupo de clasificación, se usa para determinar la calidad relativa de suelos de terraplenes, material de subrasante, sub-bases y bases.

El índice de grupo se determina a través de la evaluación en cada grupo, mediante el cálculo de la fórmula empírica:

$$IG = (F_{200} - 35)[0.2 + 0.005(LL - 40)] + 0.01\,(F_{200} - 15)(IP - 10)$$

Donde:

- F_{200} = porcentaje que pasa la malla No.200, expresado como número entero.
- LL = límite líquido
- IP = índice de plasticidad

Si el porcentaje que pasa por la malla No.200 es mayor a 75, se anotará 75 y si es menor de 35, se anotará cero. Si el porcentaje de material que pasa por la malla No.200 es mayor de 55, se anotará 55, si es menor de 15 se anotará cero. Si el límite líquido es mayor de 60, se anotará 60 y si es menor de 40, se

anotará cero. Si el índice de plasticidad es mayor a 30, se anotará 30, y si es menor a 10, se anotará cero.

Al calcular el índice de grupo para un suelo de los grupos A-2-6 o A-2-7, se debe de usar la ecuación de índice de grupo parcial relativa al índice de plasticidad:

$$IG = 0.01(F_{200} - 15)(ip - 10)$$

Cuando el límite líquido no puede ser determinado, el índice de grupo se debe considerar cero. Si un suelo es altamente orgánico (turba) puede ser clasificado como A-8 sólo con una inspección visual generalmente, es de color oscuro, fibroso y olor putrefacto.

Algunas reglas con respecto al uso de estas ecuaciones son las siguientes:

- Si el valor obtenido es negativo, se debe asumir como IG=0
- No hay un límite superior para el índice de grupo.
- El IG debe redondearse a valores enteros; por ejemplo, si el valor obtenido es IG = 3.3, realmente es IG = 3 y si es IG = 3.5 realmente es IG = 4.
- El índice de grupo de A-1, A-3 y A-2-4 y A-2-5 siempre es igual a cero.
- Para los grupos A-2-6- y A2-7, el índice de grupo se calcula con la segunda parte de la ecuación, dependiendo sólo del IP.

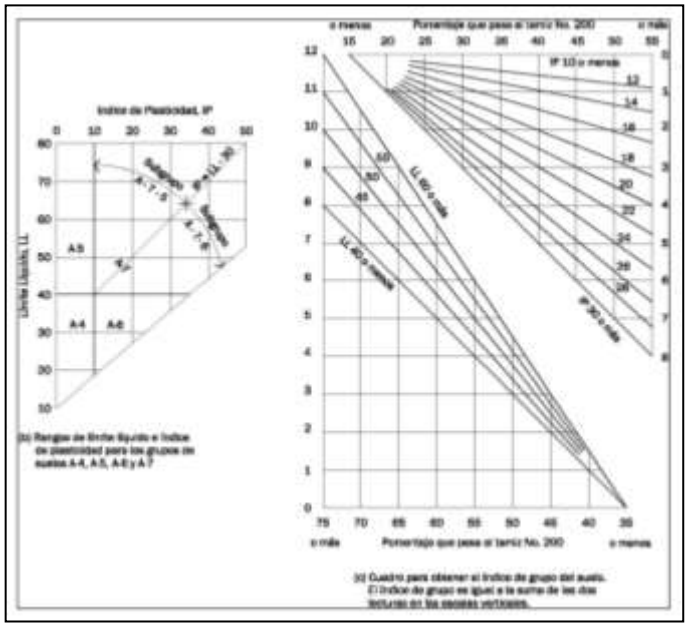
Tabla 4.

Sistema de clasificación AASHTO

GRUPO	Suelos Granulares: 35% o menos pasa malla # 200							Suelos Arcillosos y Limosos: Más de 35% pasa malla # 200			
	A – 1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
SUB-GRUPO	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5* A-7-6*
Porcentaje de material que pasa el tamiz											
No. 10	50max										
No. 40	30max	50max	51min								
No. 200	15max	30max	10max	35max	35max	35max	35max	36min	36min	36min	36min
Plasticidad Pasa la malla # 40											
LL				40max	41min	40max	41min	40max	41min	40max	41min
IP	6max		NP	10max	10max	11min	11min	10max	10max	11min	11min
Índice de Grupo[5]	0		0	0		4max		8max	12max	16max	20max
Materiales Constructivos	Fragmentos de Piedra, grava y Arena		Arena Fina	Grava y/o Arena limosa		Grava y/o Arena arcillosa		Suelos Limosos		Suelos Arcillosos	
Calidad (Subrasante)	Excelente a Buena							Regular a Mala			

* A-7-5: IP menor o igual a LL – 30 * A-7-6: IP mayor que LL – 30

* Índice de Grupo = IG = $(F_{200} - 35)\,[0.2 + 0.005\,(LL - 40)] + 0.01\,(F_{200} - 15)(IP - 10)$



Nota. Sistema de clasificación según AASHTO. Obtenido de Bowles (2000). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil.* (p. 70.). McGraw-Hill.

2.4.2. Sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS

La forma original del sistema de clasificación de suelos fue desarrollada por *Arthur Casagrande* en 1942, como una herramienta para ser usada en las construcciones diseñadas por el Cuerpo del Ejército de Estados Unidos durante la Segunda Guerra Mundial. En 1952 el Cuerpo de Ingenieros en cooperación con el *US. Bureau Reclamation*, revisó el sistema creado y es aún en la actualidad, el más usado por los ingenieros en la clasificación de suelos.

La clasificación es basada en las propiedades de plasticidad y en la distribución del tamaño de grano, según esta última, el sistema divide el suelo en dos grandes categorías:

- Suelos de grano grueso (granulares): son aquellos materiales en los cuales el porcentaje retenido en la malla No.200 es superior a 50%. Dentro de ellos están las fracciones de arena y grava, son suelos donde la distribución del tamaño y la forma de los granos influye notablemente en las propiedades físico-mecánicas del suelo. El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo. El significado se específica a continuación:

    - G: del término inglés *Garvel,* fracción más grueso o tamaño grava.
    - S**:** del término inglés *Sand,* fracción del suelo con tamaño de grano comprendido entre malla No.4y malla No.200

Las gravas y arenas se separan por la malla No.4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50 % de su fracción gruesa (retenida

en la malla No.200) no pasa por la malla No.40 y es del grupo genérico S, en caso contrario.

Las gravas y las arenas se subdividen en cuatro tipos:

- Materiales prácticamente limpios de finos, bien gradados

    - W: del término Inglés *Wells,* buena gradación del suelo, o sea que dentro de la masa de suelo hay predominio de un tamaño de grano. En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW

- Materiales prácticamente limpios de finos, mal gradados

    - P: del término Inglés *Poorly,* mala gradación. Significa que dentro de la masa de suelo hay variedad en el tamaño de grano, aunque haya predominio de uno de ellos. Da a lugar a los grupos GP y SP.

- Materiales con cantidad apreciable de finos no plásticos
    - M: del término sueco *Mo,* fracción fina del suelo que no posee propiedades de plasticidad, o de tener, es muy baja. Da lugar a los grupos GM y SM.

    - Materiales con cantidad apreciable de finos plásticos

        - C: del término inglés *Clay,* fracción fina del suelo que posee propiedades de plasticidad. Da lugar a los grupos GC y SC.

- Suelos de grano fino: también en este caso el sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para los suelos gruesos y dando lugar a las siguientes divisiones.

    - Limos inorgánicos
        - M: del término sueco *Mo,* fracción fina del suelo que no posee propiedades de plasticidad o de tener, es muy baja.

- Arcillas inorgánicas
    - C: del término inglés Clay, fracción fina del suelo que posee propiedades de plasticidad.

    - Limos y arcillas orgánicas

      O**:** del término inglés *Organic,* define a los suelos que tiene propiedades orgánicas como turba. Suelos no aptos para ingeniería.

Cada uno de estos tres tipos de suelo se sub-dividen, según su límite líquido, en dos grupos. Si este es menor del 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade el símbolo genérico:

- L: del término Inglés Low, suelos con baja plasticidad, son aquellos donde LL<50. Obteniéndose de esta combinación los grupos ML, CL y OL.

Si los suelos son finos con límite líquido mayor del 50 % o sea de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico:

- H: del término Inglés *High,* suelos con alta plasticidad, aquellos donde LL>50. Teniéndose así los grupos MH, CH y OH.

H de notarse que las letras L y H no se refieren a alta o baja plasticidad, pues esta propiedad del suelo ha de expresarse en función de dos parámetros (LL e IP), mientras que en el caso actual sólo el valor del límite líquido interviene.

- Las gravas y las arenas se pueden clasificar así:

GW-GC	SW-SC	GP-GC	SP-SC
GW-GM	SW-SM	GP-GM	SP-SM

Si entre 5 % y 12 % del material pasa a través del tamiz No.200

- Los suelos de grano fino (más del 50 % pasa el tamiz No. 200) son: ML, OL o CL. Si los límites líquidos son menores que 50 %.

- Los suelos de grano fino s son; MH, OH o CH, si los límites líquidos son superiores a 50 %. Los límites líquidos y plástico se ejecutan sobre material correspondiente a la fracción menor del tamiz No.40 de todos los suelos, incluyendo gravas, arenas y suelos finos, utilizando en la ejecución los procedimientos del ensayo del límite líquido y plástico. Estos límites se utilizan con la carta de plasticidad, para determinar el prefijo M, O o C, dependiendo de la localización de las coordenadas de plasticidad del suelo dentro de la carta.

Una descripción visual del suelo debe siempre incluirse en conjunto con el símbolo unificado para completar la clasificación igualmente para el Sistema de Clasificación *AASHTO.* En la Figura 9, se presenta la carta de plasticidad para

SUCS; este cuadro es otra contribución de *Casagrande* al sistema y la línea A que se encuentra en él, es conocida como línea A de *Casagrande.* De acuerdo con las sugerencias del Cuerpo de Ingenieros en el sentido de que no se han encontrado suelos con coordenadas superiores a las determinadas por la línea "límite superior" mostrada.

Tabla 5.

Sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS

Divisiones Mayores			Símbolo de Grupo		Nombres Típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares	
Suelos de grano grueso Si menos del 50% del material pasa el tamiz No. 200	Gravas Si menos del 50% de la fricción gruesa pasa por el tamiz No. 4)	Gravas limpias (pocos o ningún fino)	GW		Gravas bien gradadas, mezclas gravosas, pocos o ningún fino	$Cu = D_{60}/D_{10} > 4$ $Cc = 1 < D^2_{30}/D_{10} \times D_{60} < 3$	
			GP		Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW	
		Gravas con finos (cantidad apreciable de finos)	GM	id u	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o IP < 4	A los materiales sobre la línea A con 4<IP<7 se considera de frontera y se les asigna doble símbolo
			GC		Gravas arcillosas, mezclas gravo-areno-arcillosas	Límites de Atterberg por encima de la línea A o IP > 7	
	Arenas (Si más del 50% de la fricción gruesa pasa por el tamiz No. 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW		Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	$Cu = D_{60}/D_{10} > 6$ $Cc = 1 < D^2_{30}/D_{10} \times D_{60} < 3$	
			SP		Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW	
		Arenas con finos (cantidad apreciable de finos)	SM	id u	Arenas limosas, mezclas arena-limo	Límites de Atterberg por debajo de la línea A o IP<4	Si el material está en la zona sombreada con $4 \leq IP \leq 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo
			SC		Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla	Límites de Atterberg por encima de la línea A o IP>7	
Suelos de grano fino Si más del 50% del material pasa el tamiz No. 200	Limos y arcillas (Límite Líquido LL < 50)		ML		Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad	1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. 2. Dependiendo del porcentaje de finos (fracción menor que el tamiz No. 200 los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5% — GW, GP, SW, SP Más del 12% — GM, GC, SM, SC De 5 a 12% — Casos de frontera que requieren doble símbolo	
			CL		Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras		
			OL		Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad		
	Limos y arcillas (Límite Líquido LL > 50)		MH		Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos		
			CH		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas		
			OH		Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos		
	Suelos altamente orgánicos		Pt		Turba y otros suelos altamente orgánicos		

Nota. Sistema de clasificación según SUCS. Obtenido de Bowles (2000). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil.* (p. 74). McGraw-Hill.

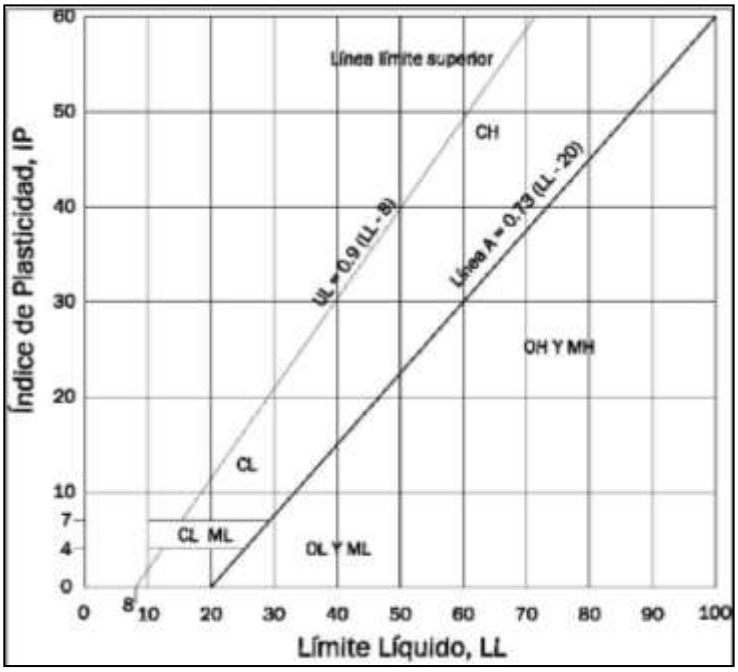
Para la clasificación de suelos de grano fino y suelos de granos gruesos con partes finos. Los límites de *Atterberg* que se grafican en el área sombreada son clasificaciones de frontera y requieren el uso de símbolos duales.

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.

$$IP = 0.74\ (LL - \ 20)$$

Figura 6.

