



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

**COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE
PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D
CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS**

Sergio Andrés Paz Barahona

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, mayo de 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE
PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D
CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

SERGIO ANDRÉS PAZ BARAHONA

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, MAYO DE 2022

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz Lorente
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Nicolás de Jesús Guzmán Sáenz
EXAMINADOR	Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza
EXAMINADOR	Ing. Milton Lenin Hernández González
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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 DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 25 de octubre de 2018.

Sergio Andrés Paz Barahona

Guatemala, 24 de marzo de 2022

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

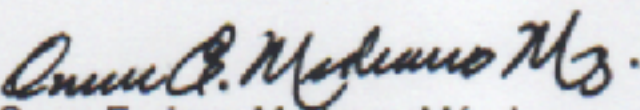
Ingeniero Montenegro Franco.

Le saludo cordialmente, el motivo de la presente es para informarle que el trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPIRÍCO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS", elaborado por el estudiante de ingeniería civil Sergio Andrés Paz Barahona, ha sido finalizado a satisfacción y revisado por mi persona.

Sin otro particular,

Atentamente

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Civil Omar Enrique Medrano Méndez
Colegiado 6842
Jefe de Sección Mecánica de Suelos
Profesor Titular 1

Omar Enrique Medrano Méndez
Ingeniero Civil
Colegiado No. 6842

Guatemala, 28 de marzo de 2,022

Ingeniero
Armando Fuentes Roca
Director Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Estimado Ingeniero Fuentes, Le informo que he revisado el trabajo de graduación **“COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS”**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil **Sergio Andrés Paz Barahona**, quién contó con la asesoría del Ing. Omar Enrique Medrano Méndez.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo, doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS



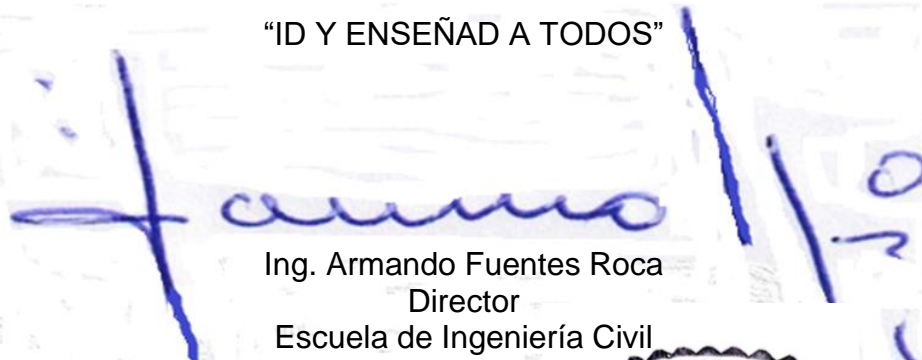
Ing. Civil Hugo Leonel Montenegro Franco
Jefe de área de materiales y construcciones civiles.




LNG.DIRECTOR.090.EIC.2022

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 y la aprobación del área de lingüística del trabajo de graduación titulado: **COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T 180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS**, presentado por: **Sergio Andrés Paz Barahona**, procedo con el Aval del mismo, ya que cumple con los requisitos normados por la Facultad de Ingeniería.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”



Ing. Armando Fuentes Roca
Director
Escuela de Ingeniería Civil



Guatemala, mayo de 2022



LNG.DECANATO.OI.298.2022

La Decana 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 DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS**, presentado por: **Sergio Andrés Paz Barahona**, después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANA
FACULTAD DE INGENIERÍA
★

Decana

Guatemala, mayo de 2022

AACE/gaoc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios

Por permitirme llegar a este punto de mi vida, por estar siempre en los momentos de dolor y alegría y por todo lo que me ha dado.

Mis padres

Elizabeth Barahona y Sergio Paz, por el amor que me tuvieron siempre y los consejos y enseñanzas que me dieron para ser un hombre de bien. En especial mi madre por todo el esfuerzo y sacrificio que hizo por mí durante gran parte de su vida.

Mi hermana

Pahola Paz, por ser una fuente de inspiración y ser la mejor hermana que alguien pueda pedir, además de su apoyo y amor incondicional.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi casa de estudios y permitirme culminar esta etapa de mi vida.
Facultad de Ingeniería	Por otorgarme todos los conocimientos que me permite ser un profesional y formarme como ingeniero civil.
Mi asesor	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez. Por su amistad, cátedras, consejos y colaboración en el presente trabajo.
Mis amigos	Karla Barrios, Ruth Sajché, Carlos Gamboa, Hugo Álvarez, Christopher Guerrero, Guadalupe Rivera, Douglas Castillo, Mónica Roquel, Manfredo Cancinos y todos mis amigos en general por el apoyo brindado durante toda mi carrera y hacer de la universidad la mejor experiencia de todas.
Familia Cortez Barahona	Por acogerme como parte de ellos, por su apoyo y cariño durante toda mi vida.
Familia Monroy Acevedo	Por el cariño que me brindaron siempre.

Familia Duarte Acevedo

Por el cariño que me brindaron siempre.

Arístides Flores

Por el gran apoyo que me dio durante toda mi carrera universitaria y su gran ayuda, sacrificios y esfuerzos que hizo para permitirme culminar con satisfacción esta etapa de mi vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Compactación en campo de suelos granulares.....	1
1.2. Influencia del tamaño de partículas	1
2. GENERALIDADES.....	3
2.1. Definición de suelo	3
2.2. Naturaleza y origen de los suelos.....	3
3. FUNDAMENTOS Y CONCEPTOS BÁSICOS.....	7
3.1. Principales tipos de suelo.....	7
3.1.1. Suelo originado de la degradación mecánica y química de las rocas.....	7
3.1.2. Suelo de origen orgánico.....	7
3.1.3. Diferentes tipos de suelo	8
3.1.3.1. Arenas y gravas.....	8
3.1.3.2. Limos inorgánicos.....	8
3.1.3.3. Limos orgánicos.....	8
3.1.3.4. Arcillas	9

	3.1.3.5.	Arcillas orgánicas	9	
3.2.		Características y estructuración de los suelos	9	
	3.2.1.	Tamaño del grano	9	
		3.2.1.1. Grava.....	10	
		3.2.1.2. Arena.....	10	
		3.2.1.3. Limo	11	
		3.2.1.4. Arcilla.....	11	
	3.2.2.	Forma de las partículas de suelo	13	
		3.2.2.1. Partículas voluminosas.....	14	
		3.2.2.2. Partículas escamosas	15	
		3.2.2.3. Partículas nodulares.....	15	
	3.2.3.	Estructura de un suelo granular	15	
		3.2.3.1. Minerales constitutivos de los suelos gruesos.....	19	
	3.2.4.	Humedad del suelo	20	
		3.2.4.1. Cohesión	21	
			3.2.4.1.1. Suelos cohesivos	21
			3.2.4.1.2. Suelos no cohesivos	22
	3.2.5.	Gravedad específica de los sólidos.....	22	
4.		ANÁLISIS MECÁNICO O GRANULOMÉTRICO DE LOS SUELOS	25	
	4.1.	Análisis de tamiz	25	
		4.1.1. Gráfica de la distribución granulométrica	27	
			4.1.1.1. Diámetro efectivo	29
			4.1.1.2. Coeficiente de uniformidad.....	30
			4.1.1.3. Coeficiente de curvatura.....	30

5.	PLASTICIDAD DE LOS SUELOS	33
5.1.	Límite líquido (AASHTO T89: Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils)	34
5.2.	Límite plástico (AASHTO T90: Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils)	35
5.3.	Límite de contracción (AASHTO T92: Standard Method of Test for Determining the Shrinkage Factors of Soils)	36
5.4.	Índice de plasticidad	36
6.	COMPACTACIÓN DE SUELOS.....	37
6.1.	Variables que afectan el proceso de compactación de los suelos	38
6.1.1.	La naturaleza del suelo.....	38
6.1.2.	El método de compactación.....	38
6.1.3.	La energía específica	38
6.1.4.	El contenido de agua del suelo.....	39
6.1.5.	El sentido en que se recorra la escala de humedades al efectuar la compactación	40
6.1.6.	El contenido original de agua del suelo	40
6.1.7.	La recompactación	40
6.1.8.	La temperatura	41
6.1.9.	Otras variables.....	41
6.2.	Ensayos de compactación de Proctor	41
6.2.1.	Prueba Proctor Estándar	44
6.2.2.	Prueba Proctor Modificado	44
6.3.	Curva de compactación y curva de saturación	44
6.4.	Compactación en campo	47
6.4.1.	Rodillo de ruedas lisas (o rodillos de tambor liso)...	48
6.4.2.	Rodillo con neumáticos de caucho	48

6.4.3.	Rodillos compactadores	49
6.4.4.	Rodillos vibratorios	50
6.5.	Efecto de la compactación en las propiedades cohesivas del suelo.....	50
6.6.	Propiedades mecánicas de las arenas compactadas	53
6.7.	Problemas especiales en la compactación de suelos	55
7.	DESARROLLO EXPERIMENTAL	57
7.1.	Material a utilizar	57
7.2.	Equipo utilizado	59
7.3.	Preparación de las muestras.....	62
7.3.1.	Suelo en estado natural (A-2-7)	62
7.3.1.1.	Ensayo de Proctor según la norma AASTHO T180	64
7.3.1.2.	Ensayo de Proctor por el método de separación de gravas	64
7.3.2.	Suelo mezclado (A-1-A)	66
7.3.2.1.	Ensayo de Proctor según la norma AASHTO T180	67
7.3.2.2.	Ensayo de Proctor por el método de separación de gravas	67
7.4.	Datos obtenidos	68
7.4.1.	Suelo A-2-7 sin separar gravas, primer ensayo	68
7.4.2.	Suelo A-2-7 sin separar gravas, segundo ensayo...	69
7.4.3.	Suelo A-2-7 sin separar gravas, tercer ensayo	70
7.4.4.	Suelo A-2-7 separando gravas, primer ensayo	70
7.4.5.	Suelo A-2-7 separando gravas, segundo ensayo....	71
7.4.6.	Suelo A-2-7 separando gravas, tercer ensayo	72
7.4.7.	Suelo A-1-A sin separar gravas, primer ensayo	72

7.4.8.	Suelo A-1-A sin separar gravas, segundo ensayo..	73
7.4.9.	Suelo A-1-A sin separar gravas, tercer ensayo	74
7.4.10.	Suelo A-1-A separando gravas, primer ensayo	74
7.4.11.	Suelo A-1-A separando gravas, segundo ensayo...	75
7.4.12.	Suelo A-1-A separando gravas, tercer ensayo	76
7.5.	Cálculos efectuados	76
7.6.	Resultados obtenidos	77
7.7.	Gráficas obtenidas.....	78
8.	COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	81
	CONCLUSIONES	87
	RECOMENDACIONES.....	91
	BIBLIOGRAFÍA.....	93
	ANEXOS.....	95

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Diferentes tipos de suelo.....	4
2.	Composición granular de una misma masa de suelo.....	12
3.	Tamaño de partículas de suelos.	13
4.	Forma de las partículas voluminosas.....	14
5.	Arreglo cúbico simple.....	16
6.	Arreglo rómbico.....	17
7.	Arreglo ideal con partículas que varían de grande a pequeño (distribución granulométrica bien gradada)	18
8.	Empaque de partículas grandes con tamaños de grano pequeños removidos (pobremente gradada).....	18
9.	Condiciones generales de la humedad del suelo.....	21
10.	Equipo utilizado para ensayo granulométrico.....	26
11.	Curva de distribución de tamaño de partícula.....	28
12.	Diferentes tipos de curvas de distribución de tamaño de grano de partícula	29
13.	Definición de D_{10} , D_{30} y D_{60}	31
14.	Límites de Atterberg.....	34
15.	Curva de compactación.....	45
16.	Curva de compactación y curva de saturación.....	47
17.	Rodillo de rueda lisa.....	48
18.	Rodillo con neumáticos de caucho.....	49
19.	Rodillo compactador.....	50

20.	Naturaleza de la variación del peso unitario seco, conductividad hidráulica y esfuerzo de compresión.....	52
21.	Diferencia del comportamiento de la resistencia entre el estado compacto y suelto de una arena.....	53
22.	Diferencia del volumen durante la deformación entre el estado compacto y suelto de una arena.....	54
23.	Ubicación del material utilizado.	57
24.	Material utilizado en estado natural.	58
25.	Material mezclado utilizado.....	59
26.	Equipo utilizado para el ensayo de granulometría.	60
27.	Equipo utilizado para la determinación de los límites de Atterberg.....	61
28.	Equipo utilizado para el ensayo de compactación de Proctor.....	62
29.	Cuartheador de muestras.	63
30.	Tamizado de la muestra de suelo.....	63
31.	Muestras de suelo en estado natural sin gravas separadas.	64
32.	Muestras de suelo en estado natural con gravas separadas.....	65
33.	Gravas en proceso de saturación.	66
34.	Muestras de suelo mezclado con gravas separadas.	68
35.	Gráfica PUS vs %H para el suelo A-2-7 sin separar las gravas.	79
36.	Gráfica PUS vs %H para el suelo A-2-7 separando las gravas.	79
37.	Gráfica PUS vs %H para el suelo A-1-A sin separar las gravas.....	80
38.	Gráfica PUS vs %H para el suelo A-1-A separando las gravas.....	80
39.	Comparación entre gráficas PUS vs %H para el suelo A-2-7 para ambos métodos.	84
40.	Comparación entre gráficas PUS vs %H para el suelo A-1-A para ambos métodos.	85

TABLAS

I.	Límites de separación de tamaño de suelo.....	12
II.	Parámetros básicos de estructuras cristalinas	16
III.	Valores típicos de gravedad específica.....	23
IV.	Valores típicos de gravedad específica para minerales del suelo.....	23
V.	Tamaños estándar de tamices.....	27
VI.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 sin separar gravas, primer ensayo	69
VII.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 sin separar gravas, segundo ensayo	69
VIII.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 sin separar gravas, tercer ensayo	70
IX.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 separando gravas, primer ensayo	71
X.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 separando gravas, segundo ensayo	71
XI.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 separando gravas, tercer ensayo	72
XII.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A sin separar gravas, primer ensayo	73
XIII.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A sin separar gravas, segundo ensayo	73
XIV.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A sin separar gravas, tercer ensayo	74
XV.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A separando gravas, primer ensayo	75
XVI.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A separando gravas, segundo ensayo	75

XVII.	Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A separando gravas, tercer ensayo	76
XVIII.	Resultados obtenidos de los ensayos de compactación de Proctor del suelo A-2-7	77
XIX.	Resultados obtenidos de los ensayos de compactación de Proctor del suelo A-1-A	78
XX.	Promedio de los resultados del ensayo de compactación de Proctor...	78
XXI.	Error relativo del procedimiento de separación de gravas con respecto al procedimiento de la norma AASHTO T180	81

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
C_c	Coeficiente de curvatura.
C_u	Coeficiente de uniformidad.
D₃₀	Diámetro aparente de la partícula de suelo a un 30 %.
D₆₀	Diámetro aparente de la partícula de suelo a un 60 %.
D₁₀	Diámetro efectivo. Diámetro aparente de la partícula de suelo a un 10 %.
g	Gramos.
G_s	Gravedad específica de los sólidos.
kg	Kilogramos.
kg/m³	Kilogramos por metro cúbico.
lb/ft³	Libras por pie cúbico.
PBH	Peso bruto húmedo.
PBS	Peso bruto seco.
γ_{cva}	Peso unitario con cero vacíos de aire.
γ_w	Peso unitario del agua.
γ_d	Peso unitario seco del suelo.
$\gamma_d \text{ máx}$	Peso unitario seco máximo del suelo.
%CBR	Porcentaje de California Bearing Ratio
%H	Porcentaje de humedad.
%H_{ópt}	Porcentaje de humedad óptimo.
n	Porosidad
V	Volumen de suelo.
V_v	Volumen de vacíos.

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
Arcillas	Suelo que exhibe plasticidad con un cierto contenido de agua, y posee una considerable fuerza cuando está seca.
Arenas	Partículas de roca menores a 4,75 y mayores a 0,075 mm.
Compactación	Consolidación del suelo por la eliminación de aire, lo que requiere energía mecánica.
Energía mecánica	Energía aplicada al suelo a través de martillos o pistones.
Granulometría	Es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado.
Gravas	Partículas de roca menores a 75 mm y mayores a 4,75 mm.
Humedad	Cantidad de agua por volumen de suelo.

Humedad óptima	Porcentaje de humedad cuando se da el peso unitario seco máximo.
Permeabilidad	Capacidad de un suelo para permitir el paso de un fluido a través de él sin que dicho proceso altere la estructura interna del suelo.
Peso unitario seco	Peso por unidad de volumen de suelo excluyendo el agua.
Peso unitario seco máx.	Valor del peso unitario que se da en la humedad óptima de un suelo.
Porosidad	Relación del volumen de vacíos entre el volumen de la muestra de suelo.

RESUMEN

Se realizó el ensayo de compactación de Proctor para dos diferentes tipos de suelo, uno obtenido en estado natural y otro elaborado a partir de la combinación de material selecto y agregado grueso de 1/2". Se utilizó el procedimiento dictaminado por la norma AASHTO T180 método D y un método empírico de separación de gravas. Para ambos procedimientos se realizó tres veces cada ensayo en cada suelo para obtener resultados más precisos y cercanos a la realidad.

A partir de estos datos, se realizó una comparación entre los mismos para determinar si existe un grado de influencia de la granulometría del suelo en los resultados obtenidos por el ensayo. De esta manera, se analiza el comportamiento de la compactación de un suelo granular en donde la mayor retención de agua sucede en el material fino en comparación con las gravas del suelo, que, al ser más permeables por tener una porosidad más baja y poros más grandes, no retienen el agua y la dejan escurrir.

OBJETIVOS

General

Comparar el peso unitario seco mediante el ensayo de Proctor modificado según la norma AASTHO T180 método D con un método empírico de separación de gravas.

Específicos

1. Obtener un tipo de suelo granular a partir de la combinación de un suelo tipo limo arcilloso o material fino y basalto o caliza tomando como referencia un análisis granulométrico.
2. Determinar el peso unitario seco máximo de los suelos.
3. Obtener la humedad óptima del suelo que permita alcanzar el peso unitario seco máximo.
4. Trazar y evaluar la gráfica de compactación por medio de los dos ensayos al mismo tipo de suelo.
5. Verificar el procedimiento correcto para realizar el ensayo de compactación de Proctor al tener materiales granulares.

INTRODUCCIÓN

La compactación de suelos es una actividad muy importante en lo que se refiere a la construcción de obras de infraestructura, especialmente en el diseño y elaboración de las diferentes capas que componen las carreteras y en demás situaciones en las que se haga uso de la ingeniería civil y geotecnia. Esto permite tener un mejor control y ayuda a estabilizar el área en donde se desee trabajar y así evitar hundimientos y asentamientos por parte de los elementos estructurales con los que tenga contacto, así como también a aumentar la resistencia al corte; de esta manera se garantiza una mayor seguridad en las obras cuando estas son finalizadas. Para mantener un control en la compactación de suelos existen diferentes técnicas que se utilizan para garantizar la estabilidad de los mismos, una de ellas es el ensayo de compactación de Proctor. Actualmente existen dos variables: Proctor Estándar y Proctor Modificado. La diferencia radica en la cantidad de energía aplicada a la muestra de suelo.