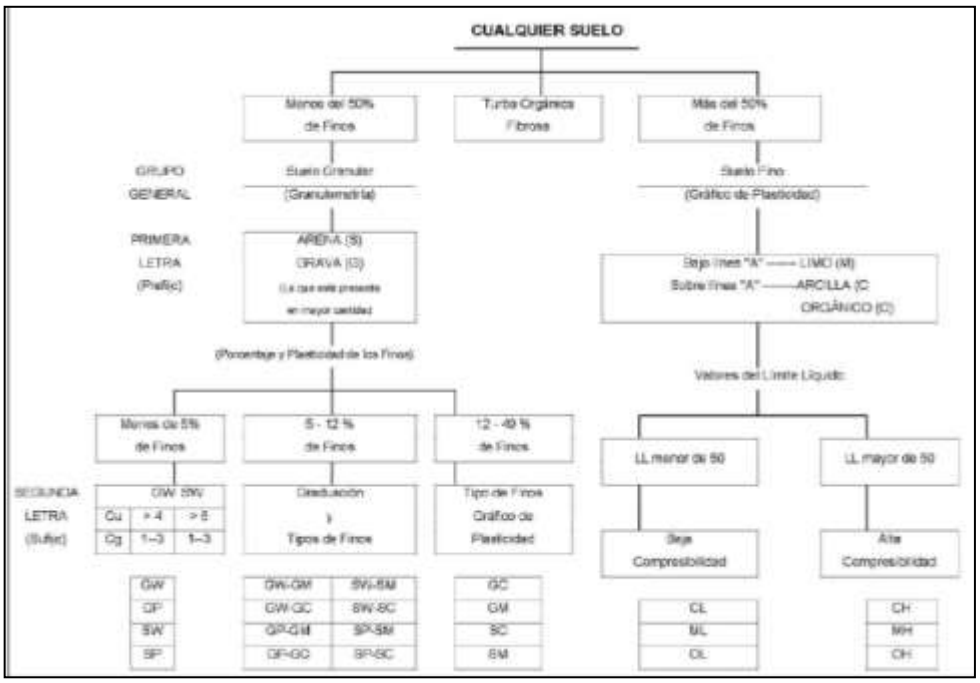
Gráfico de plasticidad para el sistema unificado de clasificación de los suelos



Nota. Gráfico de plasticidad para el sistema unificado de clasificación de los suelos SUCS. Obtenido de Joseph E. Bowles (2000). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil.* (p. 75.) McGraw-Hill.

Figura 7.

Procedimiento auxiliar para la clasificación de suelos en laboratorio SUCS.



Nota. Gráfico auxiliar para clasificar suelos según SUCS. Obtenido de Joseph E. Bowles (2000*). Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil.* (p. 78). McGraw-Hill.

2.5. Gravedad especifica

El valor de la gravedad específica es necesario para calcular la relación de vacíos de un suelo, es utilizada en el análisis hidrométrico, es útil para predecir el peso unitario del suelo y sirve para graficar la recta de saturación máxima en el ensayo de compactación Proctor. La gravedad específica de un suelo (Gs) se define como el peso unitario del material en cuestión dividido por el peso unitario del agua destilada a cuatro grados Celsius. Así, se consideran solamente los granos del suelo; Gs se calcula mediante la siguiente expresión:

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

Donde:

- γ_s = peso específico de los sólidos (g/cm^3)
- γ_w = peso específico del agua a 4°C (g/cm^3)

De esta forma, la gravedad específica puede ser calculada utilizando cualquier relación de peso de suelo (Ws) al peso del agua (Ww), siempre y cuando se consideren los mismos volúmenes.

Tabla 6.

Gravedad específica de los sólidos de algunos suelos

Tipo de Suelo	G_s
Arena	2.65 – 2.67
Arena limosa	2.67 – 2.70
Arcilla inorgánica	2.70 – 2.80
Yeso	2.60 – 2.75
Loes	2.65 – 2.73
Suelos con mica o hierro	2.75 – 3.00
Suelos orgánicos	Variable, puede ser inferior a 2.00

Nota. Tabla de gravedad específica para algunos suelos. Obtenido de Joseph E. Bowles (2000*). Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil.* (p. 65). McGraw-Hill.

2.6. Peso especifico

El peso específico relativo de una sustancia es la razón de su peso al peso de igual volumen de agua. El peso específico relativo de una masa de suelo o roca (que incluye aire, agua y sólidos) se denomina peso de la masa o peso específico aparente; se designa por G_m y se puede expresar con la siguiente fórmula.

$$G_m = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W}{V_{\gamma w}}$$

Donde:

- γ_s = peso específico de los sólidos, (g/cmˆ3)
- γ_w = peso específico del agua a 4 °C, (g/cmˆ3)
- W = peso del sólido, (g)
- $V_{\gamma w}$ = volumen del espécimen (cmˆ3)

El peso específico relativo de los sólidos γ_s (con la exclusión del aire y el agua), se expresa por:

$$\gamma_s = \frac{W}{V_{\gamma w}}$$

ste es el promedio ponderal de los minerales del suelo. El peso específico relativo de las rocas se puede expresar de dos maneras: incluyendo los poros aislados y cualquier gas o líquido que los lleve, o el peso específico relativo de la materia sólida solamente. Por conveniencia usual el efecto de los posos aislados en el peso específico de las rocas no se tomará en cuenta.

El peso específico relativo de una roca puede ser, por lo tanto, menor que el del promedio ponderal de los minerales que la constituyen. El peso específico relativo es una razón adimensional, al igual que la gravedad específica y tiene el mismo valor en el Sistema Internacional, que en el Sistema Inglés. El peso específico relativo y el peso específico son numéricamente iguales en el sistema internacional y en el inglés.

El peso específico de piedra suelta de menos de 200 g puede determinarse pesándolas en la balanza de tres escalas. Usualmente se requiere el peso específico de las piedras con su contenido de humedad natural.

Figura 8.

Equipo para determinar el peso específico de una muestra de suelo

Nota. Ejemplo de equipo utilizado para determinar el peso específico de un suelo. Obtenido de Humbolt (2007). *Testing equipment for construction materials.*

2.7. Densidad del suelo

Para conocer este valor se utiliza mayormente el ensayo de densidad el suelo *in situ,* este se utiliza con el fin de conocer y controlar la compactación de terraplenes y capas de base, también se usa para determinar densidad *in situ* y porcentajes de contracción o hinchamiento de materiales. Los pesos unitarios pueden expresarse en las siguientes unidades: g/cmˆ3. Kg/mˆ3, lb/pieˆ3. Deben distinguirse dos tipos de pesos unitarios:

- Peso unitario húmedo o densidad húmeda (PUH): es el peso del material húmedo, *in situ,* por unidad de volumen.

- Peso unitario seco o densidad seca (PUS): es el peso del material seco (secar en horno a 105 °C o 110 °C) por unidad de volumen, en el sitio. Este se compara con el valor máximo obtenido en la prueba de compactación (Proctor) para obtener el porcentaje de compactación final.

2.8. Propiedades de los suelos compactados

Mediante la aplicación de energía mecánica se reducen los vacíos que se encuentran con aire en la masa de suelo para aumentar su peso unitario, de esta forma se logra un aumento en la resistencia, en la rigidez, una mejora en la estabilidad volumétrica y una disminución de la permeabilidad del suelo.

2.8.1. Permeabilidad hidráulica del suelo

Propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire, mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración que presente. La permeabilidad del suelo suele medirse en función de la velocidad del flujo de agua a través de

éste durante un período determinado. Generalmente se expresa como un coeficiente de permeabilidad en metros por segundo (m/s) o en centímetros por segundo (cm/s).

2.8.1.1. Agua en el suelo

El suelo como se observa a través del estudio de la Mecánica de Suelos, es un material con arreglo variable de sus partículas que dejan entre ellas una serie de poros conectados unos con otros para formar una compleja red de canales de diferentes magnitudes que se comunican tanto con la superficie del terreno como con las fisuras y grietas de la masa del mismo; de aquí que el agua que cae sobre el suelo parte escurre y parte se infiltra por acción de la gravedad hasta estratos impermeables más profundos, formando la llamada capa freática. El límite superior de este manto acuoso se llama nivel freático.

Al agua que pasa por los poros a través del suelo se le conoce como agua gravitacional y aquella que se encuentra por debajo del nivel freático se llama agua freática. Cuando se suspende el movimiento del agua gravitacional a través del suelo, parte del agua se queda retenida en los poros y sobre la superficie de las partículas debido a las fuerzas de tensión superficial y de absorción. Esta agua, que no puede ser drenada directamente, recibe el nombre de agua retenida.

Figura 9.

Estado del agua en el suelo

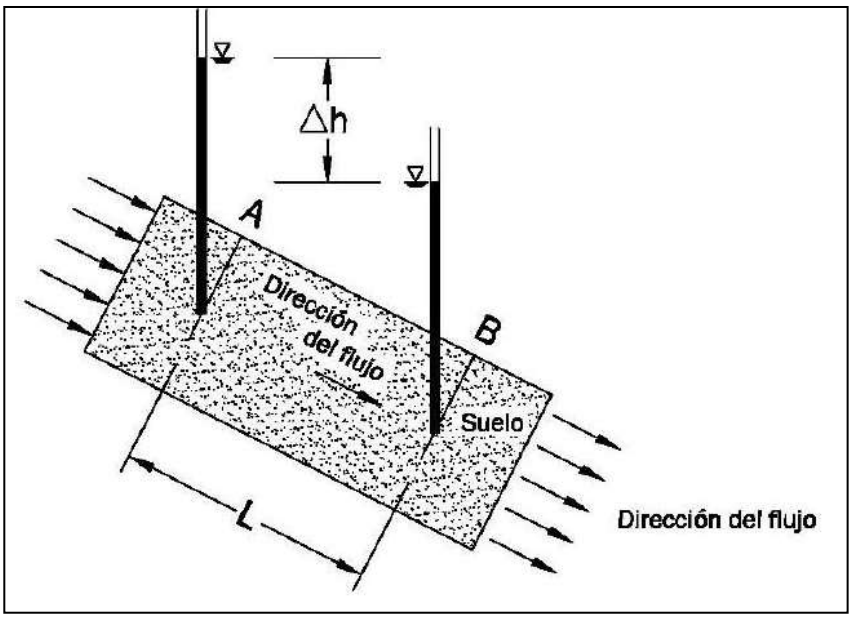
Nota. Gráfico de tipo de estado del Agua en el suelo. Obtenido de Crespo (1990). *Mecánica de suelos y cimentaciones.*

2.8.1.2. Agua freática

Los poros del suelo que se encuentran por debajo del nivel freático se encuentran completamente llenos de agua y se consideran que cualquier movimiento de esta a través del suelo está gobernado por la Ley de *Darcy*, descubierta experimentalmente en 1856. La cual indica que la intensidad de filtración por unidad de área (velocidad de flujo) es directamente proporcional al gradiente hidráulico, esto indica que, dentro del campo de aplicabilidad de la ley de *Darcy,* el flujo en el suelo es laminar. La ley de *Darcy* en resumen dice: para una muestra de suelo de área transversal A y longitud L, confinada en un tubo, se somete a una carga hidráulica h. El agua fluye a través de la muestra, midiéndose la cantidad de agua (cm3) que pasa en el tiempo t.

Figura 10.

Ley de Darcy



Nota. Gráfico para donde se explica la ley de Darcy. Obtenido de Braja M. Das (1999). *Principios de ingeniería de cimentaciones.*

En la práctica, la medida de la constante de permeabilidad se hace por medio de permeámetros, los cuales pueden ser de nivel constante o de nivel variable. Los de nivel constante se usan generalmente para medio la permeabilidad de los materiales granulares y los de nivel variable preferentemente para materiales finos arcillosos o limo-arcillosos.

2.8.1.3. Agua gravitacional

En el movimiento del agua gravitacional influyen poderosamente tanto la porosidad del suelo como sus características estructurales; sin embargo, al movimiento de esta agua no se le puede aplicar la ley de *Darcy* debido a la

presencia de aire en los poros. Cuando esta agua pueda llegar a afectar a las cimentaciones, se instalan drenes adecuados para captarla y alejarla.

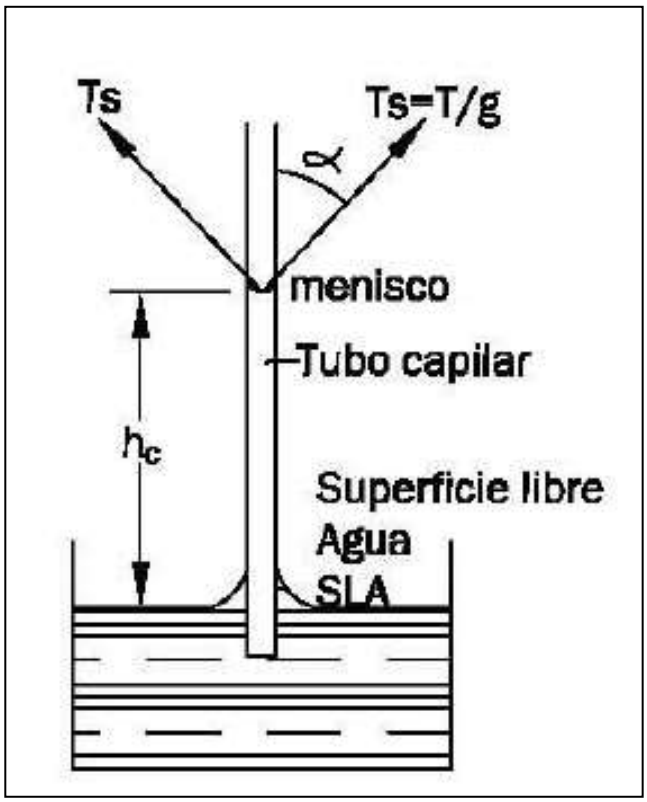
2.8.1.4. Agua retenida

En la figura 14, se presenta el agua retenida compuesta por agua retenida en fase líquida y agua retenida en fase de vapor. Solamente se tratará de agua retenida en fase líquida, la cual se sabe que está formada por agua combinada químicamente, por el agua adherida y por el agua de capilaridad. El agua químicamente combinada desde el punto de vista de la ingeniería se considera como parte integrante de los sólidos del suelo, ya que forma parte de la estructura cristalina de los minerales del mismo y es una cantidad muy pequeña. Esta agua o se puede eliminar del suelo si este se seca hasta 110 °C, de ahí la práctica de secar las muestras entre 105 °C y 110°C.

El agua adherida es aquella que adquiere el suelo del aire que lo rodea. Así, si un suelo es secado al horno a peso constante y se deja expuesto al aire mientras se enfría, dicho suelo absorberá agua de la humedad del aire. Esta agua del suelo y la cantidad de ella que mismo pueda adquirir depende también del área superficial de las partículas. El agua de capilaridad es aquella que se adhiere en los poros del suelo de tal modo que al principio el extremo superior del tubo coincida con la superficie del agua y se comienza a levantar el tubo, se podrá observar que el menisco se va haciendo más curvo a medida que se vaya levantando el tubo, alcanzando su máxima curvatura cuando se tenga el valor máximo de la tensión superficial desarrollada.

Figura 11.