Dependiendo del tipo y granulometría de los suelos es cómo varían los resultados obtenidos de los ensayos de compactación. Estos se calculan por medio de la gráfica compactación tomando en cuenta cierto número de muestras para un mismo ensayo. De esta manera se determina qué tan útil es cierto suelo para usos específicos como bases o sub bases de carreteras.

Con el propósito de garantizar un mejor control de bases y sub bases se trata de adaptar las necesidades de los suelos a la realidad, siempre apeándose a las normas que rigen el control de los ensayos de los mismos. Así, se pretende realizar una comparación entre el ensayo de compactación de Proctor según el método D de la norma AASHTO T180, pues este método se aplica solamente a

bases granulares (alto porcentaje de gravas), y un método empírico de separación de gravas para suelos granulares, puesto que se ha observado que el material fino del suelo tiende a retener mayor cantidad de agua que las gravas durante el proceso en el que se humedecen las muestras y se considera que existe algún tipo de incidencia en los resultados cuando la humedad desarrollada en el suelo no es homogénea. Se pretende definir el procedimiento del ensayo de compactación de Proctor que presente resultados más precisos cuando se tienen suelos granulares y así poder mejorar los resultados y el aprendizaje, tanto de alumnos como de profesores para el laboratorio de mecánica de suelos.

1. ANTECEDENTES

Luego de consultar diversas fuentes de información se ha llegado a la conclusión de que no existe información que tome en consideración este método empírico de separación de gravas. No se ha hecho investigación sobre cómo afecta la granulometría del suelo en los ensayos de compactación de laboratorio.

1.1. Compactación en campo de suelos granulares

Para compactar suelos granulares se pueden utilizar rodillos vibratorios. En este caso la energía de compactación depende de la velocidad de avance. Es utilizado con mejores resultados en suelos granulares con algún contenido de finos. La vibración permite llegar a capas más profundas que la sola aplicación de una carga estática.¹

1.2. Influencia del tamaño de partículas

Cuando el porcentaje de partículas mayores a 2" es inferior al 10 %, la variación entre las densidades, es relativamente pequeña, de modo que su influencia no pasa a ser de gran significación. En cambio, cuando el porcentaje de partículas mayores de 2" es superior al 10 %, la variación de las densidades si es significativa.²

¹ SAGÜÉS, Patricia. *Propiedades de los suelos compactados*. p. 5.

² VILLAROEL, Carmen. *Compactación de suelos*. p. 16.

2. GENERALIDADES

2.1. Definición de suelo

La definición del suelo es ampliamente relativa, puesto que depende del punto de análisis de estudio por parte del investigador o ciencia que se utilice. Por ejemplo, para la agronomía el suelo se define como la parte superficial de la corteza en la que se puede desarrollar vida vegetal. Esta es una definición ambigua, ya que tratándose de la geología esta definición es muy general. Para esta ciencia, es un término que hace referencia al material intemperizado con cierto contenido de materia orgánica producto de la descomposición de las rocas debido a ataques de agentes atmosféricos y que se encuentra sobre la superficie. Esta descripción es más aplicable, para la ingeniería civil, puesto que toma en consideración la composición del suelo.

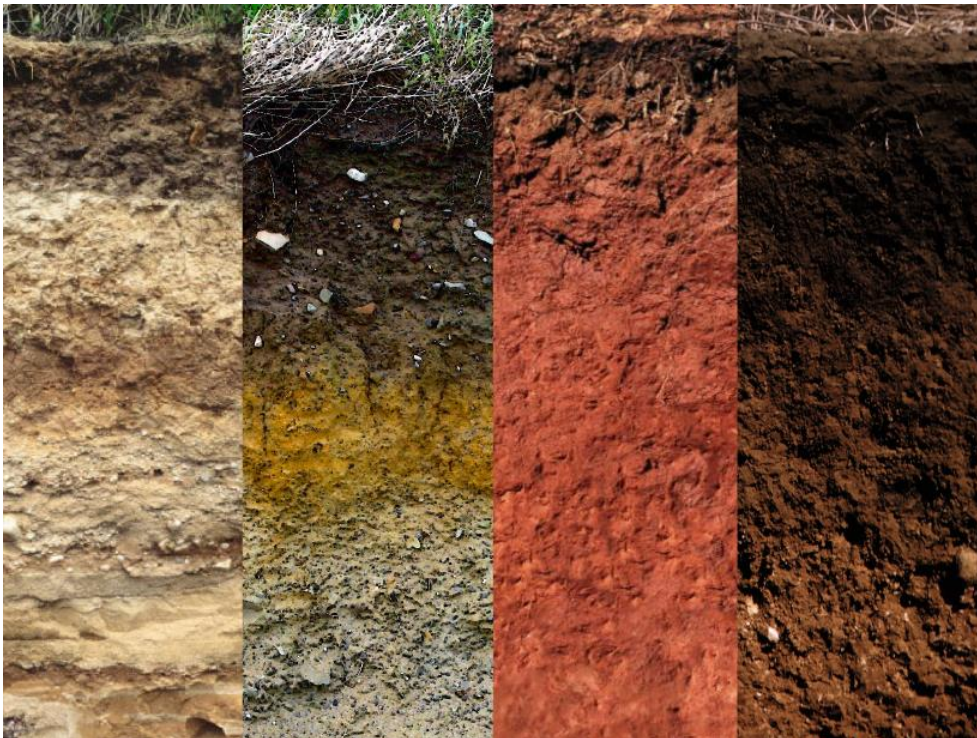
Para los fines de este trabajo, se define “suelo” como la delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración o alteración física o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan; así lo señala Crespo Villalaz en Mecánica de suelos y cimentaciones.

2.2. Naturaleza y origen de los suelos

Los suelos se clasifican como suelos residuales o suelos transportados dependiendo de si se les encuentra en el mismo lugar en el que fueron generados o no.

Los suelos transportados son aquellos en los cuales su ubicación actual no corresponde a la ubicación de origen. Esto quiere decir que se encuentran en un punto distinto al de las condiciones originales de la roca de donde se formaron. Generalmente el mecanismo usual que da origen a un suelo transportado es el aire, el agua y la sedimentación. Por otro lado, se refiere a los suelos residuales cuando estos no han sido transportados desde su ubicación original y mantienen su perfil, tanto de él mismo como de las rocas de las que se forma, a determinadas profundidades.

Figura 1. **Diferentes tipos de suelo**



Fuente: Cotecno. *Formación de diferentes tipos de suelo a base de condiciones climáticas.*

<https://www.cotecno.cl/formacion-de-diferentes-tipos-de-suelo-a-base-de-condiciones-climaticas/>. Consulta: 24 de octubre de 2019.

Ya que ambas clasificaciones tienen su origen de diferente manera, es evidente que la estructura interna y distribución de las propiedades y partículas debe de ser diferente entre ellos. Para los suelos residuales, la disposición de las partículas del suelo tiende a ser muy similar a la de la roca original, producto del ataque mecánico y la desintegración química. Mientras tanto, la configuración de los suelos transportados se rige por la deposición de las partículas producto del transporte proveniente de los flujos de agua y aire para su posterior sedimentación. Esto quiere decir que no guarda acoplamiento similar al de la roca madre.

3. FUNDAMENTOS Y CONCEPTOS BÁSICOS

3.1. Principales tipos de suelo

La naturaleza de los suelos se debe a diversos factores dentro de los que destacan la degradación mecánica y química de las rocas y la descomposición de material orgánico.

3.1.1. Suelo originado de la degradación mecánica y química de las rocas

Como se mencionó anteriormente, si el material producto de la descomposición de las rocas se encuentra en el lugar de origen se le conoce como suelo residual, de lo contrario es un suelo transportado, independientemente del agente de transporte.

3.1.2. Suelo de origen orgánico

En la mayoría de casos, este tipo de suelos se han originado *in situ* debido a la descomposición de vegetales, por la acumulación de fragmentos de esqueletos de animales o de conchas de ciertos organismos. Generalmente este término se aplica a suelos transportados que se han originado por la descomposición de rocas pero que contienen cierta cantidad de materia orgánica vegetal descompuesto.

3.1.3. Diferentes tipos de suelo

Según de la distribución del tamaño de las partículas de un suelo, estos pueden clasificarse en gravas, arenas, limos y arcillas con o sin contenido de materia orgánica, dependiendo de su naturaleza.

3.1.3.1. Arenas y gravas

Son materiales cuyas partículas no poseen cohesión. Se caracterizan por ser fragmentos granulares o redondeados, poco o no alterados, de rocas y minerales. Las gravas comprenden las partículas más grandes seguidas de las arenas.

3.1.3.2. Limos inorgánicos

Este tipo de suelo se caracteriza por ser de grano fino, y presentan poca o ninguna plasticidad. Generalmente tienen inclusión de polvo de rocas, producto de la descomposición de las mismas. Pueden ser encontrados en depósitos sedimentarios arcillosos de origen eólico. El tamaño de partícula es menor que las arenas, pero mayor que las arcillas.

3.1.3.3. Limos orgánicos

Son aquellos suelos de grano fino que sí poseen cierto nivel de plasticidad. El material tiene una mezcla de partículas de materia orgánica finamente dividida. Debido a la descomposición de materia orgánica, estos suelos tienen un color característico que se varía de gris a gris oscuro. En general tienen una alta compresibilidad, pero su permeabilidad es muy baja.

3.1.3.4. Arcillas

Son suelos de partículas microscópicas derivados de la descomposición química y mecánica que sufren los materiales constituyentes de las rocas. Son materiales muy moldeables cuando tienen cierto contenido de humedad, pues poseen un alto grado de plasticidad. Sin embargo, son suelos poco permeables, pues al absorber cierta cantidad de agua impiden el paso de la misma a estratos de suelo inferiores.

3.1.3.5. Arcillas orgánicas

Es aquel material que obtiene ciertas propiedades físicas a la presencia de materia orgánica finamente dividida. Estos materiales son muy compresibles cuando están saturados, además que presentan una resistencia muy alta cuando están secos. Debido al contenido de materia orgánica en ellas, poseen colores que varían de gris oscuro a negro.

3.2. Características y estructuración de los suelos

La composición de características como forma y tamaño de las partículas de suelo son de gran importancia para poder describir y comprender su comportamiento mecánico.

3.2.1. Tamaño del grano

El tamaño del grano de un suelo se refiere a los diámetros de las partículas que forman al material en conjunto. Independientemente de su origen, los tamaños de las partículas que conforman el suelo pueden variar en un amplio

intervalo. Los suelos son generalmente llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas dentro del suelo.³

Para poder describir los suelos en función del tamaño de las partículas, diferentes organizaciones han establecido los límites de separación de tamaño de suelo. Atendiendo la clasificación de suelos por su tamaño se definen las gravas como fragmentos de rocas con partículas ocasionales de cuarzo, feldespato y otros minerales. En las partículas de arena predominan el cuarzo y el feldespato, a veces también pueden estar presentes granos de otros minerales. Los limos son las fracciones microscópicas del suelo que consisten en fragmentos de cuarzo muy finos y algunas partículas en forma laminar que son fragmentos de minerales micáceos. Por último, las arcillas son, en su mayoría, partículas en forma de láminas microscópicas y submicroscópicas de mica, minerales de arcilla y otros minerales.⁴ (ver tabla I).

3.2.1.1. Grava

Comprende toda acumulación suelta de fragmentos de roca. Estas presentan forma redondeada debido a su origen, pues cuando son acarreadas por agentes de transporte como el agua o el viento, sufren desgaste en sus aristas. Este material puede ser encontrado en los márgenes de ríos o en muchas depresiones de terrenos, rellenas por el acarreo de los ríos.

3.2.1.2. Arena

Es el nombre que se le da a los materiales de cierto tamaño de grano cuya procedencia se debe a la desintegración química o mecánica de las rocas o a su

³ DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 28.

⁴ *Ibíd.*

trituration artificial. De la misma manera como sucede con las gravas, ambos tipos de material suelen encontrarse en los mismos depósitos. Muchas veces la arena de río contiene proporciones relativamente grandes de grava.

3.2.1.3. Limo

Son suelos de grano fino con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico, como el que suele encontrarse en los ríos, siendo este último caso de características plásticas. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar.⁵

3.2.1.4. Arcilla

También llamado suelo pesado, se les llama así a todas aquellas partículas sólidas de grano muy fino cuya masa tiene la propiedad de adquirir propiedades plásticas al ser mezclada con agua. Su fina textura le otorga una elevada retención de agua. Debido a sus propiedades, es un material indeseado para cimentar una estructura, pues presenta grandes asentamientos y un pobre drenaje de suelo.

⁵ CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 22.

Figura 2. **Composición granular de una misma masa de suelo**



Fuente: Food and Agriculture Organization of the United Nations. *El suelo, diferencias según su aspecto físico y químico*. <http://www.fao.org/3/ah645s/AH645S04.htm>.

Consulta: 24 de octubre de 2019.

Tabla I. **Límites de separación de tamaño de suelo**

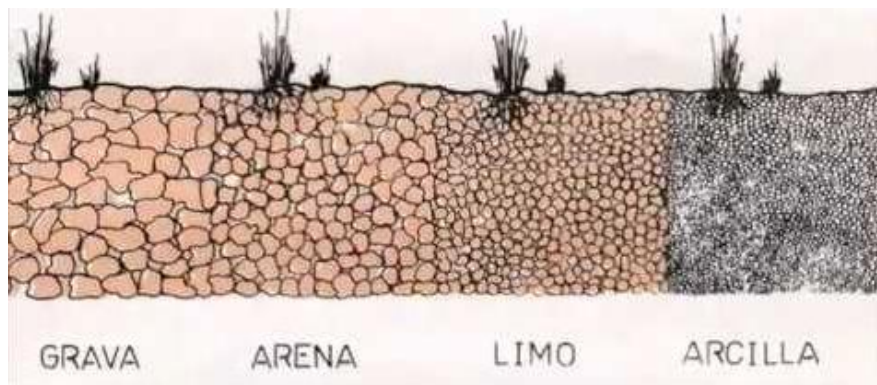
Nombre de la organización	Tamaño de grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	< 0,002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	> 2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	< 0,002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales de Transporte (AASHTO)	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	< 0,002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	Finos (p.ej., limos y arcillas) < 0,075	

Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p.28.

Para poder determinar el tamaño del grano es necesario tamizar una cantidad de material por medio de una serie de tamices de aberturas de malla progresivamente más pequeñas desde arriba hacia abajo. Este procedimiento es conocido como ensayo granulométrico y se describe en el capítulo 4.

Como se expuso anteriormente, las características y propiedades de los diferentes tipos de suelo dependen, en gran medida, de la distribución de los tamaños de partículas de suelo.

Figura 3. **Tamaño de partículas de suelos**



Fuente: Mágica naturaleza. Suelo limoso: qué es, características y mucho más.

<https://magicanaturaleza.com/c-suelos/suelo-limoso/>.

Consulta: 24 de octubre de 2019.

3.2.2. Forma de las partículas de suelo

Así como la distribución del tamaño de partículas tiene una significativa influencia en las propiedades físicas de un suelo determinado, la forma de las partículas presentes en la masa de suelo tiene la misma importancia. A pesar de ello, actualmente no se le presta demasiada atención a la forma de la partícula

puesto que esa característica es muy difícil de medir. A grandes rasgos, la forma de las partículas puede dividirse en tres grupos:

3.2.2.1. Partículas voluminosas

Abarca aquellas conocidas como angulares, subangulares, subredondeadas o redondeadas. En su mayoría se forman debido a desgastes mecánicos por intemperismo. Generalmente las partículas angulares son aquellos granos de arena que se encuentran cerca de su lugar de origen. Las partículas subredondeadas o redondeadas deben su forma a los granos de arena que son desplazados y transportados por el agua y viento por largas distancias. La forma de las partículas granulares en la masa de un suelo tienen una gran influencia en las propiedades físicas del suelo como los parámetros de resistencia al corte o grado de compresibilidad.

Figura 4. **Forma de las partículas voluminosas**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p.45.

3.2.2.2. Partículas escamosas

Tienen una baja esfericidad, generalmente 0,01 o menos. Estas partículas son predominantemente minerales de arcilla o escamas de mica. Proporcionan propiedades elásticas y hacen esponjosos a los suelos. El porcentaje de partículas escamosas aumenta en un suelo dado a medida que decrece el tamaño de sus fracciones. Por ello, las fracciones más finas de arcillas consisten principalmente en partículas con forma de escamas.

3.2.2.3. Partículas nodulares

Son mucho menos comunes que los otros tipos de partículas. Ejemplos de suelos que contienen partículas nodulares son algunos tipos de depósitos de coral y arcillas de atapulgita.

3.2.3. Estructura de un suelo granular

El ordenamiento de las partículas individuales en un suelo granular puede recibir el nombre de arreglo o empaque. El arreglo de granos de suelo está fuertemente influido por la distribución del tamaño de las partículas y por su forma.⁶

La figura 5 ilustra el arreglo ideal de esferas en un volumen que tiene el espesor de una esfera. En la figura 6 se ha ordenado el mismo número de esferas en una configuración más densa denominada arreglo rómbico. De acuerdo con consideraciones teóricas, que son sencillas para el arreglo cúbico simple de la figura 5, si se ajustan las bolas dentro de un cubo de lado = $2R$, se obtiene:

⁶ BOWLES, Joseph E. *Propiedades geofísicas de los suelos*. p. 157.

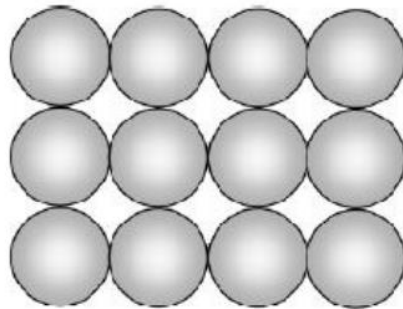
Tabla II. **Parámetros básicos de estructuras cristalinas**

Estructura	Volumen	Peso unitario	Relación de vacíos
Cúbico simple	$8R^3$	$\gamma\pi/6$	0,91
Rómbico	$4\sqrt{3} R^3$	$(\gamma\pi\sqrt{3}) / 3$	0,65
Piramidal	$4\sqrt{2} R^3$	$(\gamma\pi\sqrt{2}) / 4$	0,35

Fuente: BOWLES, Joseph E. Propiedades geofísicas de los suelos. p. 157.

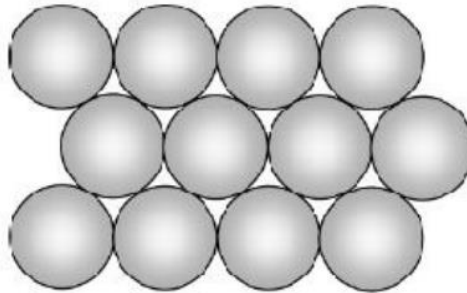
Este intervalo representa la relación de vacíos teórica de cualquier masa de suelo en esferas iguales, de radio R.