Altura de ascensión capilar para agua retenida



Nota. Gráfico que muestra el cálculo de la altura del ascenso capilar en el agua retenida. Obtenido de Crespo (1990). *Mecánica de suelos y cimentaciones.*

2.8.2. Coeficiente de permeabilidad

El coeficiente de permeabilidad es una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso. Existen dos métodos generales de laboratorio para determinar directamente el coeficiente de permeabilidad de un suelo. Estos son los llamados métodos de cabeza constante y el método de la cabeza variable; ambos métodos se basan en la ley de *Darcy.*

2.9. Compresibilidad

Es el grado en que una masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga. Es mínima en los suelos de textura gruesa, que tienen las partículas en contacto. Aumenta a medida que crece la proporción de partículas pequeñas y llega al máximo en los suelos de grano fino que contienen materia orgánica.

Las gravas y las arenas son prácticamente incompresibles, si se comprime una masa húmeda de estos materiales no se produce ningún cambio significativo en su volumen. Las arcillas son compresibles, si se comprime una masa húmeda de arcilla, la humedad y el aire pueden ser expelidos lo que trae como resultado una reducción de volumen que no se recupera inmediatamente cuando se elimina la carga.

Los suelos de grano fino que contienen por lo menos 50% de limo + arcilla, pueden clasificarse con arreglo a tres clases de compresibilidad sobre la base de su límite líquido, estas clases se pueden ver en la Tabla 5.

Tabla 7.

Compresibilidad según su límite líquido

Tipos de compresibilidad	
Compresibilidad baja	LL < 30
Compresibilidad media	30 < LL < 50
Compresibilidad alta	LL > 50

Nota: Tabla de compresibilidad según el límite líquido. Obtenido de Laderas (2010). *Consistencia del suelo - Límites de Atterberg.*

2.10. Resistencia al corte

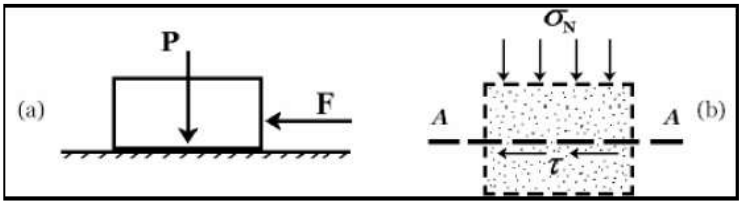
Se denomina resistencia al corte de un suelo a la tensión de corte o fractura en el plano de corte y en el momento de la falla. Se debe entender la naturaleza de la resistencia al corte para analizar los problemas de capacidad de carga, estabilidad de taludes y presiones laterales sobre estructuras de contención de tierra.

Indica la Resistencia relativa de un suelo a los corrimientos de tierra bajo una carga. La resistencia máxima al corte se da en los suelos compuestos de grava limpia y disminuye a medida que aumentan las partículas finas. Es mínima en suelos orgánicos de grano fino.

Los primeros estudios sobre la resistencia al corte en los suelos fueron efectuados por el ingeniero francés C.A. Coulomb (1736 – 1806), quien hizo una primera aproximación al problema ya tribuyó este fenómeno a la fricción producida entre las partículas de suelo como una extensión del concepto de la mecánica. Su teoría de falla establece que el material falla cuando el esfuerzo cortante actuante en un plano alcanza un valor límite máximo.

Figura 12.

Esfuerzo cortante actuando en un elemento de suelo



(a) Modelo de fricción. (b) Solicitación de corte en un elemento de suelo

Nota. Esfuerzo cortante actuando en elementos de suelo. Obtenido de M. Das (1999). *Principios de ingeniería de cimentaciones.*

Generalizando, se tiene, que dada una masa de suelo y un plano potencial de falla AA´ (Figura 11 -b), el esfuerzo de corte que puede resistir la masa de suelo por unidad de área es proporcional al valor de σ (presión normal en dicho plano). De este modo se obtiene que $\tau = \sigma \tan \emptyset$. La constante de proporcionalidad $\tan \emptyset$, fue definida por *Coulomb* en términos de un ángulo al que denominó ángulo de fricción interna.

Analizando la ecuación se deduce que para $\sigma = 0$ es $\tau = 0$. Pero *Coulomb* observó que existían materiales que sin presiones normales aplicadas sobre el plano de corte presentaban una cierta resistencia a la fractura. Para estos suelos consideró una nueva constante a la que denominó cohesión $\tau = C$. Como en general, los suelos presentan un comportamiento mixto, *Coulomb* determinó que la resistencia de los suelos debía expresarse como la suma de ambos comportamientos: la resistencia debida a la fricción interna y la resistencia debida a la cohesión. Así estableció lo que hoy se denomina Ley de *Coulomb:*

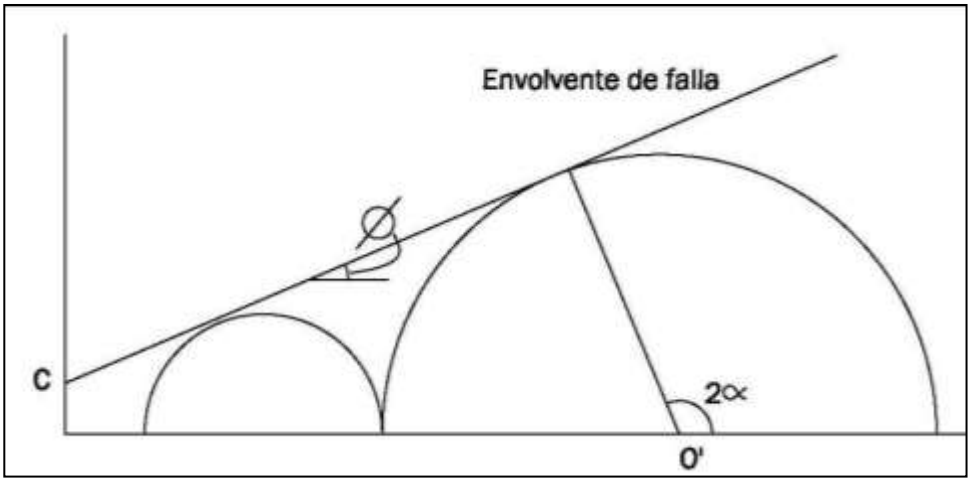
$$\tau = C + \sigma \tan \emptyset$$

Posteriormente, *Mohr* (1900) presentó una teoría sobre la rotura de los materiales en la que afirma que un material falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante y no sólo cuando uno de ellos se maximiza. Su criterio establece que la falla por corte sucede a lo largo de la superficie donde la relación τ/σ alcance un cierto valor máximo. En la actualidad se emplea el criterio de falla *Mohr-Coulom,* con una envolvente de falla curva Figura 16. Para la mayoría de los problemas que se abordan en Mecánica de Suelos, en el rango de tensiones de trabajo, pueda simularse a una recta.

Se considera que la falla se produce por la solicitación de corte y se acepta que esta depende del esfuerzo normal actuante en el plano de falla.

Figura 13.

Envolvente de falla



Nota. Gráfico de envolvente de falla. Obtenido de Braja M. Das (1999). *Principios de ingeniería de cimentaciones.*

En 1936, *Terzaghi* enunció el principio de presiones totales, neutras y efectivas, expresando que "todos los efectos tangibles provocados por un cambio de presión, tales como la compresión, distorsión angular y cambios en la resistencia al corte, se deben exclusivamente a los cambios de las presiones efectivas". Sobre la base de este enunciado se estableció que en las ecuaciones de la ley de *Coulomb* debería sustituirse la presión normal total por la presión intergranular denominada generalmente σ', ya que esta última es la que gobierna el comportamiento de la resistencia al corte de los suelos.

De esta manera la ecuación se generalizó como:

$$\tau = C + (\sigma - \mu) \tan \emptyset$$

2.11. Comportamiento de los suelos compactados

Una vez definido un procedimiento de compactación y una energía del mismo, se comprueba que la densidad alcanzada por el suelo varía con la humedad, de manera que se encuentra, en general, una densidad máxima u óptima para una humedad inferior a la de saturación. El estado de compactación queda así definido por dos variables de estado: la densidad seca y la húmeda. Algunos de los beneficios que tiene la compactación en un suelo son:

- Aumento de capacidad soporte de cargas: debido a que los vacíos producen debilidad del suelo e incapacidad para soportar cargas pesadas. Estando apretadas todas las partículas, el suelo puede soportar cargas mayores debido a que las partículas mismas soportan mejor.

- Impide asentamientos del suelo: si la estructura se construye en el suelo firme sin compactar o mal compactado, el suelo sufre de asentamientos, que dan lugar a que la estructura se deforme. Donde el asentamiento es más profundo en un lado o en una esquina, por lo que se producen grietas o derrumbe total.

- Reduce el escurrimiento del agua: un suelo compactado reduce la penetración de agua. El agua fluye y el drenaje puede entonces regularse.

- Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo: si hay vacíos, el agua puede penetrar en el suelo y llenar estos vacíos. El resultado sería el esponjamiento del suelo durante la estación de lluvias y contracción de este durante la estación seca.

- Impide los daños de las heladas: el agua se expande y aumenta el volumen al congelarse. Esta acción a menudo causa que el pavimento se hinche, y a la vez, las paredes y losas del piso se agrieten. La compactación reduce estas cavidades de agua en el suelo.

En la práctica, el resto de las propiedades de interés del suelo compactado (rigidez, respuesta frente a cambios de humedad, resistencia al esfuerzo cortante) quedarían esencialmente determinadas por estos dos valores que se consiguen durante la compactación.

3. PROCTOR MODIFICADO

3.1. Alcance

Este método describe el procedimiento para la determinación de la relación entre el contenido de humedad y la densidad de los suelos compactados en un molde de tamaño dado, con un pisón de 4.54 kg (10 lb), que cae de una altura de 457 mm (18 pulg).

Este método de ensayo se aplica únicamente a los suelos que tienen 30% o menos por peso de partículas retenidas en el tamiz de 19mm

Existen cuatro procedimientos alternativos para este ensayo:

- Método A: con un molde de 101.60 mm (4 pulgadas) de diámetro y material pasante del tamiz de 4,75 mm (No.4). Compactar en 3 o 5 capas con 25 golpes en cada una.

- Método B: con un molde de 152.40 mm (6 pulgadas) de diámetro y material pasante del tamiz de 4,75 mm (No.4). Compactar en 3 o 5 capas con 56 golpes en cada una.

- Método C: con un molde de 101.60 mm (4 pulgadas) de diámetro y material pasante del tamiz de 19.0 mm (3/4 pulgadas). Compactar en 3 o 5 capas con 25 golpes en cada una.

- Método D: con un molde de 152.40 mm (6 pulgadas) de diámetro y material pasante del tamiz de 19.0 mm (3/4 pulgadas). Compactar en 3 o 5 capas con 56 golpes en cada una.

3.2. Equipo

- Moldes: serán cilíndricos de paredes sólidas hechos de metal. Con un collar ajustable aproximadamente de 60 mm (2 pulgadas) de altura.

- Pisón de Metal: cara plana circular de 2 pulgadas de diámetro y una masa de 10.00 lb, con una altura de caída libre de 18 pulgadas.

- Tamices: dependiendo el método se utilizará el tamiz No.4 o el tamiz de 3/4 pulgadas.

- Balanza: de 20 kg de capacidad y aproximación de 1 gr.

- Horno: termostáticamente controlado capaz de mantener una temperatura de 100 °C para el secado de las muestras.

- Tarros metálicos: para determinación de la humedad.

- Bandeja Metálica: para homogeneizar la mezcla de suelo.

- Equipos varios: espátulas, cucharon para mezclar, rodillo, regla de 12 pulgadas de acero.

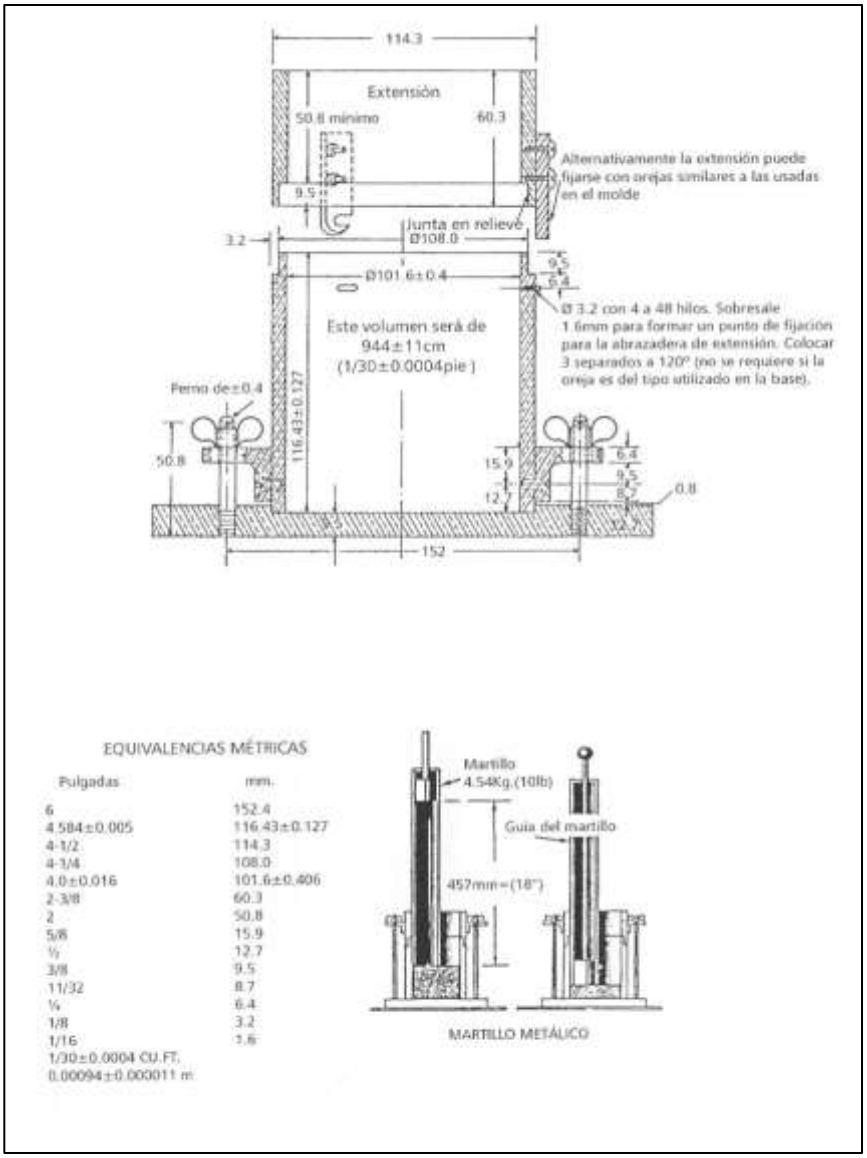
Figura 14.