Figura 5. **Arreglo cúbico simple**



Fuente: SÁNCHEZ CORONA, Carlos Yair. *Evolución de los registros de resistividad y su aplicación en la estimación de la saturación de fluidos (agua e hidrocarburos)*. p. 5.

Figura 6. **Arreglo rómbico**

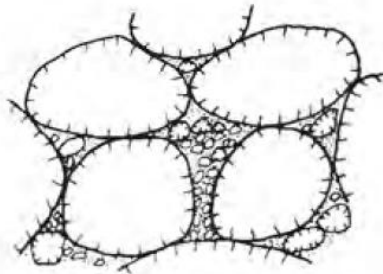


Fuente: SÁNCHEZ CORONA, Carlos Yair. *Evolución de los registros de resistividad y su aplicación en la estimación de la saturación de fluidos (agua e hidrocarburos)*. p. 5.

La figura 7 ilustra la distribución granulométrica ideal para un arreglo óptimo. Las aproximaciones en esta situación son deseables en muchas situaciones de la ingeniería geotécnica, en los que la estabilidad es el punto delicado.

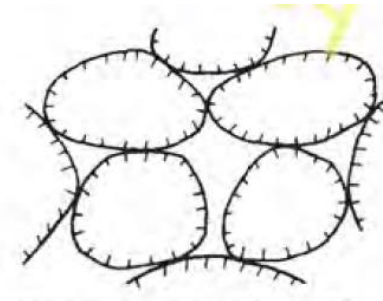
En los suelos reales rara vez se da una distribución ideal de partículas; sin embargo, el arreglo de la figura 7 establece el límite superior, mientras el arreglo de la figura 8 establece el límite inferior obtenido por un tamaño de partículas. Debe observarse que con esferas iguales la variación del peso unitario es independiente del radio de la esfera; en un suelo real la variación del peso específico dependerá tanto de un tamaño, como del valor numérico de aquel tamaño. Esto se debe tanto a que el tamaño no es uniforme, como también a que el tamaño es un intervalo de tamaños de partículas que han pasado una abertura de malla y que han sido retenidas en una malla menor.

Figura 7. **Arreglo ideal con partículas que varían de grande a pequeño (distribución granulométrica bien gradada)**



BOWLES, Joseph E. *Propiedades geofísicas de los suelos*. p. 158.

Figura 8. **Empaque de partículas grandes con tamaños de grano pequeños removidos (pobrememente gradada)**



BOWLES, Joseph E. *Propiedades geofísicas de los suelos*. p. 158.

Las consideraciones geotécnicas, como se dijo anteriormente, requieren de un arreglo óptimo de partículas. En este, la resistencia al corte se aumenta debido a que hay mayor contacto entre partículas que suministran soporte lateral adicional. La compresión o asentamiento son reducidos, ya que hay una menor cantidad disponible de huecos o vacíos del suelo para permitir un cambio de volumen. Además, con el arreglo existe una menor tendencia de las partículas a

reajustarse a nuevas posiciones de equilibrio bajo tensión. En un lugar de cimentación formado por un depósito granular suelto, será necesario aumentar el arreglo mediante compactación. En donde el depósito es superficial, puede usarse un compactador vibratorio. Para depósitos profundos, puede usarse la vibroflotación (un aparato vibratorio) o pueden hincarse o extraerse pilotes. En cualquier caso, la energía se usa para desplazar las partículas a una configuración más densa.⁷

3.2.3.1. Minerales constitutivos de los suelos gruesos

Un mineral es una sustancia inorgánica y natural que tiene una estructura interna característica determinada por un cierto arreglo específico de átomos e iones. Su composición química y sus propiedades físicas o son fijas o varían dentro de límites definidos. Sus propiedades físicas más interesantes, desde el punto de vista de identificación son: el color, el lustre, la tonalidad de sus raspaduras, la forma de cristalización, la dureza, la forma de su fractura y disposición de sus planos cruceros, la tenacidad, la capacidad para permitir el paso de ondas y radiaciones (o luz) y la densidad relativa.⁸

La estructura atómico – molecular del mineral es el factor más importante para condicionar sus propiedades físicas.

En los suelos formados por partículas gruesas, los minerales predominantes son: silicatos, principalmente feldespato (de potasio, sodio o calcio), micas, olivino, serpentina, entre otros; óxidos, cuyos principales exponentes son el cuarzo (SiO_2), la limonita, la magnetita y el corindón;

⁷ BOWLES, Joseph E. *Propiedades geofísicas de los suelos*. p. 159.

⁸ BADILLO, Juárez y RODRÍGUEZ, Rico. *Mecánica de suelos. Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos*. p. 37.

carbonatos, entre los que destacan la calcita, la dolomita y sulfatos, cuyos principales representantes son la anhidrita y el yeso.⁹

En los suelos gruesos el comportamiento mecánico e hidráulico está principalmente condicionado por su compacidad y por la orientación de sus partículas, por lo que la constitución mineralógica es, hasta cierto punto, secundaria.¹⁰

3.2.4. Humedad del suelo

Se le llama así a la relación que existe entre el peso de agua de los poros del suelo y el peso de los sólidos del suelo (granos). Es una medida que indica el contenido de agua de un suelo.

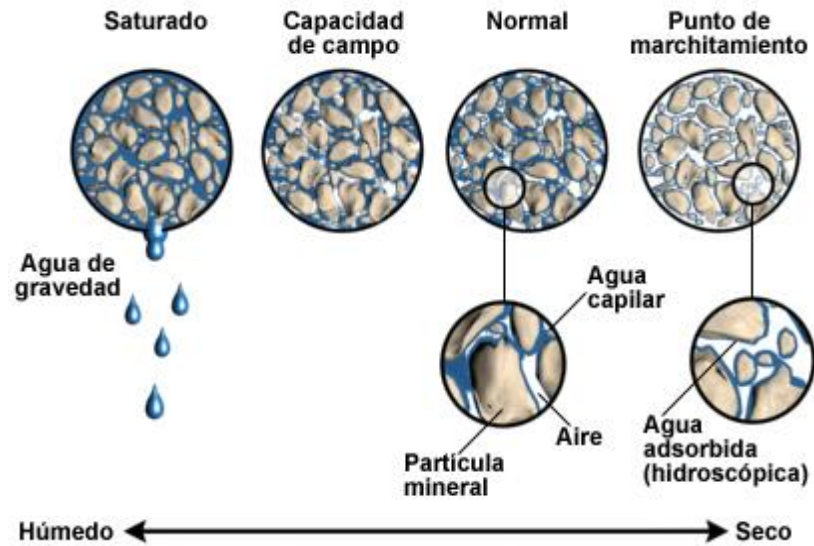
Existe una diferencia entre la determinación del contenido de agua de las muestras que se investigan en el laboratorio y el contenido de agua que corresponde al valor instantáneo en el terreno. Este último valor se denomina humedad natural o contenido de agua del suelo.

Existen diferentes factores que influyen en la humedad de un suelo. Dentro de estos factores se pueden mencionar la ubicación de la muestra de suelo, profundidad del terreno, cercanía a un cuerpo de agua como ríos o lagos, lluvias recientes, entre otros.

⁹ BADILLO, Juárez; RODRÍGUEZ, Rico. *Mecánica de suelos. Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos*. p. 37.

¹⁰ *Íbid.*

Figura 9. Condiciones generales de la humedad del suelo



Fuente: MetEd. *Comprensión del ciclo hidrológico*. https://www.met.edu/hydro/basic_int/hydrologic_cycle_es/navmenu.php?tab=1&page=4.3.0 Consultado: 27 de octubre de 2019.

3.2.4.1. Cohesión

Una de las características que diferencia a los tipos de suelos es la cohesión. Debido a ella los suelos se clasifican en cohesivos y no cohesivos.

3.2.4.1.1. Suelos cohesivos

Los suelos cohesivos son los que poseen cohesión, es decir, la propiedad de atracción intermolecular, como las arcillas.

3.2.4.1.2. Suelos no cohesivos

Los suelos no cohesivos son los formados por partículas de roca sin ningún tipo de adherencia entre los granos, como la arena y la grava. También reciben el nombre de suelos granulares.

3.2.5. Gravedad específica de los sólidos

La gravedad específica se define como la relación entre el peso unitario del material y el peso unitario del agua. Sin embargo, para diversas situaciones también es necesario considerar la gravedad específica de los sólidos, como sucede en el caso de cálculos por medio de relaciones gravimétricas. Esta última considera solamente la relación entre el peso unitario seco del material y el peso unitario del agua. En otras palabras, no se toma en consideración el contenido de agua.

Los resultados de muchas determinaciones de gravedades específicas de considerables números de suelos indican que los valores de 2,55 a 2,80 enmarcarán casi todos los suelos, en donde la mayoría de los valores estarán entre 2,60 y 2,75. En realidad, el ensayo de gravedad específica no es realizado frecuentemente y los valores se toman arbitrariamente.¹¹

¹¹ BOWLES, Joseph E. *Propiedades geofísicas de los suelos*. p. 41.

Tabla III. **Valores típicos de gravedad específica**

Tipo de suelo	Gravedad específica
Arenas, gravas, materiales de grano grueso.	Gs = 2,65 – 2,67
Suelos cohesivos, tales como mezclas de arcilla, arena, limo, entre otros.	Gs = 2,68 – 2,72
Arcilla.	Use valores de la tabla IV para el tipo específico.

Fuente: BOWLES, Joseph E. Propiedades geofísicas de los suelos. p. 41.

Tabla IV. **Valores típicos de gravedad específica para minerales del suelo**

Mineral	Gravedad específica	Mineral	Gravedad específica
Bentonita	2,13 – 2,18	Muscovita (mica)	2,80 – 2,90
Yeso	2,30	Dolomita	2,87
Gibsita	2,30 – 2,40	Aragonita	2,94
Montmorillonita	2,40	Anhidrita	3,00
Feldespato ortoclásico	2,56	Biotita (mica)	3,00 – 3,10
Ilita	2,60	Hornblenda	3,00 – 3,47
Cuarzo	2,60	Augita	3,20 – 3,40
Caolinita	2,60 – 2,63	Olivina	3,27 – 3,37
Clorita	2,60 – 3,00	Limonita	3,80
Feldespato plagioclásico	2,62 – 2,76	Siderita	3,83 – 3,88
Talco	2,70 – 2,80	Hematita	4,90 – 5,30
Calcita	2,80 – 2,90	Magnetita	5,17 – 5,18

Fuente: BOWLES, Joseph E. Propiedades geofísicas de los suelos. p. 42.

4. ANÁLISIS MECÁNICO O GRANULOMÉTRICO DE LOS SUELOS

El análisis mecánico es la determinación de la gama de tamaños de partículas presentes en un suelo, expresados como un porcentaje del peso total (o masa). Generalmente se utilizan dos métodos para encontrar la distribución de tamaño de partícula de suelo: análisis de tamiz, para tamaños mayores a 0,075 mm de diámetro, y análisis de hidrómetro para tamaños de partículas más pequeños que 0,075 mm.¹²

4.1. Análisis de tamiz

La muestra de suelo se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices de aberturas descendentes utilizando sacudidas horizontales y golpes verticales, hasta el tamiz No. 200. Se pesa cada una de las cantidades de material retenido en los diferentes tamices y el porcentaje que representan respecto al peso de la muestra total se suma a los porcentajes retenidos en todas las mallas de mayor tamaño. El complemento al 100 % de esa cantidad proporciona el porcentaje de suelo que es menor que el tamaño representado por el tamiz analizado. En otras palabras, es necesario determinar el porcentaje de material que pasa cada uno de los tamices utilizados.

Para realizar este ensayo, primero se debe secar la muestra de suelo en el horno y luego romper todos los grumos en pequeñas partículas.

¹² DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 33.

El procedimiento para realizar el ensayo granulométrico es el siguiente:

- Pesar una determinada cantidad de suelo, generalmente 500 g, pues la muestra debe ser representativa. Para un suelo fino se necesita una menor cantidad que para un suelo granular.
- Lavado de la muestra. Se hace necesario en suelos cuyas partículas son difíciles de separar. Para poder realizar el lavado primero se debe dejar la muestra de suelo en saturación durante aproximadamente 24 horas. Se debe utilizar el tamiz 200 para eliminar el suelo fino.
- Secar la muestra en el horno a 100 °C durante 24 horas.
- Cuando la muestra ya esté seca, colocar verticalmente el juego de tamices de forma descendente.
- Luego de colocar el suelo en la batería de tamices, se procede a ubicarla en la máquina tamizadora durante un tiempo mínimo de 5 minutos, para que el material pase a través de las aberturas de los distintos tamices.
- Una vez transcurrido el tiempo y la máquina se detiene, se procede a separar cada tamiz y se toman los pesos retenidos acumulados en cada malla.

Figura 10. **Equipo utilizado para ensayo granulométrico**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

Tabla V. **Tamaños estándar de tamices**

Tamiz No.	Abertura (mm)
4	4,75
6	3,35
8	2,36
10	2,00
16	1,18
20	0,85
30	0,60
40	0,425
50	0,30
60	0,25
80	0,18
100	0,15
140	0,106
170	0,88
200	0,075
270	0,053

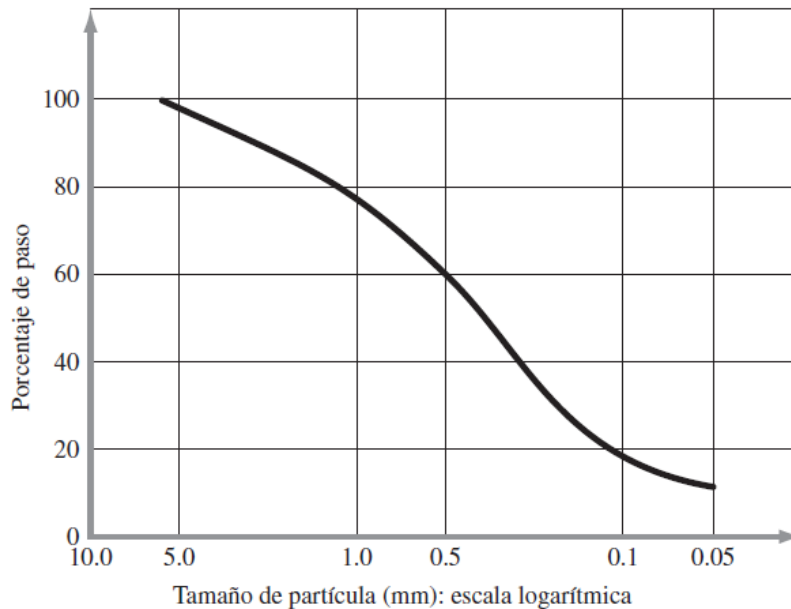
Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p.34.

A pesar de la gran variedad de tamaños de tamices que existen, generalmente los utilizados para este ensayo son, en orden descendente, 2", $\frac{3}{4}$ ", 4, 10, 40 y 200.

4.1.1. Gráfica de la distribución granulométrica

La forma más conveniente para representar el análisis granulométrico lo proporciona el gráfico semilogarítmico indicado en la figura 11. En este, el eje de las abscisas representa el tamaño de la abertura de los tamices, mientras que el eje de las ordenadas indica el porcentaje, en peso, de material que pasa cada uno de los tamices utilizados

Figura 11. **Curva de distribución de tamaño de partícula**

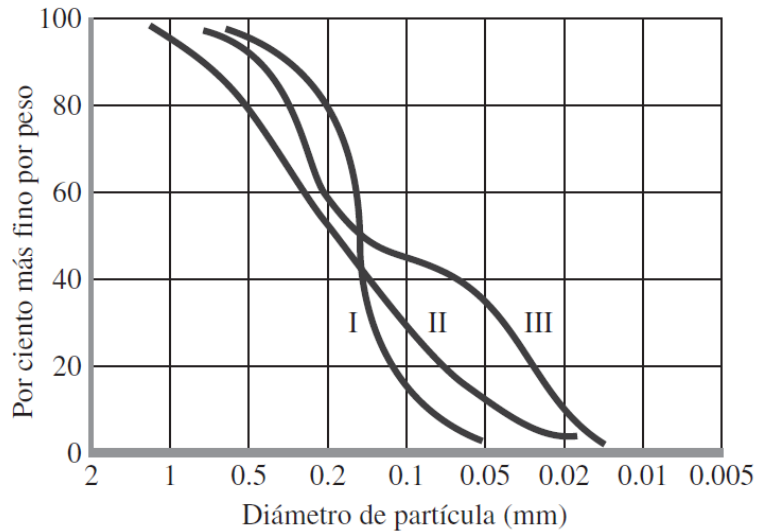


Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 35.

La forma de la curva proporciona información inmediata de la distribución granulométrica del suelo. Cuanto más uniforme es el tamaño de los granos, más inclinada es la curva. Una línea recta vertical representa un suelo perfectamente uniforme, es decir, un suelo constituido por partículas de un solo tamaño. Por otro lado, una curva muy tendida indica gran variedad de tamaños (suelo bien graduado). En la figura 12 se muestran diferentes curvas granulométricas.

Las curvas granulométricas se usan para comparar diferentes suelos. Además, tres parámetros básicos del suelo se determinan con esas curvas que se usan para clasificar los suelos granulares.

Figura 12. **Diferentes tipos de curvas de distribución de tamaño de grano de partícula**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 41.

4.1.1.1. **Diámetro efectivo**

También conocido como tamaño efectivo, D_{10} , se le llama así al tamaño de partícula de suelo para el cual el 10 % de ese material, en peso, tiene un tamaño menor. En otras palabras, se refiere al tamaño de abertura de un tamiz imaginario en el cual pasa el último 10 % del suelo (generalmente son los finos).

Otra definición que se tiene sostiene que es el tamaño de partícula que corresponde a un 10 % en la curva granulométrica, de modo que el 10 % de las partículas son más finas que D_{10} y el 90 % más gruesas.¹³

¹³ TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B. *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. p. 21.

4.1.1.2. Coeficiente de uniformidad

Es un parámetro que representa una medida simple de la uniformidad del suelo.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde:

C_u = coeficiente de uniformidad.

D_{60} = tamaño tal, que el 60 % en peso del suelo sea igual o menor.

D_{10} = diámetro efectivo.

En realidad, la relación anterior es un coeficiente de no uniformidad, pues su valor numérico decrece cuando la uniformidad aumenta.¹⁴ Un suelo bien graduado tiene un coeficiente de uniformidad mayor que 4 para las gravas y 6 para las arenas.¹⁵

4.1.1.3. Coeficiente de curvatura

También conocido como coeficiente de gradación, es una característica que permite la calificación de la gradación de un suelo. El coeficiente de curvatura es un indicador del equilibrio relativo que existe entre los diferentes rangos de tamaño de partículas del suelo.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} * D_{10}}$$

¹⁴ RICO, Alfonso y DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Volumen 1. p. 25.

¹⁵ DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 41.

Donde:

C_c = coeficiente de curvatura.