Equipo de compactación para Proctor

Nota. Ejemplo de equipo utilizado para realizar el ensayo Proctor Modificado. Obtenido de Notas y Apuntes (2011). *Diferencia entre Proctor Estándar y Modificado* (https://ingcivil-notasapuntes.blogspot.com/search?q=proctor+estandar+y+modificado), consultado el 07 de julio de 2023. De dominio público.

Figura 15.

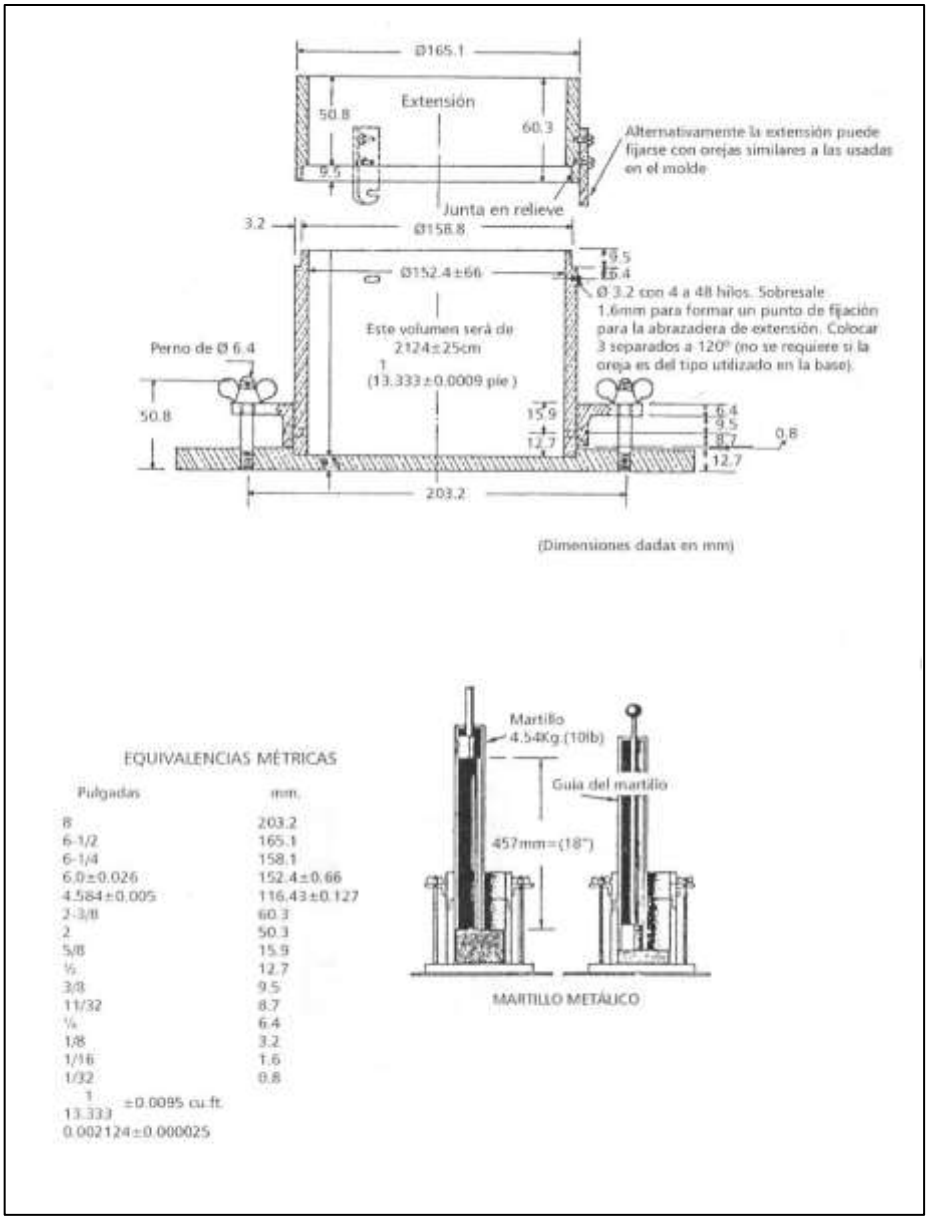
Molde cilíndrico de 101.66 mm (4.0”) para ensayos de suelos



Nota. Detalles de molde de 4” de diámetro a utilizar para ensayos de Proctor Modificado. Obtenido de Facultad de Minas (1999). *Ensayo de compactación Proctor Modificado*

Figura 16.

Molde cilíndrico de 152.4 mm (5.0”) para ensayos de suelos



Nota. Detalles de molde de 5” de diámetro a utilizar para ensayos de Proctor Modificado. Obtenido de Facultad de Minas (1999). *Ensayo de compactación Proctor Modificado*

3.3. Muestra

La masa de muestra requerida para los métodos A y B es aproximadamente de 16 kg (35 lb) y para los métodos C y D es aproximadamente 29 kg (65 lb) de suelo seco, en consecuencia, la muestra de campo debe tener una masa húmeda de por lo menos 23 kg (50 lb) y 45 kg (100 lb) respectivamente.

Se debe de determinar el porcentaje de material retenido en los tamices 4.75mm (#4), 9.5mm (3/8") o 19mm (3/4"), para seleccionar uno de los métodos.

3.4. Preparación del equipo

Seleccionar el molde de compactación adecuado según sea el método que se realizará. Determinar y registrar nuestra masa con precisión de 1g. Ensamblar el molde, la base y el collar de extensión. Verificar el alineamiento de la pared interior del molde y el collar de extensión, ajustar si es necesario.

Verificar que el martillo se encuentre en buenas condiciones de trabajo y que no existan partes sueltas o desgastadas. Se debe de realizar cualquier reparación o ajuste que sea necesario, si se hacen ajustes o reparaciones el martillo debe de ser calibrado nuevamente.

3.5. Calibración

Calibrar el equipo antes del uso inicial, después de las reparaciones o de cualquier evento que pueda afectar los resultados del ensayo, esto se debe realizar en intervalos que no excedan los mil ensayos o anualmente. Esta calibración debe seguir la norma ISO/IEC 17025, *Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración*

- Los equipos y aparatos que se deben calibrar son:

    - Balanza
    - Moldes
    - Pisón o martillo manual
    - Pisón o martillo mecánico

3.6. Procedimiento

Se debe tomar una muestra para contenido de humedad 24 horas antes del ensayo, para que sea posible conocer razonablemente el contenido de humedad inicial. El siguiente procedimiento es para realizar una prueba de compactación tipo A.

- Se debe secar la muestra al aire o en un horno a 60 °C, una muestra representativa que contenga aproximadamente 50 lb de material.

- Se toman tres kilogramos (peso nominal) de suelo, pulverizado suficientemente para que pase a través del tamiz No.4

- Se mezcla la cantidad de agua que sea necesaria para hacer el incremento de humedad, amasando a fondo la muestra para formar una mezcla uniformemente húmeda (deshacer todos los grumos)

Nota: Se debe procurar no hacer esta mezcla inicial demasiado húmeda. La experiencia indica que esta mezcla inicial debe ser aproximada al primer punto de la curva de compactación.

- Dividir la mezcla húmeda en cuatro o cinco porciones iguales aproximadamente.

- Pesar el molde de compactación en la balanza, sin el collarín. Luego de pesado unir el collarín y colocar el molde sobre un apoyo firme.

- Colocar una porción de la mezcla húmeda en el molde, nivelando la superficie con la mano con el martillo de compactación.

- El martillo de compactación se colocó en el molde y se eleva luego sobre el mando hasta que el pisón alcanza la parte superior de la guía, entonces se suelta, permitiendo que este caiga libremente sobre la muestra, sin someterlo a ningún impulso adicional con la mano (debe ser en caída libre)

- Se repite el proceso anterior, hasta cubrir sistemáticamente la superficie entera de la muestra, hasta completar las cinco capas de 25 golpes cada una.

Nota: Cada capa de compactación debe ser de una pulgada aproximadamente y la muestra compactada entera, debe extenderse ½ pulgada dentro del anillo de extensión como mínimo. El peso de la muestra necesaria para este objeto se determina por tanteo y variará con los diferentes suelos.

1. Se retira el anillo y con la regla de 12 pulgadas, se recorta la muestra hasta enrasar los bordes del molde de compactación. Comprobando la nivelación con la regla.

2. Se retira todo el exceso de material que haya quedado fuera del molde de modo que esté limpio. Se pesa en la balanza.

- Este peso se llama Peso Bruto Húmedo (PBH); se retira todo el suelo contenido en el molde y se toman dos muestras para contenido de humedad (de 10 a 25 g cada una) del centro del material extraído del molde. Para los cálculos se usará el valor medio, si resulta un dato muy alejado a lo esperado, habrá que descartar uno de los dos.

- Se añade 60 cm^3 para suelos arenosos a 120 cm^3 para limos arenosos y arcillas de agua se mezcla a fondo la siguiente porción de material. Se procura que es espaciamiento del dos al tres por ciento.

- Se repiten los pasos del tres al once en cada punto del ensayo, hasta que es peso de la muestra compactada muestra un decremento en relación con el aumento del contenido de humedad, entonces se dice que el "Proctor" ya bajó y se suspende la prueba.

3. Colocar en el horno las muestras para determinar el contenido de humedad, luego de esperar al menos 1 día se procede a encontrar el promedio real de contenido de humedad de cada ensayo.

Nota: Este mismo procedimiento se debe de realizar para los métodos B, C y D; con la variante del molde, el tamiz para el material pasante y la cantidad de golpes en cada capa. Estas variantes dependerán del tipo de método que se utilizará.

Tabla 8.

Parámetros para realizar el ensayo de compactación

Característica	Siglas	Denominación	Fórmula
Peso Bruto Húmedo	PBH	Peso del material + Peso del cilindro	PM + Tara (kg)
Peso Neto Húmedo	PNH	Peso bruto húmedo – Peso del cilindro	PBH – Tara (kg)
Peso Unitario Húmedo	PUH	Peso por unidad de volumen húmedo	(PNH x 2.205)x30 (lb/pie^3)
Peso Unitario Seco	PUS	Peso por unidad de volumen seco	(PUH/(%H+100))x100 (lb/pie^3)
Peso Bruto Húmedo	Pbh	Peso de la muestra húmeda + tarro	Pmh + tarro (g)
Peso Bruto Seco	Pbs	Peso de la muestra seca + tarro (después del horno)	Pms + tarro (g)
Diferencia	Dif	Peso bruto húmedo – peso bruto seco	Pbs – tarro (g)
Peso Neto Seco	Pns	Peso bruto seco – tarro	Pbs – tarro (g)
Porcentaje de Humedad	%H	Relación de humedad sobre peso del suelo seco	(Dif/pns) x 100 (%)
Porcentaje de Humedad Promedio	$\%H_{prom}$	Promedio	($\%H_1$+$\%H_2$)/2 (%)

El factor 30 se debe a que la capacidad volumétrica del cilindro de compactación es de 1/30 pie^3 (molde de 4 pulg de diámetro).

Nota. Clasificación de parámetros a utilizar para realizar ensayo de Proctor Modificado. Obtenido de Hernández (1999) *Características y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición.*

3.7. Ejemplo ilustrativo

Se debe realizar un ensayo de compactación tipo A (Proctor Modificado) a una muestra de suelo para un proyecto de introducción de carretera. La muestra fue extraída de forma alterada de un banco de material ubicado en la Aldea Sinaca, Sanarate, El Progreso. El suelo tiene la siguiente descripción: Arena limosa con grava color café oscuro.

Luego de realizar el procedimiento de la prueba, se procede a calcular los parámetros descritos en la Tabla I. Debido a que el cálculo es el mismo para cualquier punto, sólo se tomará de referencia el primer punto y los siguientes se determinan de la misma manera, como se muestra en la Tabla 7.

$$PBH = 5.24\ KG$$

$$Tara = 4.50\ kg$$

$$PNH = 5.24\ kg - 4.51\ kg = 0.99\ kg$$

$$PUH\ = \frac{(0.99\ kg)(2.205\frac{lb}{kg})}{1/30 pie^3} = 65.49\ lb/pie^3$$

Tarro A1

$Dif. = 95.5 - 87.9 = 7.6\ g$

$pns = 87.9 - 24.6 = 63.3\ g$

$\%H = (7.6/63.3)x100 = 12.00$

Tarro A2

$Dif. = 94.6 - 86.9 = 7.7\ g$

$pns = 86.9 - 24.5 = 62.4\ g$

$\%H = (7.7/62.4)x100 = 12.34\%$

$$\%H_{prom} = \frac{12.00\% + 12.34\%}{2} = 12.17$$

$$PUS = \frac{65.49 lb/pie^3}{100 + 12.17}\ x\ 100 = \ 58.4 lb/pie^3$$

Tabla 9.

Datos del ensayo de compactación, para obtener el peso unitario seco máximo y humedad óptima.

	1	2	3	4
PBH	5.25 kg	5.85	5.87	5.43
TARA	4.50 kg	4.50	4.50	4.50
PNH	0.99 kg	1.70	1.62	1.18
PUH	65.49 lb/pieˆ3	112.46	107.16	78.06

Continuación tabla 9.

TARRO	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D1	D2
Pbh	95.9	94.6	91.8	92.5	95.5	103.6	103.6	115.1
Pbs	87.9	86.9	80.9	78.8	82.0	86.2	86.2	96.2
Tara	24.6	24.5	24.5	20.4	24.8	21.3	21.3	24.7
Dif.	7.6	7.7	10.9	13.7	13.5	17.4	17.4	18.9
Pns	63.3	62.4	56.4	58.4	57.2	64.9	64.9	71.5
%H	12.00	12.34	19.48	23.46	23.60	26.81	26.81	26.43

Porcentaje H prom	12.17	19.4	23.5	26.6
PUS	58.4	94.2	86.8	61.6

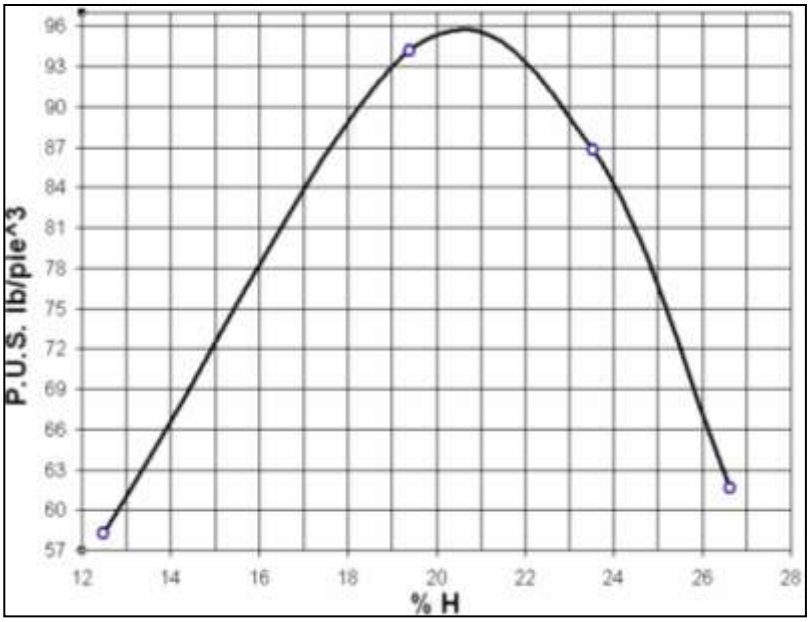
PUS Máx	1538	kg/mˆ3
	96	lb/pieˆ3
Humedad Óptima	20.5	%

Nota. Datos para realizar ejemplo de ensayo Proctor Modificado. Obtenido de Hernández (1999) *Características y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición.*

Se debe realizar un gráfico, se puede realizar en una hoja de Excel o en un papel milimétrico, colocando en el eje de las abscisas el contenido de humedad promedio (porcentaje-% Hprom) y en el eje de las ordenadas la densidad seca (PUS). Se traza una curva que pase por los puntos descritos anteriormente (de forma parabólica); para determinar la cresta u el punto que relaciona el PUS máximo y el %H Óptimo.