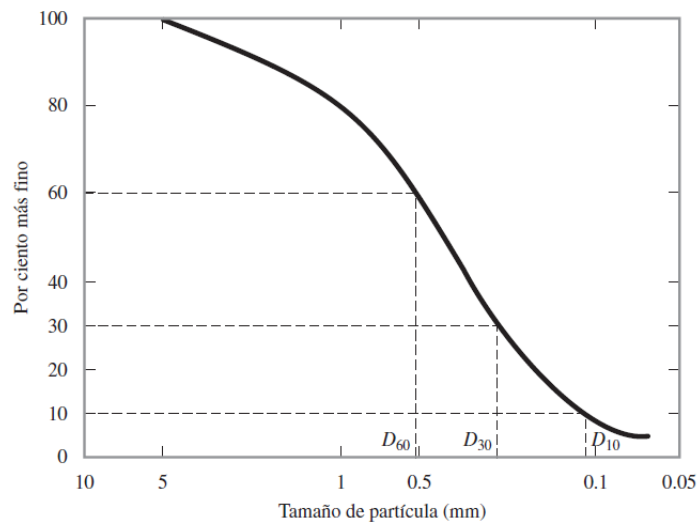
D_{60} = tamaño tal, que el 60 % en peso del suelo sea igual o menor.

D_{30} = tamaño tal, que el 30 % en peso del suelo sea igual o menor.

D_{10} = diámetro efectivo.

Un suelo bien clasificado o graduado tiene un coeficiente de curvatura entre 1 y 3 para gravas y arenas.¹⁶

Figura 13. Definición de D_{10} , D_{30} y D_{60}



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 40.

¹⁶ DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 41.

5. PLASTICIDAD DE LOS SUELOS

La plasticidad es la propiedad que poseen los suelos para poder deformarse hasta cierto límite sin llegar a romperse. Esta propiedad está directamente relacionada con el contenido de humedad presente.

Una definición más precisa dice que es la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse.¹⁷

La importancia de la plasticidad radica en que se ha demostrado que existe una correlación entre sus valores y algunas propiedades fundamentales de los suelos. Estas correlaciones son lo suficientemente certeras como para trabajar en las etapas iniciales de un proyecto, cuando la identificación de un suelo y su clasificación son importantes.¹⁸

Albert Mauritz Atterberg, un reconocido científico que se dedicó al estudio de las propiedades de los suelos, descubrió que la plasticidad no es una propiedad general de todos los suelos, pues no está presente en los suelos granulares. Como se mencionó anteriormente, también hizo ver que no es una propiedad permanente, sino que circunstancial y que depende del contenido de agua. Por ejemplo, una arcilla puede tener la consistencia de un ladrillo cuando

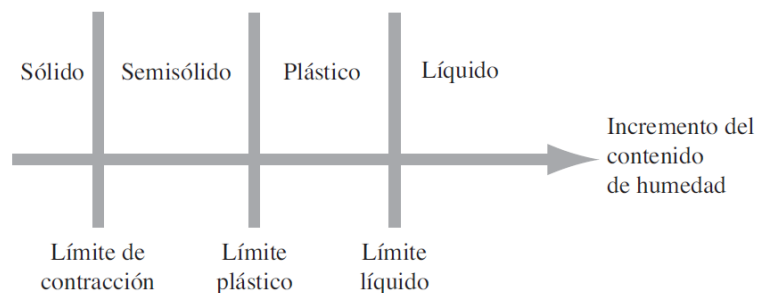
¹⁷ BADILLO, Juárez; RODRÍGUEZ, Rico. *Mecánica de suelos. Tomo I. Fundamentos de la mecánica de suelos.* p. 127.

¹⁸ RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas.* Volumen 1. p. 27.

está muy seca; con un gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o inclusive las de una suspensión líquida.¹⁹

Debido a esto, la naturaleza del comportamiento de un suelo puede ser clasificada en cuatro estados básicos según el contenido de humedad: sólido, semisólido, plástico y líquido tal y como se muestran en la figura 14.

Figura 14. **Límites de Atterberg**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 64.

5.1. **Límite líquido (AASHTO T89: Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils)**

Es conocido como el contenido de humedad, expresado en porcentaje, en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado plástico para pasar al estado líquido en donde el suelo toma las propiedades y apariencias de una suspensión.

¹⁹ RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Volumen 1. p. 28.

Para poder determinar este valor, se realiza un ensayo utilizando equipo especial conocido como Copa de Casagrande.

El procedimiento para realizar el ensayo es el siguiente:

- Tamizar, aproximadamente 300 g de suelo, a través del tamiz No. 40.
- Agregar una cantidad de agua controlada a la muestra tamizada para darle consistencia al suelo.
- Colocar aproximadamente entre 50 y 70 g de muestra en la copa y aplicarlo correctamente con ayuda de la espátula.
- Nivelar la pasta de suelo con la espátula hasta alcanzar aproximadamente 1 cm de profundidad en el centro de la copa.
- Separar el suelo de la copa, utilizando el ranurador, en dos mitades según el eje de simetría de la copa; quedando una ranura de un centímetro a lo largo de 13 mm aproximadamente.
- Se procede a girar la manivela del equipo para aplicar golpes de 1 cm de caída libre al material hasta que este sufra un cierre de 1 en la parte del centro.
- Tomar la humedad de cada mitad del suelo ensayado.

5.2. Límite plástico (AASHTO T90: Standard Method of Test for Determining the Liquid Limit of Soils)

Está definido como el contenido de humedad en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado semisólido y el estado plástico. En el estado semisólido el suelo tiene la apariencia de un sólido, aunque aún disminuye de volumen conforme va perdiendo humedad; por otro lado, en el estado plástico el suelo se comporta plásticamente.

El procedimiento para realizar el ensayo es el siguiente:

- Tamizar, aproximadamente 300 g de suelo, a través del tamiz No. 40.
- Agregar una cantidad de agua controlada a la muestra tamizada para darle consistencia al suelo.
- Moldear, con el suelo, cilindros de aproximadamente 3 mm de grosor utilizando las manos.
- El ensayo termina cuando los cilindros comienzan a presentar fracturas, grietas o desmenuzamiento en su superficie.
- Colocar de 15 a 20 cilindros en un tarro y tomar su humedad.

5.3. Límite de contracción (AASHTO T92: Standard Method of Test for Determining the Shrinkage Factors of Soils)

Se refiere al contenido de humedad abajo del cual el volumen del suelo ya no disminuye cuando éste se seca. En términos generales, es el contenido de humedad en el cual una masa de suelo se encuentra entre el estado sólido y semisólido.

5.4. Índice de plasticidad

Es la diferencia numérica entre los valores del límite líquido y del límite plástico de un suelo. Es un parámetro de plasticidad que mide de un modo muy claro el intervalo plástico. Tanto el límite líquido como el límite plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo. Por otro lado, el límite plástico depende generalmente de la cantidad de arcilla del suelo.

6. COMPACTACIÓN DE SUELOS

La compactación de suelos se define como la consolidación del suelo por la eliminación de aire, lo que requiere energía mecánica. Para poder medir el grado de compactación de un suelo se toma en cuenta el peso unitario seco del mismo.

Otra definición sostiene que se refiere a la densificación de los suelos mediante energía mecánica.²⁰ Esta puede implicar la modificación del contenido de humedad y la gradación del suelo.

El objetivo de la compactación es el mejoramiento de las propiedades de la masa de los suelos. Básicamente el fin primordial es obtener un suelo de tal manera que posea y mantenga un comportamiento mecánico adecuado y que tenga una duración correspondiente a la vida útil de la obra de infraestructura que se diseñe.

Dentro de las ventajas que se producen a partir de la compactación se pueden mencionar la reducción de los asentamientos, ya que se reduce la relación de vacíos; el aumento de la resistencia del suelo, debido a que aumenta el peso unitario seco del material; y reducción de la contracción, que va ligado a los asentamientos producidos.

²⁰ BOWLES, Joseph E. *Propiedades geofísicas de los suelos*. p. 186.

6.1. Variables que afectan el proceso de compactación de los suelos

Un suelo puede compactarse de diversas formas, y en cada situación se obtendrán resultados diferentes. De igual manera, un mismo método de compactación producirá resultados diferentes si se utilizan suelos distintos. Básicamente los resultados de un proceso de compactación dependen de los siguientes factores.

6.1.1. La naturaleza del suelo

El peso unitario seco máximo y el contenido de humedad óptimo (propiedades de gran importancia que se verán más adelante) varían dependiendo de la distribución del tamaño de grano, forma de los granos, tipo de minerales, entre otros.²¹

6.1.2. El método de compactación

Puede mencionarse tres diferentes métodos de compactación a nivel de laboratorio: por impactos, por amasado y por aplicación de carga estática. Actualmente también existen algunos equipos de laboratorio que permiten compactar muestras de suelo por medio de vibraciones, aunque su aplicación no es muy común.²²

6.1.3. La energía específica

Esta hace referencia a la energía que se aplica sobre el suelo por unidad de volumen durante el tipo de compactación que se utilice. Si se utilizan métodos

²¹ RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Volumen 1. p. 156.

²² *Ibíd.*

de impacto, la energía es fácil de determinar y depende de variables como el número de golpes con el martillo, número de capas del cilindro, peso del martillo, altura del martillo y volumen del molde. Por otro lado, si se utilizan métodos por aplicación de carga estática la determinación de la energía no es tan sencilla y considera factores como tamaño del molde, número de capas en las que se dispone el suelo, la presión que se le aplica a cada capa y el tiempo de aplicación de la carga. Finalmente, cuando se utilizan métodos de compactación por amasado se complica la evaluación de la energía específica ya que cada capa se compacta con un número diferente de aplicaciones de carga por lo que la energía varía.²³

6.1.4. El contenido de agua del suelo

Ralph R. Proctor observó que a medida que la humedad de una muestra de suelo aumentaba se obtenían pesos unitarios secos mayores del material compactado. Sin embargo, también observó que esa tendencia no se mantiene indefinidamente, sino que al llegar a cierto valor de humedad los pesos específicos secos comenzaban a disminuir.²⁴ Proctor concluyó que para determinado suelo y método de compactación existe un valor de humedad que produce el máximo peso volumétrico seco que es posible obtener para ese método de compactación.

²³ RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Volumen 1. p. 157.

²⁴ *Ibíd.*

6.1.5. El sentido en que se recorra la escala de humedades al efectuar la compactación

Este factor afecta sobre todo a los ensayos de compactación realizados en laboratorios. Los resultados obtenidos para un mismo suelo y tipo de compactación varían dependiendo de si se tratase de una muestra de suelo relativamente seca a la que se le va agregando agua o si se parte de un suelo húmedo, que se va secando según avanza el ensayo.²⁵

6.1.6. El contenido original de agua del suelo

Se refiere a la humedad del suelo en condiciones naturales, antes de añadirle o quitarle humedad para compactarlo en busca del contenido de humedad óptimo. En un suelo originalmente bastante seco, el agua que se vaya añadiendo produce mayor diferencia inmediata entre las condiciones de humedad interna y externa de los grumos que en otro que originalmente hubiese estado más húmedo.²⁶

6.1.7. La recompactación

Cuando no se dispone de suficiente material para hacer los diferentes ensayos de compactación de suelo, es común que en los laboratorios se utilice la misma muestra de suelo para los demás ensayos, esto conlleva a una recompactación del suelo. Esto es un gran inconveniente ya que si se trabaja con suelos recompactados los pesos unitarios secos que se obtienen son mayores

²⁵ RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Volumen 1. p. 157.

²⁶ *Ibíd.*

que los que se obtendrían con muestras vírgenes, de modo que con suelos recompactados los ensayos pueden dejar de ser representativos.²⁷

6.1.8. La temperatura

Es un factor muy importante a considerar ya que influye en el proceso de evaporación del agua incorporada en el suelo y de la condensación de la humedad ambiente en el mismo.²⁸

6.1.9. Otras variables

Existen otras variables a considerar que afectan la compactación de los suelos, las cuales están relacionadas con la energía específica aplicada. Factores como el número y espesor de capas en las que se coloca el suelo en los ensayos, así como el número de golpes durante el proceso de compactación son factores que influyen en los resultados obtenidos.²⁹

6.2. Ensayos de compactación de Proctor

La compactación de los suelos no fue reconocida ampliamente sino hasta 1933, año en el que Ralph Roscoe. Proctor publicó sus investigaciones sobre este tema, cuando se conocieron los factores que intervienen en la compactación. Proctor encontró que aplicando a un suelo cierta energía para compactarlo, el peso volumétrico obtenido varía con el contenido de humedad según una curva.³⁰

²⁷ RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Volumen 1. p. 158.

²⁸ *Ibíd.*

²⁹ *Ibíd.*

³⁰ CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 99.

Buscando una prueba de laboratorio que igualara los resultados obtenidos en el campo con los diferentes equipos de compactación disponibles en esa época, Proctor propuso la prueba de compactación que hoy lleva su nombre: prueba de Proctor.³¹

El ensayo de compactación de Proctor hace referencia a la determinación del peso volumétrico de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad. Este ensayo tiene por objeto determinar:

- El peso unitario seco ($\gamma_d \text{ máx}$) que puede alcanzar una muestra de suelo.
- El porcentaje de humedad óptima ($\%H_{\text{ópt}}$) a la que debe hacerse la compactación.

Existen cuatro procedimientos alternativos para realizar los ensayos de compactación de Proctor. El método A consiste en un molde de 4 pulgadas con material que pasa el tamiz No. 4, si 20 % o menos por peso es retenido por la malla No.4 y se debe compactar en 3 o 5 capas con 25 golpes cada una. El método B consiste en un molde de 6 pulgadas con material que pasa el tamiz 3/8 y se debe compactar en 3 o 5 capas con 56 golpes cada una. El método C consiste en un molde de 4 pulgadas con material que pasa el tamiz 3/4 de pulgada y se debe compactar en 3 o 5 capas con 25 golpes cada una. El método D consiste en un molde de 6 pulgadas con material que pasa el tamiz 3/4 de pulgada y se debe compactar en 3 o 5 capas con 56 golpes cada una.

³¹ CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. p. 99.

El procedimiento para realizar el ensayo de compactación de Proctor es el siguiente:

- Si la muestra está muy húmeda secar al aire libre o en un horno conveniente a una temperatura no mayor a 60 °C.
- Dependiendo del método a ensayar, tamizar por 1 1/2", 3/4", 3/8" o No. 4.
- Tomar cuatro especímenes (preferiblemente 5) de 2.3 kg para el método A y C, o 5. kg para el método B y D.
- Tomar el peso del cilindro sin el collarín.
- Anotar cada dato en la hoja de ensayo.
- Colocar el material sobre la bandeja y se le agrega humedad en diferentes porcentajes.
- Mezclar el material para homogenizar la humedad en toda la muestra de suelo.
- Compactar el suelo en 3 o 5 capas compactando con 25 o 56 golpes del martillo por capa, dependiendo del método a ensayar.
- Luego de compactar las 5 capas, se rebana el exceso de suelo con un rasador hasta formar una superficie plana.
- Registrar el peso del espécimen compactando y en el molde.
- Remover el material del molde para obtener el contenido de humedad, utilizando muestras representativas al centro del espécimen.
- Secar las muestras tomadas en os recipientes en horno durante 24 horas a una temperatura de aproximadamente 110 °C.
- Repetir el proceso hasta compactar el último espécimen.

6.2.1. Prueba Proctor Estándar

Está descrita por la norma AASHTO T99: Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 2,5 kg (5,5 lb) Rammer and a 305 mm (12 in) Drop y la norma ASTM D698: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standar Effort (12 400 ft-lbf/ ft³ (600 kN-m/m³)).

También se le conoce como Prueba de Proctor Normal. Se utiliza un martillo de 5 ½ libras, una caída libre de 12", 25 golpes y 3 capas a compactar. El molde de 4" o 6" de diámetro y volumen de 1/30 pie³ o 1/13,33 pie³.

6.2.2. Prueba Proctor Modificado

Está descrita por la norma AASHTO T180: 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 y la norma ASTM D1557: Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56 000 ftlbf/ ft³ (2 700 kN-m/m³)).

Se utiliza un martillo de 10 libras, una caída libre de 18", 25 golpes y 5 capas a compactar. El molde de 4" o 6" de diámetro y volumen de 1/30 pie³ o 1/13,33 pie³.

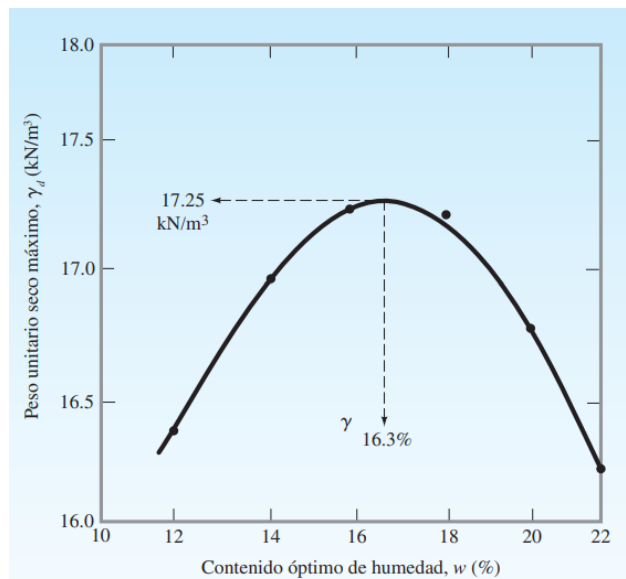
6.3. Curva de compactación y curva de saturación

La curva de compactación es una representación gráfica en la que se ve el cambio del peso unitario seco al compactar el suelo con diversos contenidos de

agua, utilizando varias muestras de un mismo tipo de suelo, cada una de las cuales proporciona un punto de la curva.³²

Sobre el eje de las abscisas se coloca el porcentaje de humedad para cada una de las muestras de suelo compactadas, mientras que en el eje de las ordenadas se coloca el peso unitario seco obtenido a cada contenido de humedad. Al unir los puntos con una línea es posible observar que existe un punto más alto sobre la gráfica. Ese punto en particular es el más importante, puesto que representa el peso unitario seco máximo ($\gamma_d \text{ máx}$) y la humedad a la que se produce o humedad óptima ($\%H_{\text{ópt}}$). Este último hace referencia al contenido de agua con el cual el método de compactación que se esté utilizando produce la máxima eficiencia.

Figura 15. **Curva de compactación**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 101.

³² RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Volumen 1. p. 158.

Que el peso unitario seco disminuya a partir del punto máximo o humedad óptima significa que el agua ocupa todos los vacíos que deberían ser llenados por partículas de suelo. El agua adicionada a partir de ese punto, lo único que hace es separar las partículas entre sí y disminuir la densidad.

En este caso se hace alusión a la curva de saturación (también conocida como curva de cero vacíos de aire). Es una representación gráfica de la relación entre el peso unitario seco, o densidad seca, de un suelo y su contenido de humedad correspondiente al 100 % de grado de saturación. Para un contenido de humedad determinado, se obtiene el peso unitario seco máximo teórico cuando no hay aire en los espacios vacíos. Esto es cuando el grado de saturación es total o del 100 % como se mencionó anteriormente.

Por tanto, el peso unitario seco con cero vacíos de aire está dado por:

$$\gamma_{cva} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + \%H G_s}$$

Donde:

γ_{cva} = peso unitario con cero vacíos de aire.

G_s = gravedad específica de sólidos del suelo.

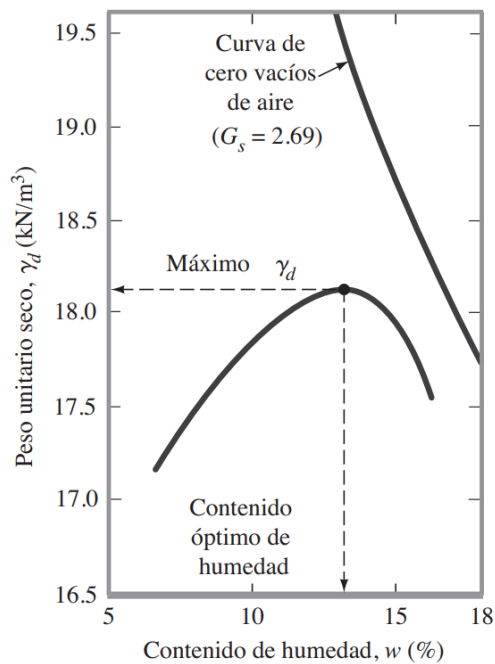
γ_w = peso unitario del agua.

$\%H$ = contenido de humedad.

Teóricamente la curva de compactación, en el punto del peso unitario seco máximo y humedad óptima, debería de alcanzar la curva de saturación con la gravedad específica del suelo ensayado. Sin embargo, esto no ocurre en la realidad debido a que no es posible expulsar todo el aire contenido en el suelo. Por consiguiente, la curva de compactación siempre debe quedar por debajo de

la curva de saturación. Si esto no sucede, existe la posibilidad de que los resultados obtenidos del ensayo de compactación no se ajusten a la realidad y puedan haberse cometido errores durante el procedimiento.

Figura 16. **Curva de compactación y curva de saturación**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 95.

6.4. Compactación en campo

La mayor parte de la compactación en campo se hace con rodillos. Existen cuatro tipos comunes de rodillos.

6.4.1. Rodillo de ruedas lisas (o rodillos de tambor liso)

Son adecuados para pruebas de rodado en explanadas y para la operación de acabado de rellenos con suelos arenosos y arcillosos. Proporcionan una cobertura de 100 % bajo las ruedas con presiones de contacto en tierra de 310 hasta 380 kN/m². No son adecuados para la producción de altos pesos unitarios de compactación cuando se utilizan en capas más gruesas.³³

Figura 17. **Rodillo de rueda lisa**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 105.

6.4.2. Rodillo con neumáticos de caucho

Son mejores en muchos aspectos que los rodillos de ruedas lisas. Los primeros son vagones con muy pesados con varias filas de neumáticos. Estos neumáticos están muy próximos entre sí, de cuatro hasta seis en fila. La presión de contacto debajo de las llantas puede oscilar desde 600 hasta 700 kN/m² que

³³ DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 105.

producen de 70 % a 80 % de cobertura. Los rodillos neumáticos se pueden utilizar para la compactación de suelo arenoso y arcilloso. La compactación se logra mediante la combinación de presión y acción de amasado.³⁴

Figura 18. **Rodillo con neumáticos de caucho**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 106.

6.4.3. **Rodillos compactadores**

Son tambores con un gran número de proyecciones. El área de cada una de estas proyecciones puede variar desde 25 hasta 85 cm². Los rodillos compactadores son más eficaces en la compactación de los suelos arcillosos. La presión de contacto en las proyecciones puede variar de 1 380 a 6 900 kN/m². Durante la compactación en campo, un pase inicial compacta la parte inferior de una elevación. Las partes superior y media de la elevación se compactan en una etapa posterior.³⁵

³⁴ DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 105.

³⁵ *Ibíd.*

Figura 19. **Rodillo compactador**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 106.

6.4.4. Rodillos vibratorios

Son muy eficientes en la compactación de suelos granulares. Los vibradores se pueden unir a ruedas lisas de caucho o a rodillos compactadores de suelo para proporcionar efectos de vibración en la tierra. La vibración se produce mediante la rotación de pesos fuera del centro.³⁶

6.5. Efecto de la compactación en las propiedades cohesivas del suelo

La estructura y las propiedades de ingeniería de los suelos cohesivos compactados dependen grandemente del método de compactación, del esfuerzo de compactación (energía específica), del tipo de suelo y del contenido de agua.

³⁶ DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 105.

Debido a que la compactación produce variaciones en la estructura de los suelos cohesivos, las características físicas también se ven afectadas. Una de ellas es el peso unitario seco (ver figura 19a): si una arcilla con determinado contenido de humedad es compactada del lado izquierdo de la humedad óptima poseerá una estructura floculante (una orientación aleatoria de partículas sueltas). En este momento, cada partícula de arcilla tiene una delgada capa de agua adsorbida y una capa más gruesa de agua viscosa de doble capa. Las partículas se mantienen unidas por atracción electroestática.³⁷

Cuando el contenido de humedad está próximo a la humedad óptima, las capas dobles difusas alrededor de las partículas se expanden, aumentando así la repulsión entre las partículas de arcilla y dando un menor grado de floclulación y un mayor peso unitario seco.³⁸

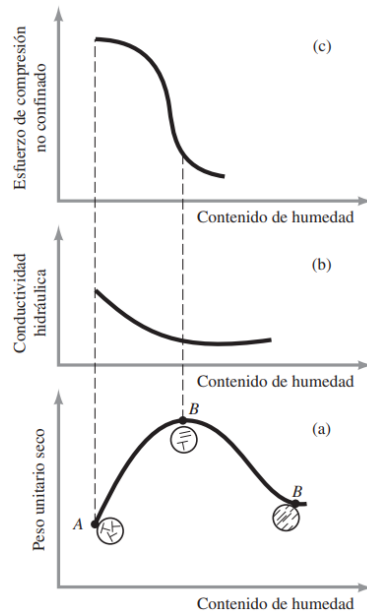
Por otro lado, un aumento del contenido de humedad hacia el lado derecho de la humedad óptima ocasionará una mayor expansión de las capas dobles y esto se traducirá en un incremento continuo de la repulsión entre las partículas. Esto le dará un grado aun mayor a la orientación de las partículas y una estructura más o menos dispersa. Sin embargo, el peso unitario seco disminuirá debido a que el agua añadida va a diluir la concentración de sólidos del suelo por unidad de volumen.³⁹

³⁷ DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 111.

³⁸ *Ibíd.* p. 112.

³⁹ *Ibíd.*

Figura 20. **Variación del peso unitario seco, conductividad hidráulica y esfuerzo de compresión**



Fuente: DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 112.

La conductividad hidráulica también se ve afectada debido a los esfuerzos de compactación (ver figura 20). Esta cambia con el contenido de humedad de moldeo en el que se lleva a cabo la compactación. En la figura se muestra, de forma general, la variación de la conductividad hidráulica con el peso unitario seco y el contenido de humedad de moldeo. La conductividad hidráulica disminuye con el aumento en el contenido de humedad de moldeo.⁴⁰

Por otro lado, la resistencia a la compresión en suelos arcillosos disminuye con el aumento del contenido de humedad de moldeo (ver figura 20). En el contenido de humedad óptimo de humedad aproximado hay una gran pérdida de fuerza. Esto quiere decir que si dos muestras son compactadas al mismo peso

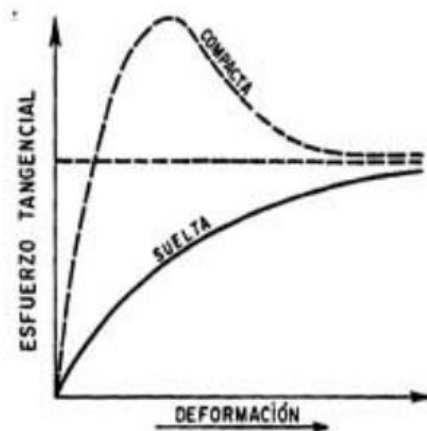
⁴⁰ DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 112.

unitario seco, una de ellas sobre el lado seco de la óptima (lado izquierdo de la curva de compactación) y la otra sobre el lado húmedo de la óptima (lado derecho de la curva de compactación), la muestra compactada sobre el lado seco de la óptima presentará una mayor resistencia.⁴¹

6.6. Propiedades mecánicas de las arenas compactadas

El comportamiento mecánico de una arena difiere en gran medida de si se tratase de la misma de forma compacta o suelta. Si se ensayara una probeta con arena suelta en un equipo de corte directo para obtener su resistencia al esfuerzo cortante se obtendría una gráfica esfuerzo-deformación de tipo plástica tal y como se ve en la curva continua de la figura 20. Para producir deformaciones crecientes se necesitan esfuerzos tangenciales crecientes.

Figura 21. Diferencia del comportamiento de la resistencia entre el estado compacto y suelto de una arena



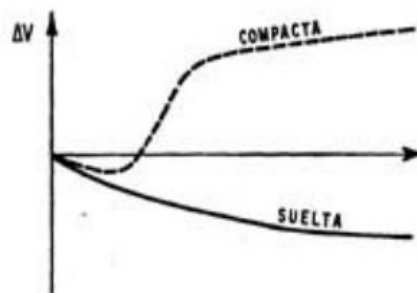
Fuente: RICO, Alfonso y DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. p. 207.

⁴¹ DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. p. 112.

Por otro lado, si se realizara el mismo ensayo, pero esta vez con la arena muy compacta, los resultados obtenidos se verían reflejados en la curva esfuerzo-deformación de línea discontinua de la figura 20. Al principio se necesita un esfuerzo creciente para aumentar la deformación, pero una vez que se sobrepasa el valor máximo del esfuerzo, este puede disminuir sin que la deformación deje de crecer (comportamiento frágil).

La diferencia de la resistencia también puede ser descrita en términos de estructuración. En una arena suelta la estructura inicial es floja e inestable y es fácil iniciar el movimiento relativo, pero este va produciendo estructuras cada vez más cerradas y la resistencia de la arena va creciendo en forma paulatina hasta cierto límite. Por el contrario, en una arena compacta es preciso no solo vencer el rozamiento entre los granos, sino obligarlos a girar y moverse, rodando unos sobre otros. Sin embargo, una vez que se ha roto la estructura compacta inicial, se facilita mucho el movimiento relativo.⁴²

Figura 22. **Diferencia del volumen durante la deformación entre el estado compacto y suelto de una arena**



Fuente: RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. p. 207.

⁴² RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Volumen 1. p. 207.

Además, las variaciones de volumen que sufre la muestra durante la deformación también son distintas para un suelo suelto o compacto (figura 21). El volumen de las arenas sueltas disminuye desde un principio, a causa de la destrucción de las inestables estructuras iniciales. En las arenas compactas hay, al principio, una ligera disminución de volumen por el aumento del nivel general de esfuerzos, pero en seguida el proceso de deformación produce un aumento de volumen cuya máxima velocidad corresponde al esfuerzo máximo.⁴³

6.7. Problemas especiales en la compactación de suelos

En el momento que se vaya a realizar un relleno es de suma importancia que el material de préstamo deba de ser utilizado de la misma forma en la que fue clasificado y ensayado en laboratorio, ya que se debe de tener cuidado que el relleno a utilizar sea apropiado para las condiciones del terreno.

La compactación de rellenos sanitarios es muy difícil. En estos casos, el objetivo principal es cubrir el material al final de cada día de operación con tierra compactada para evitar, en especial, los malos olores y la proliferación de bacterias, roedores e insectos. Sin embargo, después de un tiempo, es seguro que la materia orgánica se descomponga y produzca vacíos en el suelo aun cuando este fuera compactado. En este caso lo recomendable es clasificar los desechos existentes, aunque eso incurre en un alto costo.

Los suelos helados no deben de ser compactados ya que, con el tiempo, estos se deshelerán y se producirán suelos blandos debido a la reducción del volumen de agua en contraste a la condición inicial natural del suelo.

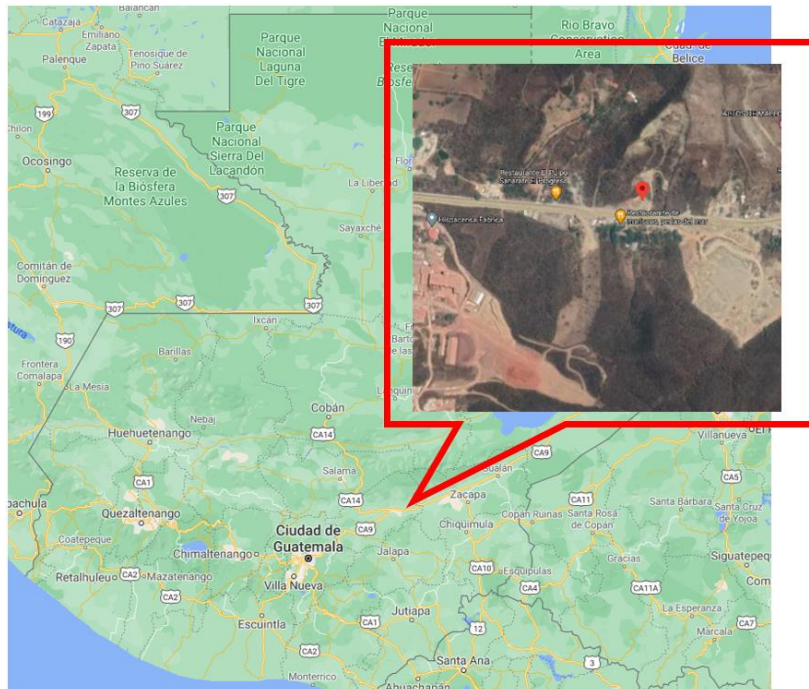
⁴³ RICO, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras, ferrocarriles y aeropistas*. Volumen 1. p. 207.

7. DESARROLLO EXPERIMENTAL

7.1. Material a utilizar

La localización del suelo en estado natural se encuentra aproximadamente a 58,7 km de la Ciudad Capital, en el municipio de Sanarate, del departamento El Progreso.

Figura 23. Ubicación del material utilizado



Fuente: elaboración propia, utilizando Google Maps.

El suelo utilizado consiste en una arena arcillosa con grava color café verdoso. De acuerdo al análisis granulométrico (ver anexo) se clasifica como un suelo SC según el Sistema de Clasificación Unificado y A-2-7 según el Sistema de Clasificación AASHTO.

Figura 24. **Material utilizado en estado natural**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

El material mezclado consiste en una combinación de material selecto y pedrín de 1/2". Su descripción es de una grava mal graduada con limo y arena color gris oscuro. De acuerdo al análisis granulométrico (ver anexo) se clasifica como un suelo GP-GM según el Sistema de Clasificación Unificado y A-1-A según el Sistema de Clasificación AASHTO.

Figura 25. **Material mezclado utilizado**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

7.2. **Equipo utilizado**

Para la realización de los ensayos granulométricos, el equipo utilizado fue el siguiente:

- Un juego de tamices.
- Máquina tamizadora.
- Taras para colocar el suelo.
- Balanza.
- Cepillo para eliminar residuos de suelo en los tamices.

Figura 26. **Equipo utilizado para el ensayo de granulometría**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

Para la realización de los ensayos de los límites de Atterberg, el equipo utilizado fue el siguiente:

- Copa de Casagrande.
- Ranurador.
- Tamiz No. 40.
- Cazuela de porcelana y apisonador.
- Tarros metálicos para determinar la humedad.
- Balanza.
- Probeta con agua.
- Horno capaz de mantener una temperatura de 110 °C.

Figura 27. **Equipo utilizado para la determinación de los límites de Atterberg**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

Para la realización de los ensayos de compactación de Proctor, el equipo utilizado fue el siguiente:

- Cilindro de compactación de Proctor de 6 pulgadas de diámetro.
- Martillo de compactación de 10 lb de peso y 18 pulgadas de caída.
- Horno capaz de mantener una temperatura de 110 °C.
- Tarros metálicos para determinar la humedad.
- Bandeja metálica para humedecer el suelo.
- Taras metálicas para colocar el suelo.
- Espátulas.
- Cucharón para mezclar.
- Regla de acero de 12 pulgadas.

Figura 28. **Equipo utilizado para el ensayo de compactación de Proctor**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

7.3. Preparación de las muestras

A continuación, se detallan los procedimientos que se siguieron para la preparación de las muestras a ensayar.

7.3.1. Suelo en estado natural (A-2-7)

Antes de proceder a la realización de los ensayos de compactación de Proctor, fue necesario realizar un cuarteado de muestra alterada para homogenizar todo el material a utilizar. Para esto fue necesario el uso de un cuarteador de muestras (ver figura 28). Además, se pasó todo el suelo por el tamiz de 3/4, como especifica el método D de la norma AASHTO T180. Todo el

material fue colocado en una carretilla, tamizado y colocado en cubetas para almacenarlo y utilizarlo en los ensayos posteriores (ver figura 29).

Figura 29. **Cuarteador de muestras**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 30. **Tamizado de la muestra de suelo**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

7.3.1.1. Ensayo de Proctor según la norma AASTHO T180

El ensayo se realizó tres veces para tener valores más precisos en los resultados obtenidos. Para la preparación de las muestras, se pesaron 5,5 kg de material ya tamizado para hacer cinco cilindros en cada ensayo. El contenido de humedad que se le agregó a cada punto fue de 2 %, 4 %, 6 %, 8 % y 10 %. Finalmente se realizó el ensayo de conformidad con la norma.

Figura 31. **Muestras de suelo en estado natural sin gravas separadas**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

7.3.1.2. Ensayo de Proctor por el método de separación de gravas

El ensayo se realizó tres veces para tener valores más precisos en los resultados obtenidos. El suelo se pasó por el tamiz No. 4 para separar las gravas de las arenas y finos y se determinó que el material posee aproximadamente 40 % de gravas en peso; posteriormente, las gravas se dejaron en saturación por veinticuatro horas. Para la realización del ensayo se eliminó el exceso de

humedad en las gravas para que solamente tuvieran la humedad superficial necesaria. Luego se pesó 5,5 kg de suelo en total para cada punto, con un porcentaje aproximado de 40 % gravas y el resto de arenas y finos. El contenido de humedad que se le agregó a cada punto fue de 2 %, 5 %, 8 %, 11 % y 14 % de las arenas y material fino. Primeramente, se colocaron las arenas y finos en la bandeja, se le agregó el contenido de agua respectivo y se mezcló para que la humedad fuera la misma en todo el suelo. Luego de esto se agregaron las gravas ya saturadas y se mezcló nuevamente para tener un suelo homogéneo. Finalmente se realizó el ensayo de conformidad con la norma.