Figura 17.

Curva Peso Unitario Seco Vs. Humedad Óptima



Nota. Ejemplo de curva obtenida en el ensayo Proctor Modificado. Obtenido de Hernández (1999) *Características y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición.*

3.8. Informe

El informe debe de tener la siguiente información:

- Procedimiento que se utilizó (A, B, C o D)
- Método de preparación utilizado (húmedo o seco)
- El contenido de agua al ingresar al laboratorio
- Porcentaje de Humedad promedio
- Peso unitario seco máximo
- Descripción de martillo o pisón
- Datos de los tamices aplicables para la determinación del procedimiento seguido

- Descripción o clasificación del material utilizado en el ensayo, de acuerdo a norma correspondiente
- Origen del material usado en el ensayo, por ejemplo, proyecto, localización, profundidad y similares.
- Curvas de compactación mostrando los puntos utilizados para establecer la curva y la curva al 100 % de saturación, el punto de peso unitario seco máximo y el contenido de agua óptimo.

4. PROTOCOLO

4.1. Banco de material

El material de referencia a utilizar es de un material tipo granular el cual tiene un 50 % de material selecto y un 50 % de grava triturada, el material selecto tiene procedencia de un banco de material a cielo abierto ubicado en el municipio de Chinautla de la Ciudad de Guatemala, y la grava triturada fue adquirida en una empresa cuya ubicación es en la Diagonal 30, boulevard San Rafael de la zona 18 de la Ciudad de Guatemala.

Figura 18.

Recolección del material de referencia en el banco de materiales

Nota. Recolección de material de base triturada para ensayos de laboratorios. Elaboración propia.

4.2. Material de referencia

Los materiales de referencia se utilizan en todas las etapas del proceso de medición, incluyendo la validación del método, la calibración y el control de calidad, También se utilizan en las comparaciones inter-laboratorios para la validación del método y para la evaluación de la aptitud del laboratorio. La norma internacional que describe los requisitos generales para todos los productos que se utilizarán como un material de referencia es la ISO 17034.

Un material de referencia debe ser suficientemente homogéneo y estable con respecto a una o más propiedades específicas, el cual ha sido establecido como adecuado para el uso previsto en un proceso de medición.

Para nuestro material de referencia se deberá realizar una previa homogenización del material y realizarse 10 veces la prueba de Proctor Modificado para que sea válida la comparación.

4.2.1. Material

El material que se utilizará como referencia será de tipo granular, teniendo en el mismo 50 % de material tipo selecto y 50 % de grava triturada, este material se aplica para asfaltos principalmente, también para bases o sub-bases, formando una capa combinada de agregado grueso y fino, que cumple con el cometido de distribuir y transmitir uniformemente las cargas originadas por el tránsito circulante.

4.2.2. Homogenización del suelo

En el libro “Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes” elaborado por la Dirección General de caminos de la República de Guatemala se especifica que el material para la capa de sub-base o base triturada debe llenar los requisitos de graduación que están determinador por los métodos AASHTO T27 y AASHTO T11, de los que se estipulan en la Tabla 8.

Tabla 10.

Tipos de graduación para material de sub-base y base triturada.

Estándar mm	Tamiz No.	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T27)		
		TIPO "A" 50 mm (2") máximo	TIPO "B" 38.1 mm (1 1/2") máximo	TIPO "C" 25 mm (1") máximo
50,0	2"	100		
38,1	1 1/2"	-	100	
25,0	1"	65-90	70-100	100
19,0	3/4"	-	60-90	70-100
9,5	3/8"	-	45-75	-
4,8	No. 4	25-60	30-60	35-65
2,00	No. 10	-	20-50	-
0,425	No. 40	10-30	10-30	12-30
0,075	No. 200	3-12	5-15	5-15

Nota. Tipos de graduación para material de base y sub-base triturada. Obtenido de Dirección general de caminos (2001). *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.*

La curva de graduación del material de sub-base o base trituradas, debe de ser uniforme y de preferencia paralela a la curva de valores medidos en los tamices especificados, no aceptándose cambios bruscos entre dos tamices y adyacentes.

El porcentaje que pasa el tamiz 0.075mm (No.200), debe ser menor que la mitad que pasa por el tamiz 0.425mm (No.40).

4.2.3. Curva de Diseño

Se seleccionó un porcentaje de diseño de peso que pasa por los tamices para poder realizar una curva de diseño específica para nuestro material de referencia, la cual se especifica en la Tabla 9.

Tabla 11.

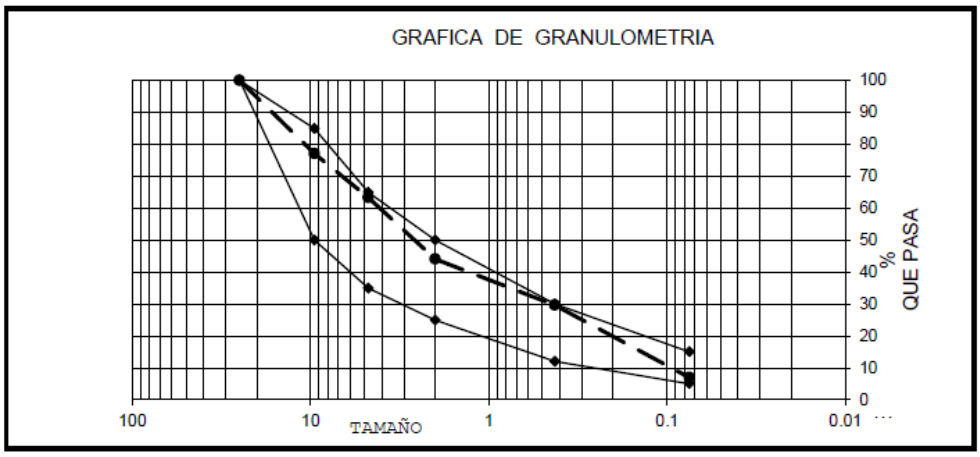
Porcentajes para curva de diseño.

		TIPO "C" 25mm (1") máximo Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)		
Estándar mm	Tamiz	Máximos	Mínimos	**Diseño**
25,00	1"	100 %	100 %	100 %
19,00	3/4"	70 %	100 %	100 %
9,50	3/8"	70 %	100 %	77,10 %
4,75	No.4	35 %	65 %	63,30 %
2,00	No.10	35 %	65 %	44,10 %
0,425	No.40	12 %	30 %	29,60 %
0,075	No.200	5 %	15 %	7,00 %

Nota. Porcentaje utilizados para elaboración de curva de diseño utilizando una graduación Tipo "C". Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Figura 19.

Curva de diseño



Nota. Gráfica de curva de diseño realizada a partir de porcentajes seleccionados. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Después de realizar la curva de diseño y verificar que se cumpla con los lineamientos que se indican en el libro de “Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puestes” se procedió a obtener el porcentaje de retenido en cada tamiz para luego obtenerlos en gramos como se ve en la Tabla 12. Se está tomando una muestra de 21 000 gramos.

Tabla 12.

Porcentajes en peso para curva de diseño.

Estándar mm	Tamiz	Diseño	% Retenido para Muestra	Retenido en gramos
25,00	1"	**100 %**	0 %	
19,00	3/4"	**100 %**	0 %	0,0
9,50	3/8”	**77,10 %**	22,90 %	4 809,0
4,75	No.4	**63,30 %**	13,80 %	2 898,0
2,0	No.10	**44,10 %**	19,20 %	4 032,0
0,425	No.40	**29,60 %**	14,50 %	3 045,0
0,075	No.200	**7,0 %**	22,60 %	4 746,0
Fondo			7,0 %	1 4700
			100 %	**21 000,0**

Nota. Pesos de materiales según porcentaje utilizado para curva de diseño. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

4.2.4. Manipulación de la muestra

Después de realizar la curva de diseño y verificar que se cumpla con los lineamientos que se indican en el libro de “Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puestes” se procedió a obtener el porcentaje de retenido en cada tamiz para luego obtenerlos en gramos como se ve en la Tabla 9. Se está tomando una muestra de 21,000 gramos.

Figura 20.

Embalaje de muestras Proctor Modificado para distintos laboratorios

Nota. Fotografía de embalaje de muestras previo a envío a distintos laboratorios. Elaboración propia.

Se deben de preparar 4 especímenes para su muestreo, utilizando aproximadamente 5,0 kg por muestra, estas deberán de tener un contenido de agua de modo que este dentro del contenido de agua óptimo estimado.

Luego se procederá a realizar la tara de los equipos y herramientas y posteriormente se armarán los moldes que serán utilizados, luego proceder a realizar el ensayo para obtener como mínimo 4 puntos.

Para finalizar se realizarán los cálculos necesarios para poder obtener las características del suelo ensayado y así determinar el peso unitario seco máximo y la humedad óptima. Posterior se realizará la curva de compactación.

Se deberán enviar los datos obtenidos a más tardar 15 días a la entrega de la muestra, evidenciando con una memoria fotográfica la realización del ensayo.

4.2.5. Id de laboratorios participantes

Cada uno de los laboratorios participantes se encuentran identificados con un Id asignado por el autor y conocido únicamente por el laboratorio a quien corresponde. Esto con el afán de no perjudicar o beneficiar a ninguno con los resultados finales y que los mismos sean únicamente para tener una referencia externa de los resultados que están obteniendo en los análisis que realizan constantemente cada laboratorio, útil ante clientes y procesos de acreditación o gestión de calidad.

Serán 8 laboratorios participantes y serán identificados con una letra mayúscula comprendidas de la “A” a la “H”, representados en los resultados finales como “Laboratorio A”, “Laboratorio B”, “Laboratorio C”, “Laboratorio D”, “Laboratorio E”, “Laboratorio F”, “Laboratorio G”, “Laboratorio H”.

4.3. Metodología de Análisis

Para el procesamiento de datos, se utilizarán fórmulas de estadísticas tradicionales para el cálculo de la media, mediana, moda, varianza y desviación estándar. Para la identificación de la presencia de datos aberrantes se utilizará la fórmula de Grubb en cada grupo de datos.

4.3.1. Media

La media es un valor promedio de un conjunto de datos numéricos, calculada como la suma del conjunto de valores dividida entre el número total de valores. Este valor servirá para realizar la comparación con el valor Z de todos los laboratorios participantes. La media se expresa como:

$$\bar{X} = \frac{\sum_1^n x_i}{n}$$

Donde:

- $\bar{X}$ = media de la variable X
- x_i = observación número i de la variable X, i puede tomar valores entre 1 y n
- n = número de observaciones

4.3.2. Mediana

La mediana es un valor estadístico de posición central que parte de la distribución en dos, es decir, deja la misma cantidad de valores a un lado que a otro. Para calcularla es importante que todos los datos estén ordenados de mayor a menor, o al contrario de menor a mayor.

La fórmula de la mediana no brindará el valor como tal, lo que nos dará es la posición en la que está dentro del conjunto de datos. La mediana se calcula mediante la siguiente fórmula.

$$Mediana = \frac{(n+1)}{2}$$

Donde:

- n = número total de datos u observaciones

4.3.3. Moda

La moda es el valor que más se repite en una muestra estadística, en nuestro caso en los valores de todos los laboratorios participantes. No tiene una fórmula como tal, pero se realiza con la suma de las repeticiones de cada valor.

4.3.4. Varianza

La varianza es una medida de dispersión que representa la variabilidad de una serie de datos respecto a su media. Formalmente se calcula como la suma de los residuos al cuadrado divididos entre el total de observaciones. Se debe decir que la varianza en estadística es muy importante, ya que, aunque se trata de una medida sencilla, la misma puede aportar mucha información sobre una variable en concreto.

La unidad de medida de la varianza será siempre la unidad de medida correspondiente a los datos, pero elevada al cuadrado. La varianza siempre es mayor o igual que cero elevarse los residuos al cuadrado es matemáticamente imposible que la varianza sea negativa. La varianza se expresa como:

$$Var\ (X) = \frac{\sum_1^n (x_i - \bar{X})^{\ 2}}{n}$$

Donde:

- X = variable sobre la que se pretende calcular la varianza
- x_i = observación número i de la variable X, i puede tomar valores entre 1 y n
- n = número de observaciones
- $\bar{X}$ = media de la variable X

4.3.5. Desviación estándar

La desviación estándar es la medida de dispersión más común que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media, mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos. La desviación estándar se puede utilizar para establecer un valor de referencia para estimar la variación general de un proceso. La desviación estándar se expresa como:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{X})^2}{n}}$$

También se puede expresar como:

$$\sigma = \sqrt{varianza}$$

Donde:

- σ = desviación estándar

4.3.6. Valor Z

El valor Z es un factor basado en el desempeño del laboratorio en un ensayo, comparado con el valor de la media (excluyendo valores atípicos) de todos los laboratorios participantes. Se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$Z = \frac{X - \bar{X}}{\sigma}$$

Donde:

- X = variable sobre la que se pretende calcular, valor de laboratorio
- $\bar{X}$ = media de la variable X de todos los laboratorios
- σ = desviación estándar de todos los laboratorios

El valor Z es dependiente de la dispersión de datos del grupo, por lo que esta es una variable que conforme mejora el grupo y se reduce la dispersión de datos se va convirtiendo más estricta.

Se debe interpretar de la siguiente forma:

Tabla 13.

Interpretación de la variable Z.

Si Z ≤ 1	Excelente
Si Z ≤ 2	Satisfactorio
Si 2 < Z < 3	Cuestionable
Si Z ≥ 3	Insatisfactorio

Nota. Forma de interpretación para valor Z. Obtenido de Unidad de Ensayos de Aptitud UDEA (2017). Informe de resultados, Intercomparación de resultados en laboratorios para agregado grueso para concreto.