Figura 32. **Muestras de suelo en estado natural con gravas separadas**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

7.3.2. Suelo mezclado (A-1-A)

En este caso, se pasó el material selecto por el tamiz No. 4 para retirar y desechar las gravas que pudiera tener (ya que solamente se utilizaron los finos y arenas de este suelo). Por otro lado, se pasó el piedrín por el tamiz No. 4 para separar las gravas de las arenas y finos que pudiera tener (pues solamente se utilizaron las gravas); luego se lavó el material para eliminar los finos impregnados en la superficie de las gravas y se dejó secar al sol para eliminar la humedad. Finalmente se mezclaron las gravas ya limpias el material selecto en una proporción del 40 % de gravas en peso, pues el suelo en estado natural tenía la misma distribución.

Figura 33. **Gravas en proceso de saturación**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

7.3.2.1. Ensayo de Proctor según la norma AASHTO T180

El ensayo se realizó tres veces para tener valores más precisos en los resultados obtenidos. Para la preparación de las muestras, se pesaron 5,5 kg de material ya tamizado para hacer cinco cilindros en cada ensayo. El contenido de humedad que se le agregó a cada punto fue de 3 %, 4 %, 5 %, 6 % y 7 %. Finalmente se realizó el ensayo de conformidad con la norma.

7.3.2.2. Ensayo de Proctor por el método de separación de gravas

El ensayo se realizó tres veces para tener valores más precisos en los resultados obtenidos. El suelo se pasó por el tamiz No. 4 para separar las gravas de las arenas y finos; posteriormente, las gravas se dejaron en saturación por veinticuatro horas. Para la realización del ensayo se eliminó el exceso de humedad en las gravas para que solamente tuvieran la humedad superficial necesaria. Luego se pesó 5,5 kg de suelo en total para cada punto, con un porcentaje aproximado de 40 % gravas y el resto de arenas y finos. El contenido de humedad que se le agregó a cada punto fue de 3 %, 5 %, 7 %, 10 % y 13 % de las arenas y material fino. Primeramente, se colocaron las arenas y finos en la bandeja, se le agregó el contenido de agua respectivo y se mezcló para que la humedad fuera la misma en todo el suelo. Luego de esto se agregaron las gravas ya saturadas y se mezcló nuevamente para tener un suelo homogéneo. Finalmente se realizó el ensayo de conformidad con la norma.

Figura 34. **Muestras de suelo mezclado con gravas separadas**



Fuente: elaboración propia, Laboratorio de Mecánica de Suelos, USAC.

7.4. Datos obtenidos

Luego de realizar los 12 ensayos de compactación de Proctor para los dos diferentes tipos de suelo, se obtuvieron los siguientes datos:

7.4.1. Suelo A-2-7 sin separar gravas, primer ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para primer ensayo de compactación de Proctor.

Tabla VI. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 sin separar gravas, primer ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	2		4		6		8		10	
P.B.H. (kg)	10,99		11,38		11,44		11,38		11,28	
TARA (kg)	6,51		6,51		6,51		6,51		6,51	
Tarro	S-C	S-D	S-EG	E-S-G	S-V	K-7	S-7	S-9	4-V	S-A
P.B.H. (g)	124,53	139,75	178,16	169,52	139,00	132,30	116,27	115,48	125,97	124,25
P.B.S. (g)	120,13	134,68	168,65	160,56	131,11	124,24	108,33	107,88	115,87	114,26
Tara (g)	32,29	31,99	32,05	30,96	32,8	31,97	34,76	33,83	32,89	31,04

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.2. Suelo A-2-7 sin separar gravas, segundo ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para segundo ensayo de compactación de Proctor.

Tabla VII. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 sin separar gravas, segundo ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	2		4		6		8		10	
P.B.H. (kg)	11,08		11,41		11,48		11,33		11,26	
TARA (kg)	6,49		6,49		6,49		6,49		6,49	
Tarro	T-3	S-3	S-6	S-4	M-2	S-9	S-8	S-12	S-7	A-1
P.B.H. (g)	145,83	140,33	139,20	135,50	144,23	145,03	145,87	141,09	121,98	125,98
P.B.S. (g)	140,93	135,33	132,46	129,48	135,92	136,66	135,62	131,34	112,98	116,56
Tara (g)	33,60	33,96	33,34	36,47	33,92	33,81	35,44	34,12	34,75	33,90

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.3. Suelo A-2-7 sin separar gravas, tercer ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para tercer ensayo de compactación de Proctor.

Tabla VIII. **Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 sin separar gravas, tercer ensayo**

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	2		4		6		8		10	
P.B.H. (kg)	11,17		11,44		11,52		11,40		11,27	
TARA (kg)	6,49		6,49		6,49		6,49		6,49	
Tarro	A-1	M-2	S-8	S-7	T-3	S-9	S-3	S-0	S-4	S-6
P.B.H. (g)	107,16	113,69	132,94	128,57	125,68	118,74	132,78	130,88	159,73	151,60
P.B.S. (g)	103,92	110,12	127,44	122,77	118,77	112,42	124,09	122,42	146,55	139,32
Tara (g)	33,91	33,91	35,43	34,74	33,61	33,82	33,97	34,90	36,45	33,34

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.4. Suelo A-2-7 separando gravas, primer ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para cuarto ensayo de compactación de Proctor.

Tabla IX. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 separando gravas, primer ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	2		5		8		11		14	
P.B.H. (kg)	11,14		11,41		11,46		11,42		11,33	
TARA (kg)	6,49		6,49		6,49		6,49		6,49	
Tarro	S-7	S-9	S-3	M-2	T-3	S-0	S-6	S-12	A-1	S-4
P.B.H. (g)	98,24	101,77	155,20	157,10	149,62	152,90	141,40	138,40	146,06	144,91
P.B.S. (g)	95,13	98,71	147,39	148,7	139,87	144,47	132,96	129,74	134,89	133,23
Tara (g)	34,76	33,83	34,00	33,90	33,63	34,92	33,30	34,20	33,94	36,48

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.5. Suelo A-2-7 separando gravas, segundo ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para quinto ensayo de compactación de Proctor.

Tabla X. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 separando gravas, segundo ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	2		5		8		11		14	
P.B.H. (kg)	11,06		11,32		11,41		11,40		11,33	
TARA (kg)	6,49		6,49		6,49		6,49		6,49	
Tarro	S-8	S-0	S-12	S-4	M-2	S-7	E-8	E-14	S-9	A-1
P.B.H. (g)	146,37	158,28	137,18	131,53	154,17	150,10	206,67	195,78	148,24	136,32
P.B.S. (g)	141,82	152,91	131,87	126,52	145,73	142,42	192,76	183,24	137,46	126,39
Tara (g)	35,42	34,92	34,12	36,47	33,92	34,74	45,88	45,90	33,82	33,91

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.6. Suelo A-2-7 separando gravas, tercer ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para sexto ensayo de compactación de Proctor.

Tabla XI. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-2-7 separando gravas, tercer ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	2		5		8		11		14	
P.B.H. (kg)	11,13		11,32		11,42		11,38		11,30	
TARA (kg)	6,49		6,49		6,49		6,49		6,49	
Tarro	S-6	S-0	M-2	S-12	S-4	A-1	T-3	S-9	S-7	S-3
P.B.H. (g)	104,56	122,08	138,72	150,27	164,41	164,20	141,07	163,58	163,76	156,86
P.B.S. (g)	101,58	118,35	132,67	143,71	155,64	155,57	131,30	152,18	152,09	144,75
Tara (g)	33,35	34,91	33,94	34,12	36,48	33,93	33,59	33,83	34,74	33,93

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.7. Suelo A-1-A sin separar gravas, primer ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para séptimo ensayo de compactación de Proctor.

Tabla XII. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A sin separar gravas, primer ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	3		4		5		6		7	
P.B.H. (kg)	10,95		11,10		11,15		11,18		11,20	
TARA (kg)	6,48		6,48		6,48		6,48		6,48	
Tarro	S-6	S-4	A-1	S-12	T-3	S-0	S-8	S-7	S-3	S-9
P.B.H. (g)	141,64	154,60	146,30	152,52	127,23	141,74	102,96	105,71	126,90	140,99
P.B.S. (g)	135,08	146,42	137,39	144,04	118,38	133,05	96,00	97,79	116,08	127,97
Tara (g)	33,43	36,35	34,01	34,11	33,65	34,96	35,41	34,65	33,89	33,96

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.8. Suelo A-1-A sin separar gravas, segundo ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para octavo ensayo de compactación de Proctor.

Tabla XIII. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A sin separar gravas, segundo ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	3		4		5		6		7	
P.B.H. (kg)	11,03		11,09		11,17		11,20		11,30	
TARA (kg)	6,49		6,49		6,49		6,49		6,49	
Tarro	M-2	S-0	T-3	A-1	S-3	S-6	S-9	S-8	S-7	S-4
P.B.H. (g)	118,73	122,44	113,86	132,90	130,33	142,05	156,94	157,40	148,61	147,96
P.B.S. (g)	112,98	116,49	107,54	124,93	122,44	131,90	143,52	145,03	134,02	132,77
Tara (g)	33,93	34,95	33,65	24,00	33,90	33,43	33,93	35,43	34,66	36,35

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.9. Suelo A-1-A sin separar gravas, tercer ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para noveno ensayo de compactación de Proctor.

Tabla XIV. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A sin separar gravas, tercer ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	3		4		5		6		7	
P.B.H. (kg)	11,01		11,10		11,19		11,23		11,24	
TARA (kg)	6,48		6,48		6,48		6,48		6,48	
Tarro	T-3	M-2	S-4	A-1	S-9	S-3	S-6	S-7	S-12	S-0
P.B.H. (g)	128,22	131,32	152,04	145,42	150,99	142,39	163,39	149,10	148,71	161,16
P.B.S. (g)	120,29	123,74	141,78	135,71	139,42	131,87	149,69	136,20	135,55	147,15
Tara (g)	33,60	33,97	36,38	34,00	33,78	34,29	33,50	34,67	34,13	34,94

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.10. Suelo A-1-A separando gravas, primer ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para décimo ensayo de compactación de Proctor.

Tabla XV. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A separando gravas, primer ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	3		5		7		10		13	
P.B.H. (kg)	10,90		10,94		10,99		11,03		11,07	
TARA (kg)	6,48		6,48		6,48		6,48		6,48	
Tarro	S-0	S-8	S-6	S-9	A-1	S-3	T-3	S-12	S-7	M-2
P.B.H. (g)	131,88	129,46	129,76	133,03	135,76	120,87	126,49	128,86	146,59	132,80
P.B.S. (g)	126,29	124,27	123,93	127,10	128,71	114,57	118,46	121,25	136,13	122,93
Tara (g)	34,94	35,46	33,49	33,96	34,00	33,91	33,63	34,13	34,67	33,93

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.11. Suelo A-1-A separando gravas, segundo ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para onceavo ensayo de compactación de Proctor.

Tabla XVI. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A separando gravas, segundo ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	3		5		7		10		13	
P.B.H. (kg)	10,94		11,01		11,05		11,08		11,12	
TARA (kg)	6,48		6,48		6,48		6,48		6,48	
Tarro	S-3	S-6	S-4	A-1	S-9	S-7	S-0	T-3	S-12	M-2
P.B.H. (g)	130,32	136,11	136,28	129,18	122,82	121,04	136,89	132,03	150,71	138,65
P.B.S. (g)	124,37	129,97	129,49	122,48	114,87	114,04	126,89	123,03	139,02	127,50
Tara (g)	33,90	33,47	36,38	34,01	33,93	34,70	34,94	33,64	34,14	33,95

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.4.12. Suelo A-1-A separando gravas, tercer ensayo

A continuación, se presentan los datos obtenidos para doceavo ensayo de compactación de Proctor.

Tabla XVII. Datos obtenidos del ensayo del suelo A-1-A separando gravas, tercer ensayo

No. de columna	1		2		3		4		5	
Intervalo de humedad	3		5		7		10		13	
P.B.H. (kg)	10,88		10,97		11,07		11,12		11,13	
TARA (kg)	6,48		6,48		6,48		6,48		6,48	
Tarro	T-3	M-2	S-4	S-0	A-1	S-7	S-12	S-6	S-8	S-3
P.B.H. (g)	143,01	151,35	158,29	148,83	148,10	135,71	157,95	157,95	152,58	164,26
P.B.S. (g)	135,71	144,04	148,97	139,93	139,41	126,75	145,87	145,87	140,26	151,06
Tara(g)	33,62	33,93	36,37	34,92	33,92	34,68	34,15	34,15	33,38	33,90

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.5. Cálculos efectuados

Los cálculos necesarios para obtener la curva de compactación (γ_d vs. %H) son los siguientes:

- Obtener la masa del suelo compactado restando la masa del cilindro, al de la masa del cilindro + suelo compactado.
- Dividir esta masa entre el volumen del molde para obtener la densidad húmeda del suelo, o peso unitario húmedo (γ). Repetir estos dos puntos para cada muestra compactada.

- Una vez que los contenidos de humedad hayan sido determinados para cada muestra compactada, calcular la densidad seca correspondiente (γ_d) con la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + \%H}$$

- Dibujar la gráfica γ_d vs $\%H$ para obtener de ella el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptimo (ver contenido de curva de compactación).

7.6. Resultados obtenidos

Luego de realizar los cálculos correspondientes al ensayo de compactación de Proctor para ambas muestras de suelo y de los dos procedimientos a seguir, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla XVIII. **Resultados obtenidos de los ensayos de compactación de Proctor del suelo A-2-7**

	Suelo A-2-7					
	Sin separar gravas			Separando gravas		
	1er. Ensayo	2do. Ensayo	3er. Ensayo	1er. Ensayo	2do. Ensayo	3er. Ensayo
γ_d (kg/m ³)	2152,29	2185,13	2202,75	2169,11	2165,90	2167,51
γ_d (lbf/t ³)	134,35	136,40	137,50	135,40	135,20	135,30
$\%H$	7,5	7,35	7,1	7,5	6,4	6,9

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Tabla XIX. **Resultados obtenidos de los ensayos de compactación de Proctor del suelo A-1-A**

	Suelo A-1-A					
	Sin separar gravas			Separando gravas		
	1er. Ensayo	2do. Ensayo	3er. Ensayo	1er. Ensayo	2do. Ensayo	3er. Ensayo
γ_d (kg/m ³)	2012,91	2010,83	2002,50	1970,14	1985,68	1970,62
γ_d (lb/ft ³)	125,65	125,52	125,00	122,98	123,95	123,01
%H	8,5	9,5	7,10	6,9	7,4	10

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Tabla XX. **Promedio de los resultados del ensayo de compactación de Proctor**

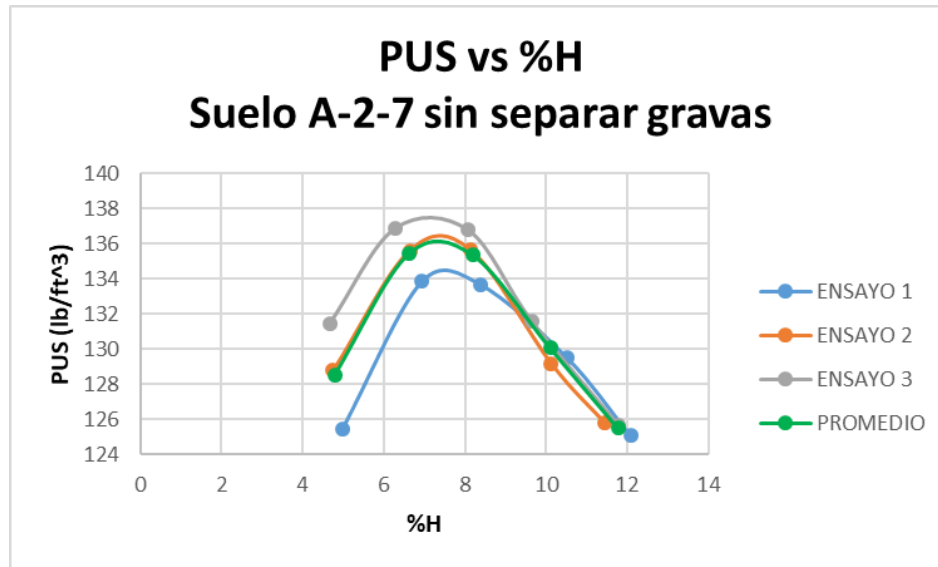
	Suelo A-2-7		Suelo A-1-A	
	Sin separar gravas	Separando gravas	Sin separar gravas	Separando gravas
γ_d (kg/m ³)	2180,06	2167,51	2008,75	1975,48
γ_d (lb/ft ³)	136,08	135,3	125,39	123,31
%H	7,32	6,93	8,37	8,1

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

7.7. Gráficas obtenidas

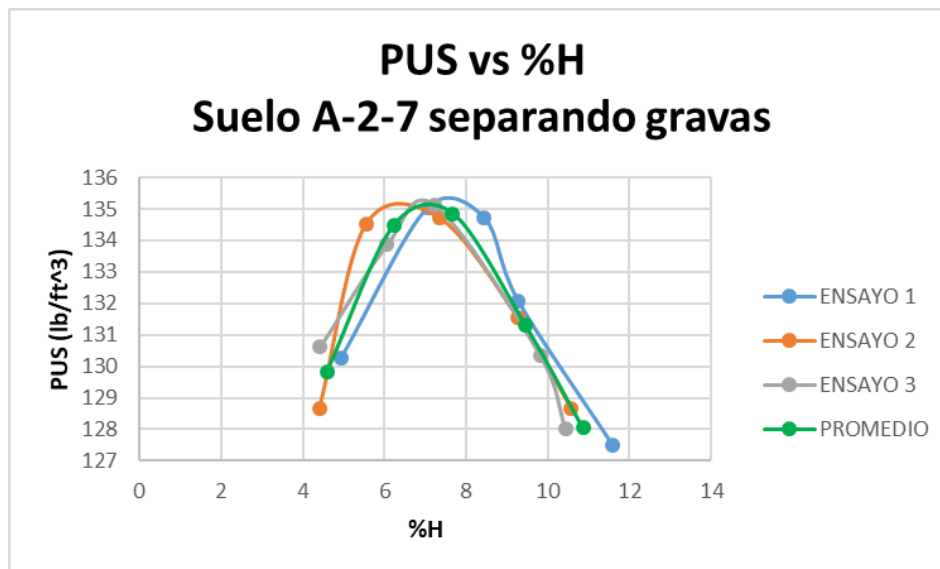
Con base en los cálculos efectuados se realizaron las gráficas de Peso Unitario Seco vs Porcentaje de Humedad para visualizar el comportamiento de estas características del suelo.

Figura 35. Gráfica PUS vs %H para el suelo A-2-7 sin separar las gravas



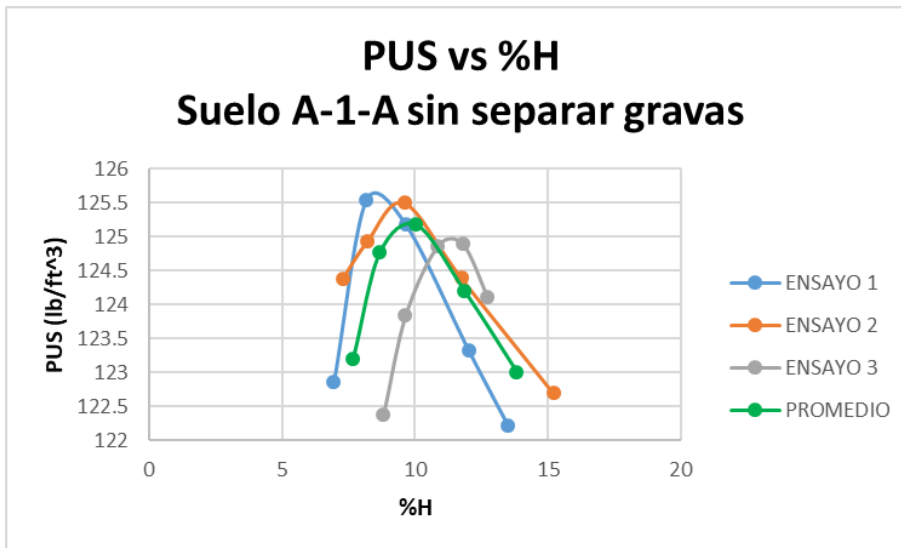
Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Figura 36. Gráfica PUS vs %H para el suelo A-2-7 separando las gravas



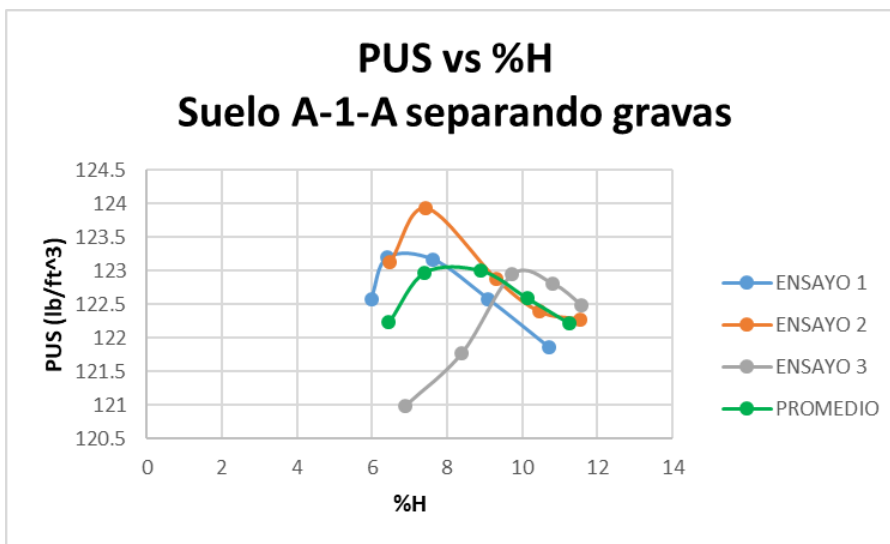
Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Figura 37. **Gráfica PUS vs %H para el suelo A-1-A sin separar las gravas**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

Figura 38. **Gráfica PUS vs %H para el suelo A-1-A separando las gravas**



Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

8. COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Luego de realizar los cálculos y obtener los resultados correspondientes a los ensayos de compactación de Proctor para ambas muestras de suelo y de los dos procedimientos a seguir, se determinó la variación porcentual respecto al procedimiento normado.

Tabla XXI. **Error relativo del procedimiento de separación de gravas con respecto al procedimiento de la norma AASHTO T180**

	Suelo A-2-7	Suelo A-1-A
γ_d	0,5757 %	1,6563 %
%H	5,3279 %	3,2258 %

Fuente: elaboración propia, utilizando Microsoft Excel 2016.

La cantidad de agua que puede retener un suelo está directamente relacionada con la porosidad (n) del mismo. Como se sabe, la porosidad es una medida de espacios vacíos en un material que está representada por la razón entre el volumen de vacíos y el volumen total del material (V_v/V). Contrariamente a lo que se creería por simple inspección, la porosidad de un suelo aumenta cuanto más pequeño es el tamaño del grano. En otras palabras, las gravas tienen menor porosidad que las arenas; y estas, a su vez, que las arcillas. Esto puede comprobarse analizando la permeabilidad de un suelo. La permeabilidad de un material es la capacidad que este tiene de transmitir un fluido, en este caso agua. Un suelo será más permeable cuando sea más poroso y estos poros sean de gran tamaño y estén conectados.

Si se analiza lo anterior se puede determinar que si se vierte cierta cantidad de agua a un material granular las gravas de este se humedecerán y al cubrir su superficie con determinada humedad dejarán escurrir el agua y no la retendrán. Por otro lado, al ser más porosas las arcillas y tener poros más pequeños la velocidad con la que escurre el agua es mucho más lenta ya que tienden a retener el líquido, mas no a absorberla.

El supuesto que se tiene es que, al tener mayor porosidad, el material fino de una muestra de suelo tiende a requerir mayor cantidad de agua para humedecerse que las gravas del mismo. Esto provoca que al momento de agregar una cantidad de agua al suelo este no se humedezca de forma homogénea, pues el material fino retendrá una humedad mayor.

Según los resultados obtenidos, para ambos tipos de suelo (A-2-7 y A-1-A) tanto el peso específico seco máximo como la humedad óptima fueron inferiores cuando se realizó el método empírico de separación de gravas. Esto da un indicador de que sí existe un grado de incidencia de la proporción de tamaño de granos de un suelo en los resultados del ensayo de compactación de Proctor. Debido a esto, la distribución de la humedad en el suelo no es equitativa y aunque la diferencia de humedad entre gravas y el resto del material sea pequeña sí existe por más que se trate de homogenizar la humedad del suelo durante el ensayo.

A nivel de laboratorio, la precisión de los datos debe ser muy exacta. Una variación del peso específico seco máximo del 0,58 % o 1,66 % o una variación de la humedad óptima de 5,33 % o 3,23 % podría describir suelos totalmente distintos, aunque se consideren que las variaciones son mínimas. Sabiendo que los resultados del ensayo de compactación de Proctor sirven para determinar el %CBR y que este a su vez sirve para el diseño de espesores de pavimentos, es

indispensable tener valores precisos que describan la naturaleza del suelo, ya que se pretende usar estos materiales como bases y sub bases en el diseño y construcción de pavimentos.

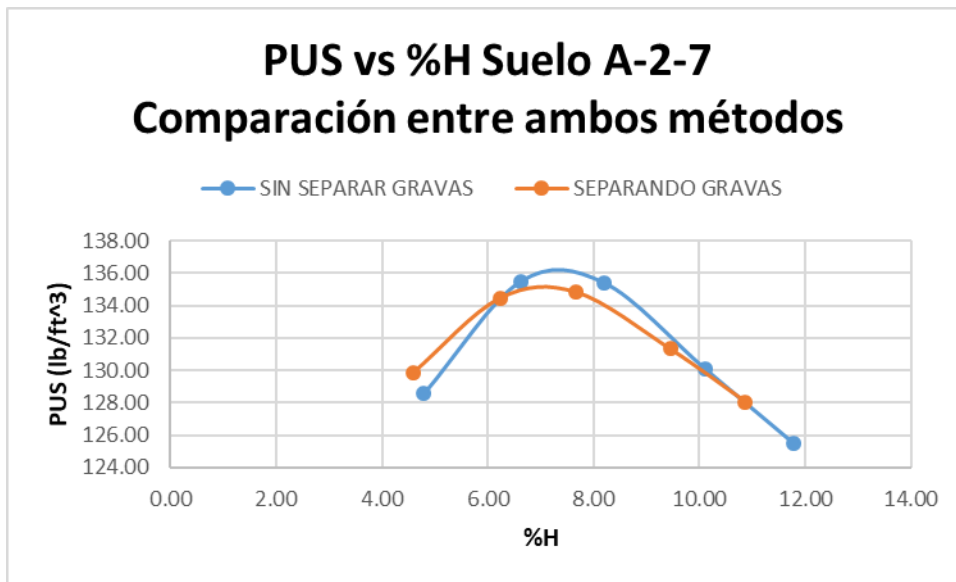
A diferencia de los resultados de laboratorio, la interpretación de los mismos en la práctica es un poco distinta y está sujeta al criterio de cada ingeniero, por lo que no se deben tomar como verdades absolutas.

Cuando se trabaja en campo, de igual manera una variación del peso específico seco máximo del 0,58 % o 1,66 % realmente no es significativa, al igual que una variación de la humedad óptima de 5,33 % o 3,23 %. Sabiendo que al momento de compactar las bases y sub bases de un pavimento estos deben de tener la humedad óptima, es muy difícil que todo el material presente la humedad especificada por el ensayo, más aún tratándose de tramos de carretera de grandes extensiones. Además, los diseños de pavimentos contemplan estas posibles variaciones para que no repercutan en el diseño final y en la construcción y mantenimiento de los mismos.

Como se puede observar en la Figura 39, el comportamiento tanto del peso unitario y humedad fue prácticamente el mismo. Como se mencionó anteriormente, las variaciones que existen son pequeñas y para este caso se pueden considerar como despreciables. La variación del peso unitario seco máximo y de la humedad óptima fue de 0,78 lb/ft³ y 0,39 %, respectivamente. Por otro lado, para el suelo que fue mezclado, las variaciones fueron mayores como se puede observar en la Figura 40. La variación del peso unitario seco máximo y de la humedad óptima fue de 2,08 lb/ft³ y 1,67 %, respectivamente. Las variaciones mayores en el suelo A-1-A pueden deberse a su naturaleza, pues fue el suelo mezclado en donde las características del grano fino y las gravas eran

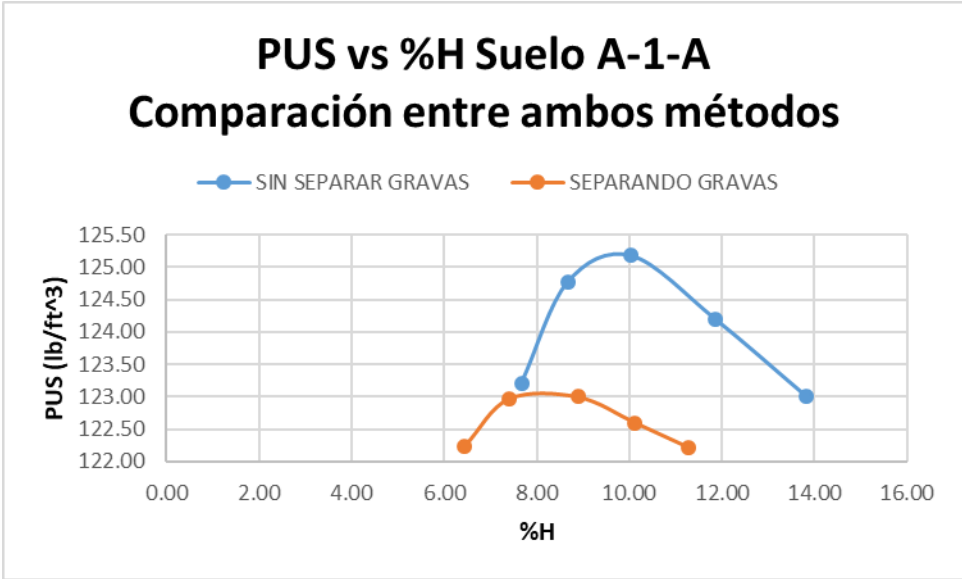
naturalmente distintas; mientras que en el suelo A-2-7, el suelo era el mismo en toda su granulometría ya que fue tomada la muestra en estado natural.

Figura 39. **Comparación entre gráficas PUS vs %H para el suelo A-2-7 para ambos métodos**



Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Excel 2016.

Figura 40. **Comparación entre gráficas PUS vs %H para el suelo A-1-A para ambos métodos**



Fuente: elaboración propia utilizando Microsoft Excel 2016.

CONCLUSIONES

1. De acuerdo con el análisis granulométrico y el Sistema de Clasificación AASHTO, el suelo en estado natural que se utilizó consiste en una grava o arena arcillosa y se clasifica como un suelo A-2-7. De manera similar, el suelo fabricado consiste en una combinación de material selecto y piedrín de 1/2", dando como resultado fragmentos de piedra, grava y arena; este se clasifica como un suelo A-1-A.
2. Para poder realizar el ensayo de compactación de Proctor se utilizaron dos suelos diferentes, uno en estado natural (A-2-7) y uno elaborado a partir de la combinación de dos materiales distintos dando así un suelo tipo A-1-A, según el Sistema de Clasificación AASHTO. El comportamiento de este último después de ser compactado es excelente, pues es estable en tiempo seco y húmedo. Estos suelos están constituidos por fragmentos de piedra, grava y/o arena o arena arcillosa.
3. Luego de realizar los ensayos de compactación de Proctor por el método D descrito por la norma AASHTO T180 tanto para el suelo A-2-7 como para el A-1-A, se determinó que los pesos unitarios secos máximos para el método normado y el método de separación de gravas fueron de 136,08 lb/ft³, 135,3 lb/ft³, 125,39 lb/ft³ y 123,31 lb/ft³, respectivamente. Realmente no existió una diferencia significativa que pudiera describir un comportamiento diferente del suelo.
4. Se determinó que la humedad óptima, tanto para el suelo A-2-7 como para el A-1-A usando el método de compactación normado y el método de

separación de gravas, fue de 7,32 %, 6,93 %, 9,77 % y 8,1 %, respectivamente. Realmente la diferencia no es tan significativa en aplicaciones en campo, pues es difícil mantener la misma humedad en todo el trayecto de carretera que se desee construir. Sin embargo, a nivel de laboratorio esa pequeña diferencia sí puede ser significativa, pues los resultados del ensayo de compactación de Proctor sirven para el cálculo del %CBR que a su vez sirve para el diseño de espesores de pavimentos.

5. El peso unitario seco máximo y la humedad óptima de un suelo tienen un aumento en sus valores dependiendo de la distribución de tamaños de grano del mismo. A partir de esto, se determinó que para suelos granulares los valores obtenidos varían cuando en el proceso de humedecer las muestras se separan las gravas del material restante y se dejan en saturación.
6. Las gráficas de los ensayos de compactación de Proctor para el suelo fabricado A-1-A presentaron un comportamiento más alargado que las gráficas del suelo natural A-2-7. A pesar de que el agua tome el papel de lubricante entre partículas, al tratarse de dos materiales diferentes mezclados, existen puntos donde la fricción entre los granos impide el deslizamiento de unas partículas sobre otras y, por consiguiente, se densifica el suelo formado, pues la naturaleza de ambos suelos es distinta.
7. Cuando se trabajen suelos granulares es más preciso realizar una separación de gravas para realizar el ensayo de compactación de Proctor, pues los resultados obtenidos se apegan más a la realidad. A pesar de que la variación de los mismos no sea de mucha influencia, sí puede repercutir al momento de diseñar pavimentos para carreteras.

8. Los resultados de los ensayos de límites de Atterberg demostraron que el límite líquido y el índice de plasticidad para el suelo natural A-2-7 es de 42.2 y 19.3, respectivamente, clasificando al suelo como CL donde se encuentran arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas y arcillas magras. Por otro lado, debido a la granulometría del suelo fabricado A-1-A, este no tiene cohesión por lo que no presenta límite líquido ni índice de plasticidad, clasificando el suelo como ML donde se encuentran limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas o limos arcillosos con poca plasticidad.

RECOMENDACIONES

1. Utilizar cualquier de los dos suelos tanto para capas superficiales, bases o sub bases, pues los cambios de volumen son muy pequeños debido a que no presentan demasiada plasticidad.
2. Utilizar el método empírico de separación de gravas para realizar los ensayos de compactación de Proctor cuando se dictamine que el material a utilizar la elaboración de bases y sub bases en carreteras sea granular.
3. Realizar un estudio complementario usando el método empírico de separación de gravas para diferentes porcentajes de material grueso. Esto con el objeto de determinar el comportamiento del suelo cuando el porcentaje de gravas es distinto al 40 % y establecer un procedimiento de ensayo para que los resultados obtenidos sean lo más precisos y cercanos a la realidad.
4. Realizar pruebas para desarrollar formas alternas de trabajar el ensayo de compactación de Proctor en suelos granulares utilizando metodologías que permitan tomar en cuenta la proporción de los tamaños de granos del material.
5. Desarrollar el diseño de un tramo corto de carretera utilizando los resultados obtenidos del ensayo normado y de la metodología empírica de separación de gravas para determinar si la distribución de gravas de un suelo granular realmente afecta en el diseño de pavimentos.

6. Realizar un análisis complementario en suelos diferentes como mezclas de gravas y arenas, con poco o nada de material fino, con otro tipo de agregado grueso e incluso con algunos tipos de suelos plásticos para determinar si las variaciones en los resultados del ensayo de compactación de Proctor son significativos.
7. Continuar con el proceso de comparación a través de los ensayos de CBR para determinar las propiedades mecánicas de los suelos además de las características físicas que se establecieron.
8. Utilizar siempre la clasificación de los suelos por varios métodos, ya que así se pueden conocer las características físicas y propiedades mecánicas a través de la teoría y observación.

BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO T180-01: 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. 2022. 22 p.
2. BLÁSQUEZ BAÑON, Luis; BEVIÁ GARCÍA, José F. *Manual de carreteras. Tomo 2. Construcción y mantenimiento*. Chile. 2004. 328 p.
3. BOWLES, Joseph E. *Propiedades geofísicas de los suelos*. Colombia: McGraw-Hill. 1982. 490 p.
4. CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 5a. ed. México: Editorial Limusa. 2004. 650 p.
5. DAS, Braja M. *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. 4a. ed. México: Editorial Cengage Learning. 2013. 636 p.
6. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008. 510 p.
7. JUAREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRIGUEZ, Alfonso. *Mecánica de suelos. Tomo 1. Fundamentos de la mecánica de suelos*. México: Editorial Limusa. 2005. 644 p.

8. RICO RODRIGUEZ, Alfonso; DEL CASTILLO, Hermilo. *La ingeniería de suelos en las vías terrestres: carreteras, ferrocarriles y aeropistas. Volumen 1*. México: Editorial Limusa. 1976. 459 p.
9. SAGÜÉS, Patricia. *Propiedades de los suelos compactados*. Trabajo de investigación. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Buenos Aires. Laboratorio de Mecánica de Suelos. (s.f.). 8 p.
10. SÁNCHEZ CORONA, Carlos Yair. *Evolución de los registros de resistividad y su aplicación en la estimación de la saturación de fluidos (agua e hidrocarburos)*. Trabajo de graduación de Ing. Petrolera. Facultad de Ingeniería, Universidad de Nacional Autónoma de México, 2012. 127 p.
11. TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B. *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. 2a. ed. España: Editorial El Ateneo. 1973. 722 p.
12. VILLAROEL CARRASCO., Carmen Gloria. *Compactación de suelos*. Chile: Laboratorio Nacional de Vialidad. Sección Geotecnia. 2016. 33 p.

ANEXOS

Anexo 1. Ensayos de límites de Atterberg



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



INFORME No. 380 S.S.A.

O.T.: 40,996

No. 19032

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona

Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"

Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG

Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Ciudad de Guatemala

FECHA: lunes, 8 de noviembre de 2021

RESULTADOS:

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	CLASIFICACION *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	42.2	19.3	CL	Arena arcillosa con grava color café verdoso
2	2	N.P.	N.P.	ML	Grava mal graduada con limo y arena color gris oscuro

(*) CLASIFICACION SEGÚN CARTA DE PLASTICIDAD

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.