5. RESULTADOS

5.1. Valor de referencia

Para obtener los valores de referencia del material, antes de entregar las muestras a los laboratorios, se seleccionaron 8 muestras al azar y se realizaron las pruebas para comprobar la homogeneidad del lote, posterior se obtuvieron los valores de referencia a utilizar.

Tabla 14.

Muestra referencia

Muestra de referencia		
No.	Densidad Lb/pie^3	Humedad %
3	138,35	5,90
1	139,10	6,25
2	139,20	6,05
7	139,60	6,35
5	139,90	5,95
6	140,00	6,35
8	140,00	6,40
4	140,60	7,50

*Nota. Datos obtenidos a ensayar muestra de referencia, valor de referencia a utilizar en el proceso de comparación. E*laboración propia, realizado con Microsoft Excel

Tabla 15.

Valores de densidad seca optima

Densidad (lb/pie^3)	
Función	Dato
Max	140,60
Min	138,35
Media	139,59
Mediana	139,75
Moda	140,00
Desviación estándar	0,695
No. De Datos	8

Nota. Valores obtenidos al utilizar estadística para la densidad seca óptima de referencia. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Figura 21.

Grafica de valores de densidad seca optima

Nota. Gráfica de valores de referencia para densidad seca óptima. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla 16.

Valores de porcentaje de humedad óptima

Humedad (%)	
Función	Dato
Max	7,50
Min	5,90
Media	6,34
Mediana	6,30
Moda	6,35
Desviación estándar	0,505
No. De datos	8

Nota. Valores obtenidos al utilizar estadística para el porcentaje de humedad óptima. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Figura 22.

Gráfica de valores para porcentaje de humedad óptima

Nota. Gráfica de valores de referencia para porcentaje de humedad óptima. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

5.2. Resultados de laboratorios participantes

A continuación, se presentan los resultados de laboratorios.

Tabla 17.

Resultados Laboratorios

RESULTADOS DE LABORATORIOS		
No. Laboratorio	Densidad Lb/pie^3	Humedad %
Laboratorio A	132.60	5.80
Laboratorio B	139.84	5.30
Laboratorio C	136.22	6.50
Laboratorio D	137.40	7.00
Laboratorio E	138.60	7.40
Laboratorio F	139.30	7.70
Laboratorio G	138.35	5.90
Laboratorio H	139.90	5.95

Nota. Tabulación de resultados obtenidos por los distintos laboratorios participantes. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

5.2.1. Densidad seca óptima laboratorios participantes

Luego de tabular los resultados de los laboratorios participantes, se procede a realizar la estadística específicamente para los valores de densidad seca óptima, de esta forma se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 18 y se realiza la gráfica de la figura 23.

Tabla 18.

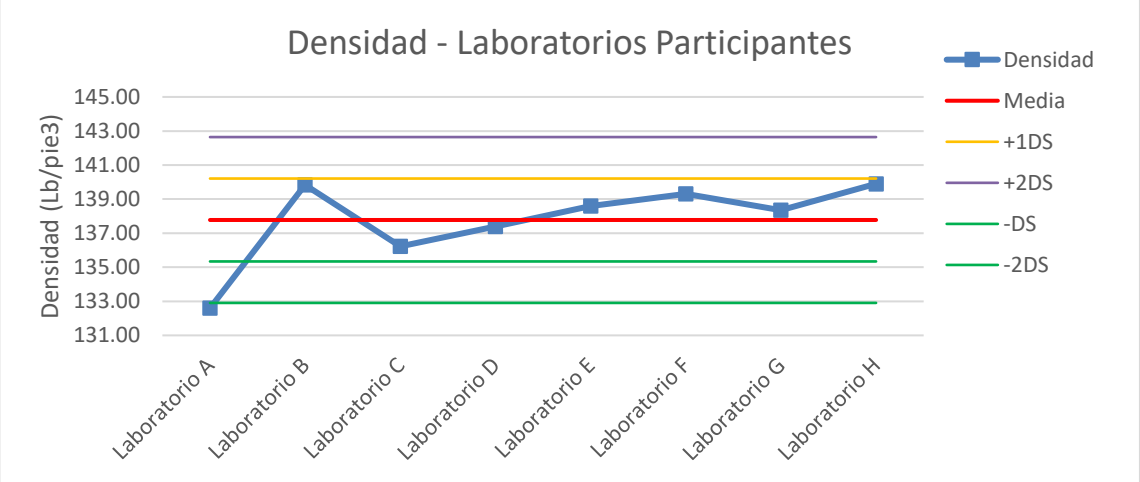
Valores de densidad seca optima laboratorios participantes

Densidad (lb/pie3)	
Función	Dato
Max	139.90
Min	132.60
Media	137.78
Mediana	138.48
Moda	140.00
Desviación estándar	2.435
No. De Datos	8

Nota. Valores obtenidos al utilizar estadística para la densidad seca óptima de los distintos laboratorios participantes. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Figura 23.

Grafica de valores de densidad seca optima laboratorios participantes



Nota. Gráfica de valores de densidad seca óptima de los distintos laboratorios participantes. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

5.2.2. Humedad óptima de laboratorios participantes

Luego de tabular los resultados de los laboratorios participantes, se procede a realizar la estadística específicamente para los valores de porcentaje de humedad óptima, de esta forma se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 19 y se realiza la gráfica de la figura 24.

Tabla 19.

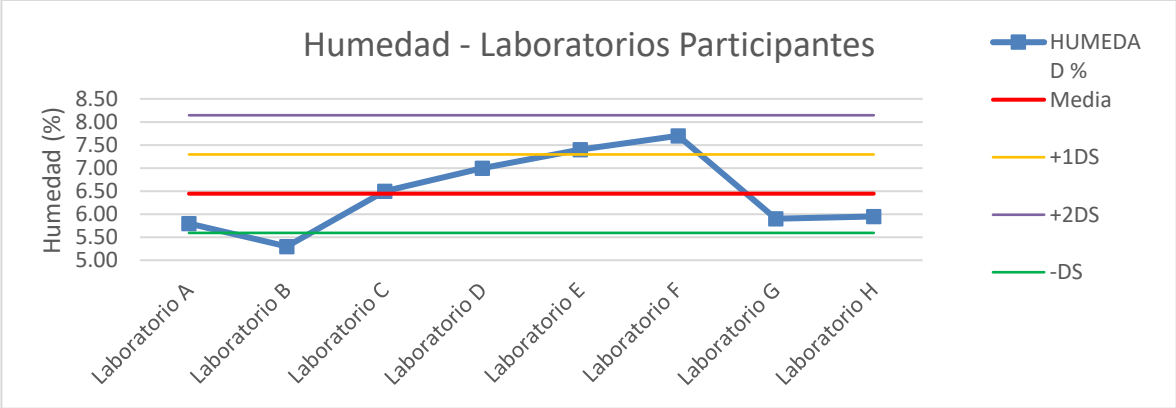
Valores de porcentaje de humedad óptima de laboratorios participantes

Humedad (%)	
Función	Dato
Max	7.70
Min	5.30
Media	6.44
Mediana	6.23
Moda	6.35
Desviación estándar	0.851
No. De datos	8

Nota. Valores obtenidos al utilizar estadística para el porcentaje de humedad óptima de los distintos laboratorios participantes. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 24.

Gráfica de valores de densidad seca óptima de laboratorios participantes



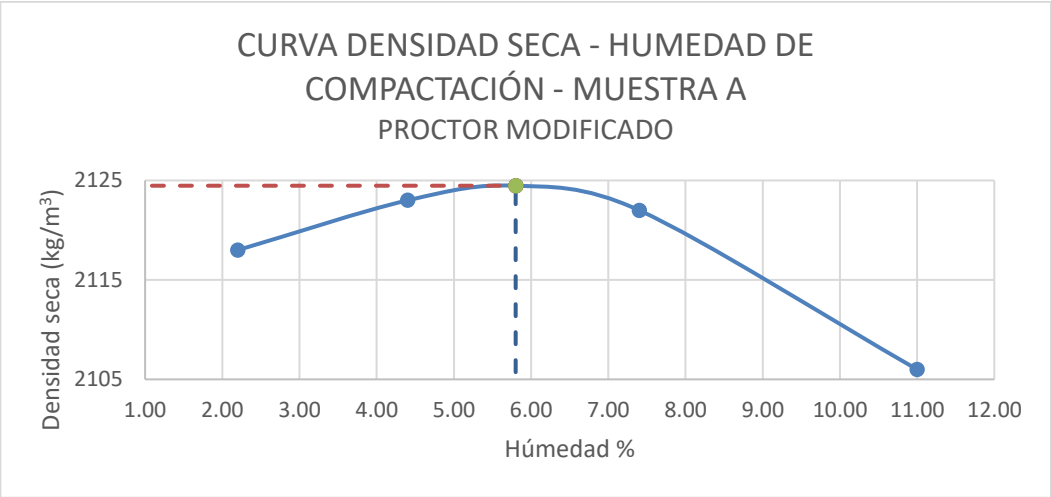
Nota. Gráfica de valores de densidad seca óptima de los distintos laboratorios participantes. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

5.3. Curva Peso Unitario Seco Vs. Humedad Óptima de los laboratorios

Al obtener los resultados de los distintos laboratorios, se procede a graficar la curva de densidad para cada uno, las mismas se copian de los datos presentados por cada laboratorio. Se unifica de esta forma la presentación del gráfico con la finalidad de mantener oculta la identidad de cada laboratorio.

Figura 25.

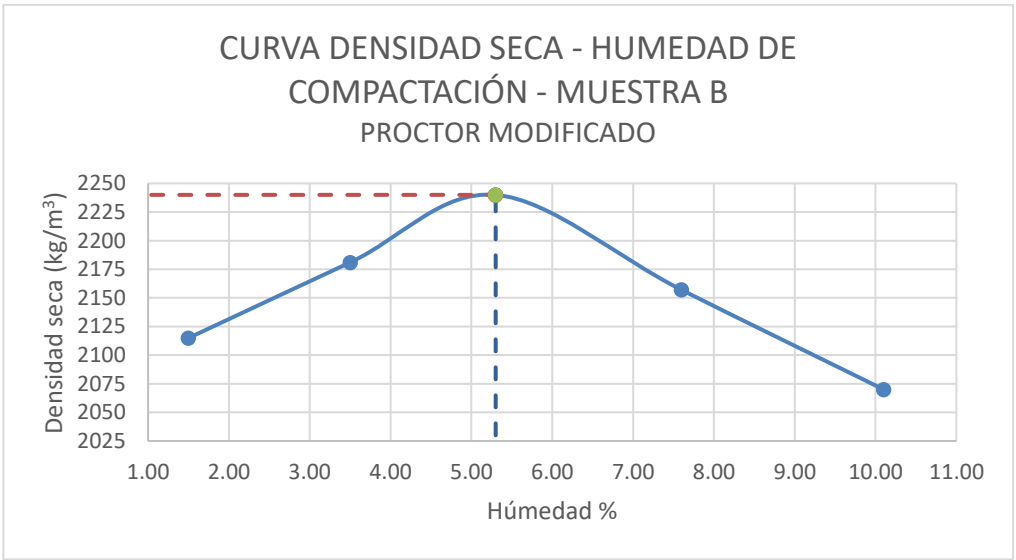
Gráfica Laboratorio A



Nota. Curva de compactación con los resultados del laboratorio A. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 26.

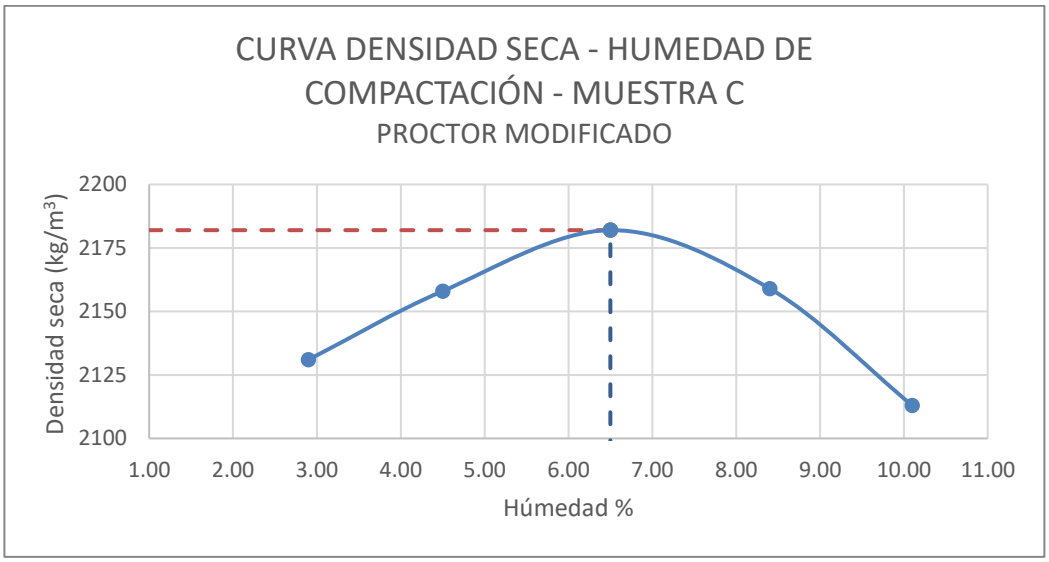
Gráfica Laboratorio B



Nota. Curva de compactación con los resultados del laboratorio B. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 27.

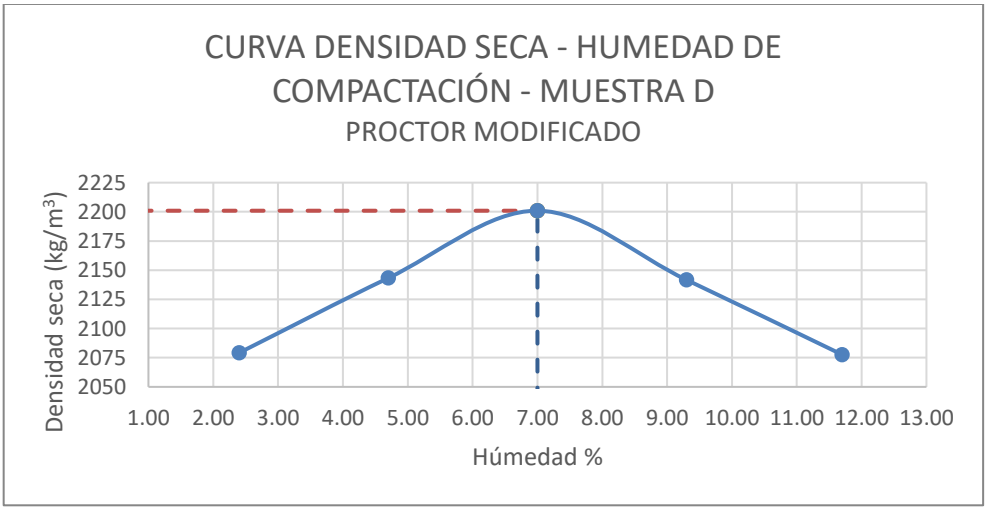
Gráfica Laboratorio C



Nota. Curva de compactación con los resultados del laboratorio C. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 28.

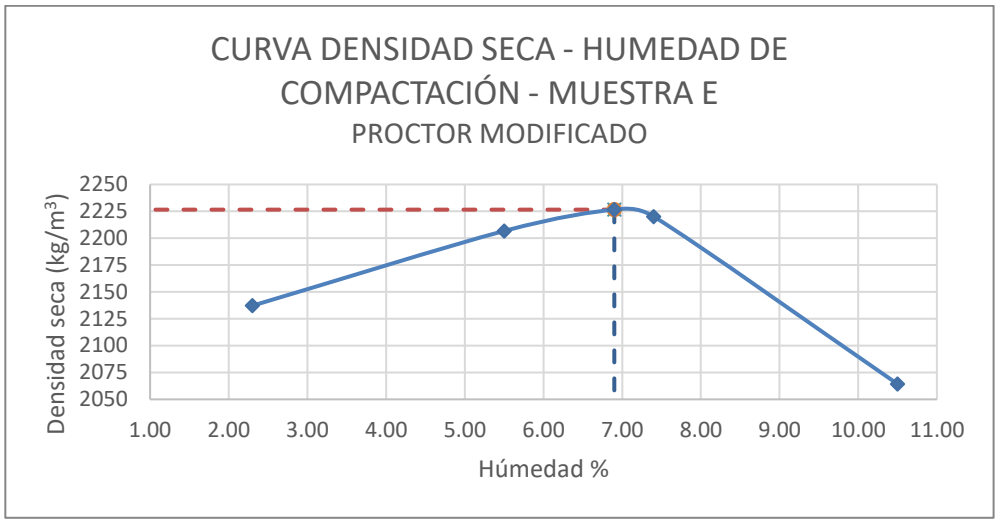
Gráfica Laboratorio D



Nota. Curva de compactación con los resultados del laboratorio D. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 29.

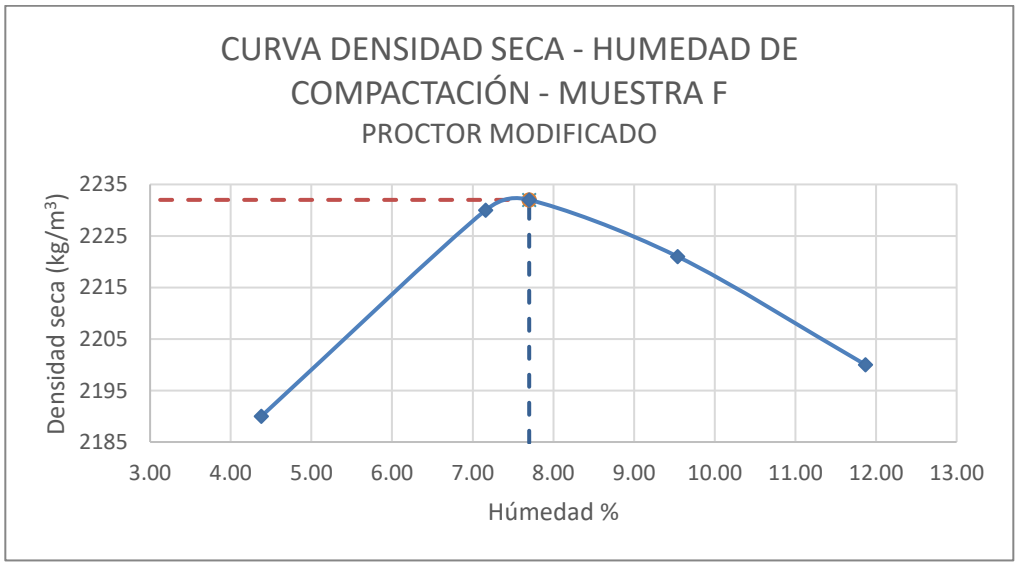
Gráfica Laboratorio E



Nota. Curva de compactación con los resultados del laboratorio E. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 30.

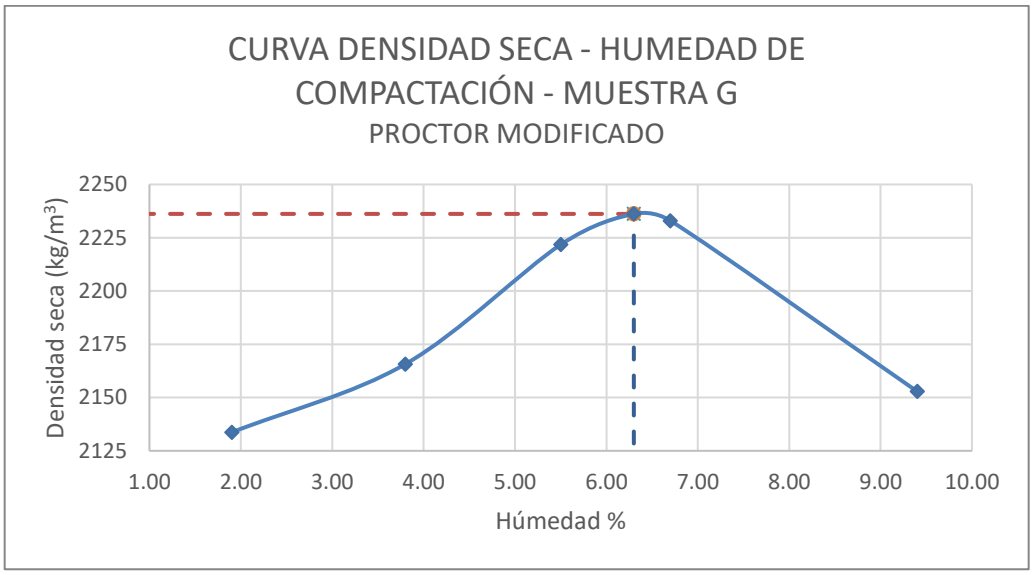
Gráfica Laboratorio F



Nota. Curva de compactación con los resultados del laboratorio B. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 31.

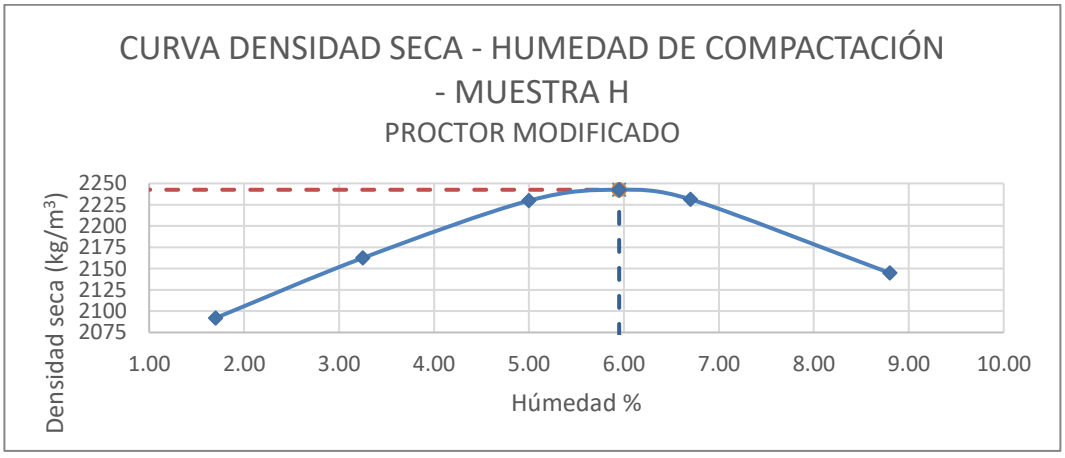
Gráfica Laboratorio G



Nota. Curva de compactación con los resultados del laboratorio G. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 32.

Gráfica Laboratorio H



Nota. Curva de compactación con los resultados del laboratorio H. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

5.4. Análisis de resultados

Al obtener los datos de estadística de los distintos laboratorios participantes y teniendo los valores de referencia que fueron calculados previamente, se puede proceder a realizar una comparativa para el análisis de resultados para poder definir si los valores que presentan los laboratorios son: excelentes, satisfactorios, cuestionables o insatisfactorios.

5.4.1. Densidad seca óptima

Tabla 20.

Densidad seca óptima

Densidad (lb/pie3)		
Función	Dato	Referencia
Max	139.90	
Min	132.60	
Media	137.78	139.59
Mediana	138.48	
Moda	140.00	
Desviación estándar	2.435	0.695
No. De Datos	8	

Nota. Valores obtenidos al utilizar estadística y valor de referencia para la densidad seca óptima. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Tabla 21.

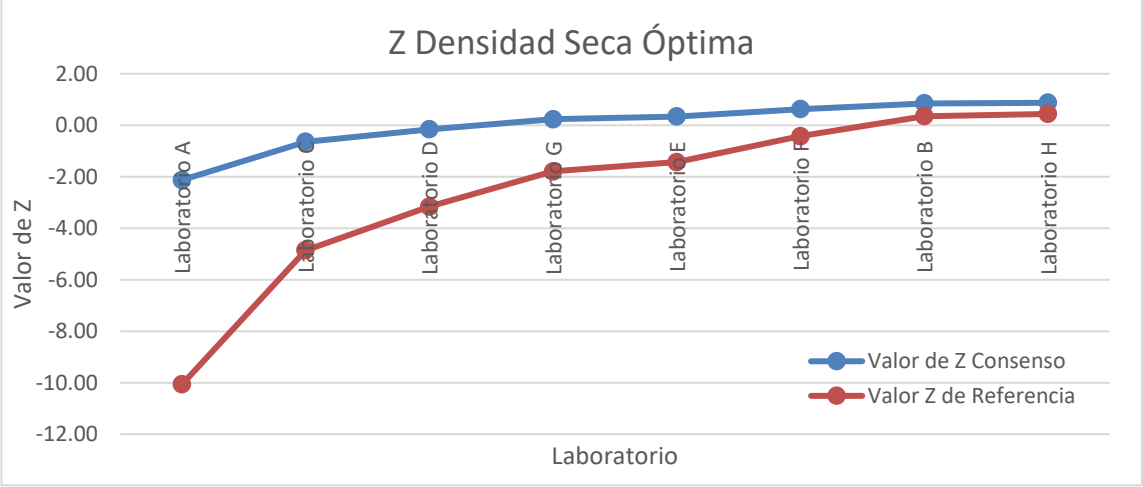
Valores Z Densidad seca óptima

Densidad Seca Óptima			
No. Laboratorio	Densidad Lb/pie3	Valor de Z Consenso	Valor de Z Referencia
Laboratorio A	132.60	-2.13	-10.07
Laboratorio C	136.22	-0.64	-4.86
Laboratorio D	137.40	-0.16	-3.16
Laboratorio G	138.35	0.24	-1.79
Laboratorio E	138.60	0.34	-1.43
Laboratorio F	139.30	0.63	-0.42
Laboratorio B	139.84	0.85	0.35
Laboratorio H	139.90	0.87	0.44

Nota. Valores Z obtenidos para el consenso y comparados con la referencia. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Figura 33.

Valores de Z de grupo y del método para la densidad seca óptima



Nota. Gráfica de Valores Z obtenidos para el consenso y comparados con la referencia. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Para la elaboración de la Figura 33, se realizó la dispersión de datos utilizado la estadística del consenso y de la muestra de referencia. Se puede observar en esta figura las diferencias que existen entre laboratorios con la referencia, esta tendencia refleja los desempeños de cada laboratorio para la Densidad Seca Óptima de la muestra.

5.4.2. Porcentaje de Humedad

A continuación, se presenta el porcentaje de humedad.

Tabla 22.

Porcentaje de Humedad

Humedad (%)		
Función	Dato	Referencia
Max	7,70	
Min	5,00	
Media	6,33	6,34
Mediana	6,23	
Moda	6,35	
Desviación estándar	0.982	0,505
No. De datos	8	

Nota. Valores obtenidos al utilizar estadística y valor de referencia para el porcentaje de humedad. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Tabla 23.

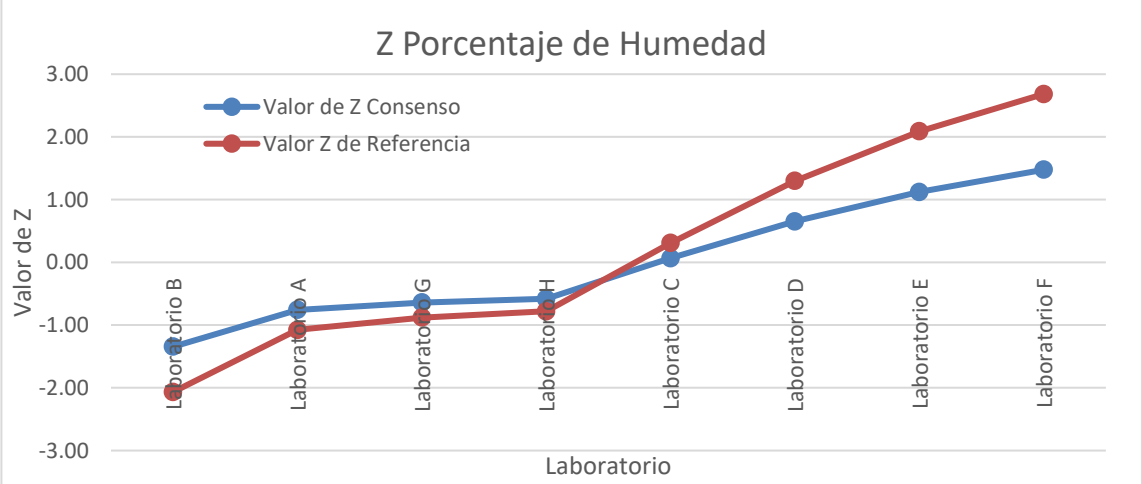
Valores Z Porcentaje de humedad

Porcentaje de Humedad			
No. Laboratorio	Humedad %	Valor de Z Consenso	Valor de Z Referencia
Laboratorio B	5.30	-1.34	-2.07
Laboratorio A	5.80	-0.76	-1.08
Laboratorio G	5.90	-0.64	-0.88
Laboratorio H	5.95	-0.58	-0.78
Laboratorio C	6.50	0.07	0.31
Laboratorio D	7.00	0.65	1.30
Laboratorio E	7.40	1.12	2.09
Laboratorio F	7.70	1.48	2.68

Nota. Valores Z obtenidos para el consenso y comparados con la referencia. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Figura 34.

Valores de Z de grupo y del método para el porcentaje de humedad



Nota. Gráfica de Valores Z obtenidos para el consenso y comparados con la referencia. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Para la elaboración de la Figura 34, se realizó la dispersión de datos utilizado la estadística del consenso y de la muestra de referencia. Se puede observar en esta figura las diferencias que existen entre laboratorios con la referencia, esta tendencia refleja los desempeños de cada laboratorio para los porcentajes de humedad de la muestra.

Tabla 24.

Análisis final de laboratorios

	Densidad Seca Óptima	Porcentaje de Humedad
Laboratorio A	**Insatisfactorio**	**Satisfactorio**
Laboratorio B	**Excelente**	**Cuestionable**
Laboratorio C	**Insatisfactorio**	**Excelente**
Laboratorio D	**Insatisfactorio**	**Satisfactorio**
Laboratorio E	**Satisfactorio**	**Cuestionable**
Laboratorio F	**Excelente**	**Cuestionable**
Laboratorio G	**Satisfactorio**	**Excelente**
Laboratorio H	**Excelente**	**Excelente**

Nota. Análisis final de resultados de laboratorios participantes en comparación con muestra de referencia según los valores Z. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

En este análisis final de laboratorios, se puede observar las diferencias del desempeño de cada laboratorio al hacer una comparación la referencia utilizada para la elaboración de esta investigación.

CONCLUSIONES

1. Se repartieron muestras a 8 distintos laboratorios, clasificándolos con las letras de la “A” a la “H” de los cuales se obtuvieron los resultados presentados en esta tesis. Todos estos laboratorios se encuentran dentro del perímetro de la Ciudad de Guatemala.

2. Las muestras de suelos proceden del mismo sitio y fueron distribuidas a los diferentes laboratorios de forma equitativa, sin favorecer o perjudicar a ningún laboratorio, por lo mismo en la presentación de resultados no se utilizaron los nombres reales se numeraron de forma arábiga.

3. Se analizó el ensayo Proctor Modificado según norma AASHTO T 180-19, este método de ensayo es propuesto para la determinación de la relación entre el contenido de humedad y la densidad del suelo cuando es compactado en un molde de tamaño mazo. A su vez, se verificó el protocolo asignado para la metodología utilizado en esta investigación.

4. Luego de que cada laboratorio presento sus resultados se observa que para los datos de densidad los laboratorios A, C y D presentan datos insatisfactorios, los laboratorios G y E datos satisfactorios y los laboratorios F, B y H datos excelentes. En el caso del porcentaje de humedad los laboratorios B, E y F presentan datos cuestionables, los laboratorios A y D presentan datos satisfactorios y los laboratorios G, H y C datos excelentes.

5. La verificación de la frecuencia de calibración de equipos, además, generar estrategias para mantener un equipo de laboratorio actualizado y en buen estado. De esta forma se puede lograr disminuir las desviaciones en resultados.

6. Los resultados dependen de la experiencia del laboratorista y la calibración del equipo utilizado en el ensayo por cada laboratorio, en este caso no fueron anotadas las mediciones ambientales.

7. Los laboratorios dedicados a los estudios de la Mecánica de Suelos, ubicado en la Ciudad de Guatemala, se encentran divididos en privados y centros superiores universitarios, como la Universidad de San Carlos, TEC Universidad Rafael Landívar y Soilab en la Universidad Mariano Gálvez. En el resto de la república predominan laboratorios privados. Estos laboratorios presentan resultados a las diferentes instituciones públicas y privadas por lo que deben, entregar resultados confiables para la ejecución de los distintos proyectos de carreteras o plataformas de compactación.

RECOMENDACIONES

1. Para mejorar los resultados en el ensayo de compactación Proctor el operario debe contar con la experiencia suficiente para considerar la humedad a colocar en la muestra y así mejorar el análisis en los resultados obtenidos.

2. El laboratorista o encargado de laboratorio, donde se realice el ensayo debe tomar las mediciones de clima y humedad ambiental, en el momento de su desarrollo, por medio de lecturas de temperatura y humedad relativa en el ambiente.

3. El personal del laboratorio debe verificar el estado del equipo de compactación cada vez que se utilice, y renovarlo cuando este ya no cumpla con las especificaciones de los códigos que rigen el ensayo, así como la calibración del resto del equipo, como las balanzas y hornos. Se deberá de calibrar y certificar según el manual de cada instrumento.

4. Se deberán de realizar pruebas con diferentes tipos de suelos, los mismos pueden ser, arcillosos o limosos, ya que las propiedades físicas y mecánicas son diferentes en estos tipos de suelos y manejarlos en laboratorio requiere de diferente criterio del laboratorista.

5. Realizar este tipo de comparaciones entre laboratorios para cualquier otro tipo de ensayo, para mantener un estándar de calidad.

6. A cada uno de los laboratorios, se le brindó un protocolo con el cual pudieron seguir los lineamientos para realizar los ensayos de Proctor Modificado.

REFERENCIAS

BERRY, Peter L., REID, David. (1993). *Mecánica de suelos*. Ediciones Colombia: McGraw-Hill.

BLÁZQUEZ BAÑON, Luis., BEVIÁ GARCÍA, José (2004). *Manual de carreteras, tomo 2, construcción y mantenimiento.* Editor Ortiz e Hijos, Contratistas de Obras, S.A.

BOWLES, Joseph E. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Ediciones* México: McGraw-Hill.

CRESPO VILLALAZ, Carlos (2008). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa.

García, Oliverio. (2012). *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial.* Colombia: ediciones de la U.

HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. (2008). *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición.* [Tesis de licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Archivo digital. biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_2861_C.pdf

APÉNDICES

FORMATO DE PROTOCOLO ENTREGADO A CADA LABORATORIO PARA REALIZAR EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO

Comparación de resultados de laboratorio para el Ensayo Proctor Modificado

En el evento se encuentran participando 8 laboratorios, todos se encuentran ubicados en la República de Guatemala, cada uno de los laboratorios se encuentra identificado con un Id de una letra de la “A” a la “H” conociendo la identidad del laboratorio únicamente el autor y el laboratorio a quien corresponde.

Los resultados del ensayo deberán de ser entregados como máximo 15 días después de haber sido entregada la muestra.

Material de Referencia

El material que se utilizará como referencia será de un 50% de material selecto con procedencia de un banco de material ubicado en Chinautla y un 50% de grava con procedencia de la trituradora La Roca ubicada en la zona 18, ambos de la Ciudad de Guatemala. Este material es homogéneo y estable con respecto a sus propiedades específicas y sigue los lineamientos de la norma ISO 17034 que habla sobre los requisitos generales para todos los productos que se utilizan como material de referencia.

Homogenización de la muestra

Para realizar la homogenización de la muestra se tomó del libro "Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes" elaborado por la Dirección General de caminos de la República de Guatemala, en el cual se especifica que para un material para la capa de sub-base o base triturada debe llenar los requisitos de graduación que están determinados por los métodos AASHTO T27 y AASHTO T11, los cuales se estipulan en la Tabla I.

Tabla 25.

Tipos de graduación para material de Sub-base y Base Triturada

Estándar mm	Tamiz N°	Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)		
		TIPO "A" 50 mm (2") máximo	TIPO "B" 38.1 mm (1 ½") máximo	TIPO "C" 25 mm (1") máximo
50.0	2"	100		
38.1	1 ½"	-	100	
25.0	1"	65-90	70-100	100
19.0	¾"	-	60-90	70-100
9.5	⅜"	-	45-75	-
4.75	N° 4	25-60	30-60	35-65
2.00	N° 10	-	20-50	-
0.425	N° 40	10-30	10-30	12-30
0.075	N° 200	3-12	5-15	5-15

Nota. Tipos de graduación para material de base y sub-base. Obtenido de Dirección general de caminos (2001). *Especificaciones generales para construcción de carreteras y puentes.* (p. 305-2).

Curva de diseño

Después de hacer una inspección visual al material se seleccionó el TIPO "C" de la tabla de graduación para material de sub-base y base triturada, se seleccionó un porcentaje de diseño de peso que pasa por los tamices para poder realizar una curva de diseño específica para nuestro material de referencia, la cual se especifica en la Tabla 2.

Tabla 26.

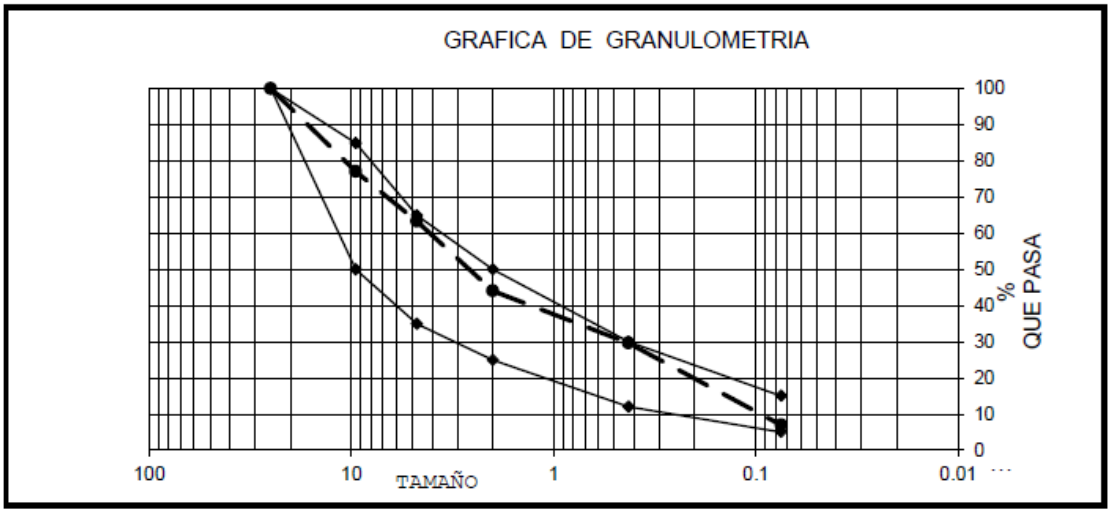
Diseño seleccionado para realizar curva

		TIPO "C" 25mm (1") máximo Porcentaje por peso que pasa un tamiz de abertura cuadrada (AASHTO T 27)		
Estándar mm	Tamiz	Máximos	Mínimos	**Diseño**
25.00	1"	100%	100%	**100%**
19.00	3/4"	70%	100%	**100%**
9.50	3/8"	70%	100%	**77.10%**
4.75	No.4	35%	65%	**63.30%**
2.00	No.10	35%	65%	**44.10%**
0.425	No.40	12%	30%	**29.60%**
0.075	No.200	5%	15%	**7.00%**

Nota. Porcentaje utilizados para elaboración de curva de diseño utilizando una graduación Tipo "C". Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Figura 35.

Curva de diseño



Nota. Gráfica de curva de diseño realizada a partir de porcentajes seleccionados. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel

Después de realizar la curva de diseño y verificar que cumpla con los lineamientos que se indican en el libro de “Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes” se procedió a obtener el porcentaje retenido en cada tamiz, para luego obtenerlos en gramos. Se está tomando una muestra de 21,000 gramos.

Tabla 27.

Peso retenido en los tamices

Estándar mm	Tamiz	Diseño	% Retenido para Muestra	Retenido en gramos
25.00	1"	**100%**	0%	
19.00	3/4"	**100%**	0%	0.0
9.50	3/8”	**77.10%**	22.90%	4809.0
4.75	No.4	**63.30%**	13.80%	2898.0
2.0	No.10	**44.10%**	19.20%	4032.0
0.425	No.40	**29.60%**	14.50%	3045.0
0.075	No.200	**7.0%**	22.60%	4746.0
Fondo			7.0%	1470.0
			100%	**21000.0**

Nota. Pesos de materiales según porcentaje utilizado para curva de diseño. Elaboración propia, realizado con Microsoft Excel.

Procedimiento para Manipulación de la muestra

Se entregará una muestra con un peso de 21,000 gramos, la cual se encuentra empaquetada dentro de un costal y el mismo dentro de una cubeta, esto con la finalidad de perder la menor cantidad de material en los traslados ni existan variaciones con la humedad.

Antes de iniciar con el ensayo se deberá de cerciorar que las balanzas, los moldes y el martillo se encuentren debidamente calibrados.

Se utilizará el Método C que detalla la norma AASHTO T180-19: *“Standard Method of test for Moisture – Density”.* Este método detalla la utilización de un

molde de 4 pulgadas (101.6 mm) de diámetro, el material deberá de pasar el tamiz 3/4" (19.00mm), se deberán de hacer 5 capas con 25 golpes por capa.

Se deberán preparar 4 especímenes para su muestreo, utilizando aproximadamente 5.0 kg por muestra, estás deberán de tener un contenido de agua de modo que este dentro del contenido de agua óptimo estimado.

Luego se procederá a realizar la tara de los equipos y herramientas y posteriormente se armarán los moldes que serán utilizados, luego proceder a realizar el ensayo para obtener como mínimo de 4 puntos.

Para finalizar se realizarán los cálculos necesarios para poder obtener las características del suelo ensayado y así determinar el peso unitario seco máximo y la humedad óptima. Posterior de realizará la curva de compactación.

Se deberán enviar los datos obtenidos a más tardar 15 días posterior a la entrega de la muestra, evidenciando con una memoria fotográfica la realización del ensayo.

Metodología de Análisis

Para el procesamiento de datos se utilizarán fórmulas de estadística tradicionales para el cálculo de la media, mediana, moda, varianza y desviación estándar. Para la identificación de datos aberrantes se utilizará la fórmula de Grubb en cada grupo de datos.

Para realizar una interpretación de datos estadísticos se calculará el valor “Z” que es un factor basado en el desempeño del laboratorio en un ensayo, comparado con el valor de la media (excluyendo los valores atípicos) de todos los laboratorios participantes. Se interpretará como se muestra en la Tabla IV.

Tabla 28.

Interpretación de la variable Z

Si Z ≤ 1	Excelente
Si Z ≤ 2	Satisfactorio
Si 2 < Z < 3	Cuestionable
Si Z ≥ 3	Insatisfactorio

Nota. Tabla para la interpretación de la variable Z. Obtenido de la Unidad de Ensayos de Aptitud. *Informe de resultados, Inter comparación de resultados en laboratorios para agregado grueso para concreto.* (p. 9).

Presentación de Resultados

Para la presentación de resultados de cada laboratorio se deberá de presentar, el formato de recolección de datos adjunto y una memoria fotográfica elaborando el ensayo. Toda esta información deberá ser enviada al correo comparacionproctor@gmail.com y cualquier duda que se tenga se podrá resolver vía correo electrónico o al número de teléfono +502 5517-7470 con Byron Melgar.