Atentamente,



Vo.Bo.
Ing. Omar Enrique Medardo Méndez
JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS




Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC


FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltránena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 2. Análisis granulométrico, muestra 1



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

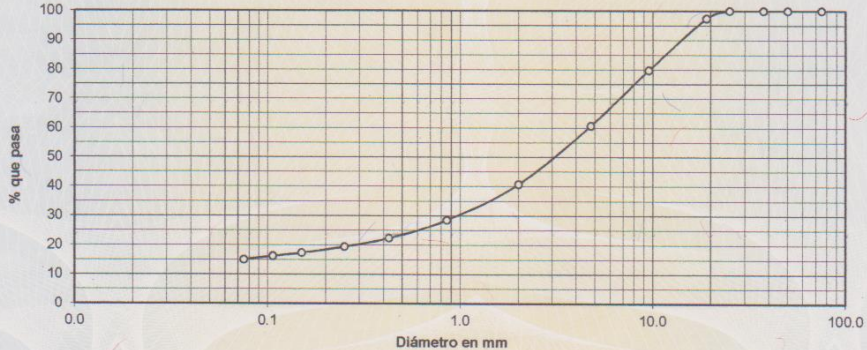


USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

Informe No.: 281 S.S.A. O.T.: 40,996 No. 19033

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona
 Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico con tamices y lavado previo
 Norma: ASTM D6913-04
 Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"
 Ubicación: Ciudad de Guatemala
 Fecha: lunes, 8 de noviembre de 2021

Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100.00	10	2.00 mm	40.67
2"	50 mm	100.00	20	850 µm	28.49
1 1/2"	37.5 mm	100.00	40	425 µm	22.30
1"	25 mm	100.00	60	250 µm	19.39
3/4"	19.0 mm	97.42	100	150 µm	17.30
3/8"	9.5 mm	79.76	140	106 µm	16.15
4	4.75 mm	60.76	200	75 µm	15.02

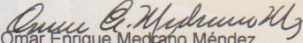



Descripción del suelo: Arena arcillosa con grava color café verdoso

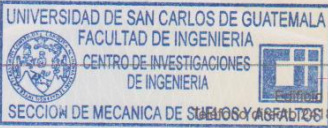
Clasificación:	S.C.U.: SC	% de Grava: 39.24	D10: *
	P.R.A.: A-2-7	% de Arena: 45.73	D30: 0.93 mm
		% de finos: 15.02	D60: 4.60 mm

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.
 * Diámetro efectivo no aplica.


Atentamente,


 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS


 Inga. Telma Maricela Cano Morales
 DIRECTORA CIIUSAC



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
SECCION DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTOS




UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
Centro de Investigaciones de Ingeniería
DIRECCION GUATEMALA, C.A.


FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
9-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 3. **Ensayo de compactación 1, muestra 1 sin separar gravas**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



INFORME No. 382 S.S.A.

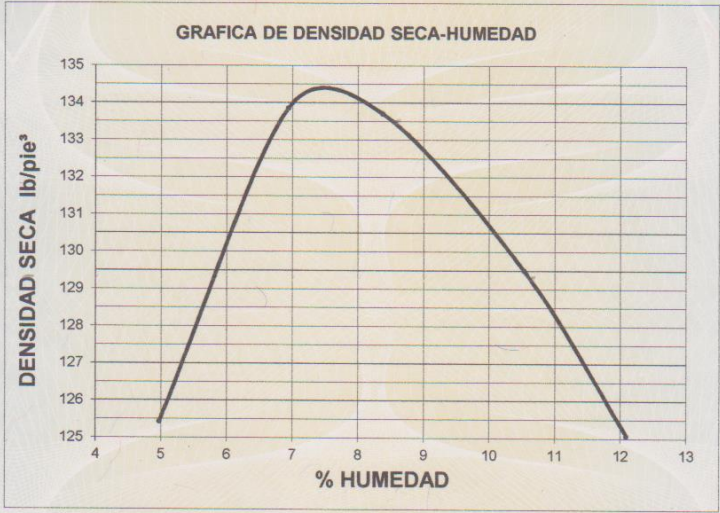
O.T.: 40,996

No. 19034

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
 Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"

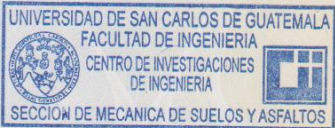
Ubicación: XXXXXXXXXX Ciudad de Guatemala
 Fecha: lunes, 08 de noviembre de 2021 Muestra: Gravas sin separar #1

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
5	125.5
6	130.5
7	134.0
7.5 (Peak)	134.35
8	133.5
9	131.5
10	129.5
11	127.5
12	125.5

Descripción del suelo: Arena arcillosa con grava color café verdoso
 Densidad seca máxima γ_d : 2,152.29 Kg/m³ 134.35 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 7.50 %
 Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.



Atentamente,

Omar Enrique Medrano Méndez
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS



Va.Bo.

Telma Marcela Cano Morales
 Inga. Telma Marcela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC

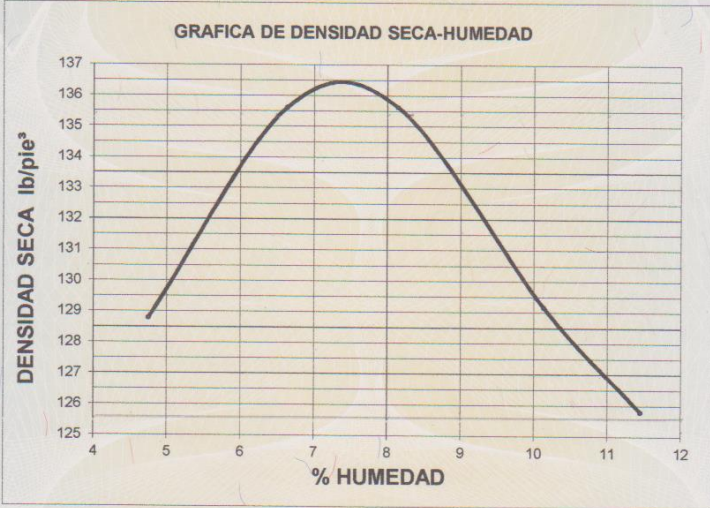
FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
 Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 4. Ensayo de compactación 2, muestra 1 sin separar gravas

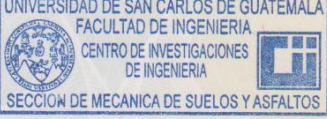



	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	
INFORME No. 383 S.S.A.		O.T.: 40,996
		No. 19035
Interesado:	Sergio Andrés Paz Barahona	Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
Asunto:	ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180	
Proyecto:	Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"	
Ubicación:	[Redacted] Ciudad de Guatemala	
Fecha:	lunes, 08 de noviembre de 2021	Muestra: Gravas sin separar #2

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
4.5	128.5
5.5	132.5
6.5	135.5
7.35	136.40
8.5	134.5
9.5	131.5
10.5	128.5
11.5	126.5


Descripción del suelo:	Arena arcillosa con grava color café verdoso	
Densidad seca máxima γ_d :	2,185.13 Kg/m ³	136.40 lb/ft ³
Humedad óptima H_{op} :	7.35 %	
Observaciones:	Muestra proporcionada por el interesado.	

 UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA FACULTAD DE INGENIERIA CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA SECCION DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTOS	Atentamente,	
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez JEFE SECCION MECANICA DE SUELOS Y ASFALTOS		 Inga. Telma Marcela Cano Morales DIRECTORA CII/USAC


FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Beltránena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 5. **Ensayo de compactación 3, muestra 1 sin separar gravas**



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



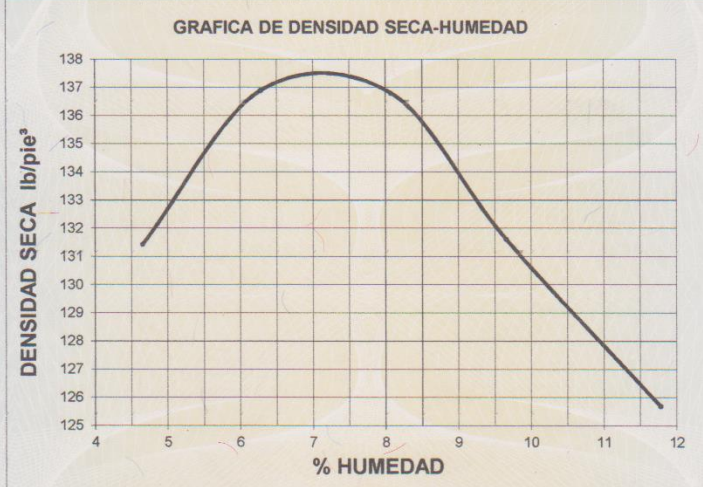
USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME No. 384 S.S.A. O.T.: 40,996 **No. 19036**

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
 Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"


Ubicación: Ciudad de Guatemala
 Fecha: lunes, 08 de noviembre de 2021 Muestra: Gravas sin separar #3

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
4.5	131.5
5.5	136.5
6.5	137.5
7.1	137.5
8.0	136.5
9.0	133.5
10.0	130.5
11.0	127.5
11.5	125.5


Descripción del suelo: Arena arcillosa con grava color café verdoso
 Densidad seca máxima γ_d : 2,202.75 Kg/m³ 137.50 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 7.10 %
 Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
SECCION DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Atentamente,

Vo.Bo.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
Centro de Investigaciones de Ingeniería
DIRECCION - GUATEMALA, C. A.

Omar Enrique Méndez Méndez
Ing. Omar Enrique Méndez Méndez
JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Teima Maricela Cano Morales
Inga. Teima Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 6. Ensayo de compactación 1, muestra 1 separando gravas

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	 USAC TRICENTENARIA Universidad de San Carlos de Guatemala
INFORME No. 385 S.S.A.		O.T.: 40,996
		No. 19037
Interesado:	Sergio Andrés Paz Barahona	Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
Asunto:	ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180	
Proyecto:	Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"	
Ubicación:	Ciudad de Guatemala	
Fecha:	lunes, 08 de noviembre de 2021	Muestra: Gravas separadas #1

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD

% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
5.0	130.2
6.0	133.2
7.0	135.2
7.5	135.4
8.0	135.2
9.0	133.2
10.0	131.2
11.0	129.2
11.5	127.8

Descripción del suelo:	Arena arcillosa con grava color café verdoso	
Densidad seca máxima γ_d :	2,169.11 Kg/m ³	135.40 lb/ft ³
Humedad óptima Hop.:	7.50 %	
Observaciones:	Muestra proporcionada por el interesado.	


Atentamente,

 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez .Vo.Bo. JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS	 Inga. Telma Maricela García Morales DIRECTORA CII/USAC
---	---


FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltrarena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 7. Ensayo de compactación 2, muestra 1 separando gravas



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME No. 386 S.S.A.

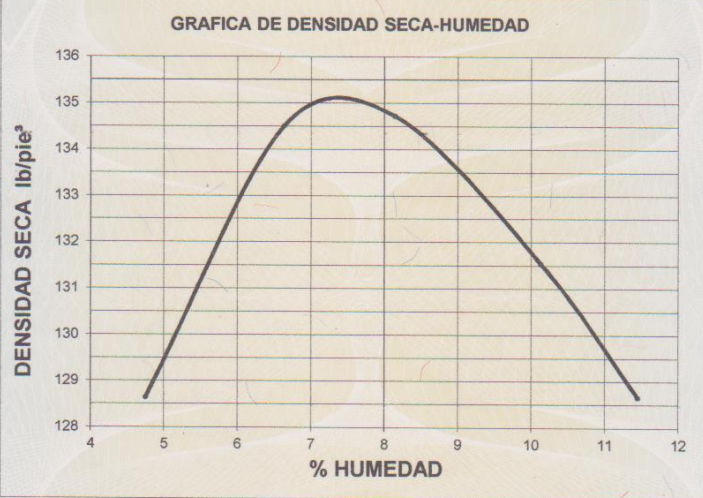
O.T.: 40,996

No. 19038

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
 Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"

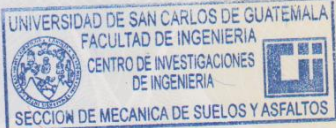
Ubicación: XXXXXXXXXX Ciudad de Guatemala
 Fecha: lunes, 08 de noviembre de 2021 Muestra: Gravas separadas #2

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD




% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
4.5	128.5
5.5	132.5
6.5	134.5
7.5	135.20
8.5	134.5
9.5	132.5
10.5	130.5
11.5	128.5

Descripción del suelo: Arena arcillosa con grava color café verdoso
 Densidad seca máxima γ_d : 2,165.90 Kg/m³ 135.20 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 6.40 %
 Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.



Atentamente,

Omar E. Medina Méndez
 Vo.Bo. Ing. Omar Enrique Medina Méndez
 JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS




Teima Maricela Cano Morales
 Inga. Teima Maricela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
 Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 8. Ensayo de compactación 3, muestra 1 separando gravas

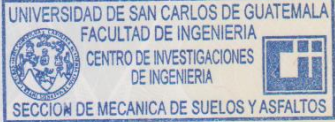

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	
INFORME No. 387 S.S.A.		O.T.: 40,996
		No. 19039
Interesado:	Sergio Andrés Paz Barahona	Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
Asunto:	ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180	
Proyecto:	Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"	
Ubicación:	[Redacted] Ciudad de Guatemala	
Fecha:	lunes, 08 de noviembre de 2021	Muestra: Gravas separadas #3

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% Humedad	Densidad Seca (lb/ft³)
4.5	130.5
5.0	132.0
6.0	134.0
6.90	135.30
8.0	133.5
9.0	131.5
10.0	129.5
10.5	128.0


Descripción del suelo:	Arena arcillosa con grava color café verdoso	
Densidad seca máxima γ_d :	2,167.51 Kg/m ³	135.30 lb/ft ³
Humedad óptima Hop.:	6.90 %	
Observaciones:	Muestra proporcionada por el interesado.	

	Atentamente,	
<i>Omar E. Medrano Méndez</i> Ing. Omar Enrique Medrano Méndez JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS	Vo.Bo.	<i>Telma Maricela Cano Morales</i> Inga. Telma Maricela Cano Morales DIRECTORA CI/USAC


FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltrarena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 9. Análisis granulométrico, muestra 2



CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



Informe No.: 388 S.S.A. O.T.: 40,996

No. 19040

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona

Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico con tamices y lavado previo

Norma: ASTM D6913-04

Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN

Ubicación: Ciudad de Guatemala

Fecha: lunes, 8 de noviembre de 2021

Análisis con Tamices:

Tamiz	Abertura	% que pasa	Tamiz	Abertura	% que pasa
3"	75 mm	100.00	10	2.00 mm	37.27
2"	50 mm	100.00	20	850 µm	31.89
1 1/2"	37.5 mm	100.00	40	425 µm	25.12
1"	25 mm	100.00	60	250 µm	19.46
3/4"	19.0 mm	95.78	100	150 µm	14.70
3/8"	9.5 mm	55.87	140	106 µm	12.37
4	4.75 mm	42.44	200	75 µm	10.43



Descripción del suelo: Grava mal graduada con limo y arena color gris oscuro

Clasificación: S.C.U.: GP-GM % de Grava: 57.56 D10: *
P.R.A.: A-1-a % de Arena: 32.01 D30: 0.68 mm
% de finos: 10.43 D60: 10.0 mm

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.
* Diámetro efectivo no aplica.

Atentamente,

Enrique Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS

Telma Mariela Cano Morales
Inga. Telma Mariela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERIA
CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
SECCION DE MECANICA DE SUELOS Y ASFALTOS



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
Centro de Investigaciones de Ingeniería
GUATEMALA, C.A.
DIRECCION CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERIA -USAC-
Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
telefono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 10. Ensayo de compactación 1, muestra 2 sin separar gravas

 **CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA**
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

 **USAC**
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME No. 389 S.S.A. O.T.: 40,996 **No. 19041**

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"

Ubicación: Ciudad de Guatemala
Fecha: lunes, 08 de noviembre de 2021 Muestra: Grava sin separar #1

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/pe ³
7	122.8
8	125.0
8.50	125.65
9	125.2
10	124.2
11	123.2
12	122.2
13	121.2
13.5	120.2

Descripción del suelo: Grava mal graduada con limo y arena color gris oscuro
Densidad seca máxima γ_d : 2,012.91 Kg/m³ 125.65 lb/pe³
Humedad óptima Hop.: 8.50 %
Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,


Ing. Omar Enrique Medrano Méndez Vo.Bo.
JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS


Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 11. Ensayo de compactación 2, muestra 2 sin separar gravas

	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	 USAC TRICENTENARIA Universidad de San Carlos de Guatemala
---	--	--

INFORME No. 390 S.S.A. O.T.: 40,996 **No. 19042**

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"

Ubicación: Ciudad de Guatemala
Fecha: lunes, 08 de noviembre de 2021 Muestra: Grava sin separar #2

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
7.5	124.5
8.5	125.2
9.5	125.5
10.5	125.0
11.5	124.5
12.5	124.0
13.5	123.5
14.5	123.0
15.5	122.5

Descripción del suelo: Grava mal graduada con limo y arena color gris oscuro
Densidad seca máxima γ_d : 2,010.83 Kg/m³ 125.52 lb/ft³
Humedad óptima Hop.: 9.50 %
Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.


Atentamente,

 Ing. Omar Enrique Méndez Méndez JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS	Vo.Bo. Inga. Telma Maricela Cano Morales DIRECTORA CII/USAC
--	---


FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltrarena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 12. Ensayo de compactación 3, muestra 2 sin separar gravas



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME No. 391 S.S.A. O.T.: 40,996 No. 19043

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
 Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"


Ubicación: XXXXXXXXXX Ciudad de Guatemala
 Fecha: lunes, 08 de noviembre de 2021 Muestra: Grava sin separar #3

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD




% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
8.5	122.5
9.0	123.5
9.5	124.2
10.0	124.8
10.5	125.2
11.0	125.4
11.5	125.0
12.0	124.5
12.5	124.0

Descripción del suelo: Grava mal graduada con limo y arena color gris oscuro
 Densidad seca máxima γ_d : 2,002.50 Kg/m³ 125.00 lb/ft³
 Humedad óptima Hop.: 7.10 %
 Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.



Atentamente,

Omar Enrique Medrano Méndez Vo.Bo.
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS



Telma Maricela Cano Morales
 Inga. Telma Maricela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
 Edificio Emilio Beltrarena, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 13. Ensayo de compactación 1, muestra 2 separando gravas

 **CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA**
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

 **USAC**
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME No. 392 S.S.A. O.T.: 40,996 No. 19044

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"

Ubicación: Ciudad de Guatemala
Fecha: lunes, 08 de noviembre de 2021 Muestra: Gravas separadas #1

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD




% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft ³
6.0	122.6
6.9	123.3
8.0	123.0
10.5	121.8

Descripción del suelo: Grava mal graduada con limo y arena color gris oscuro
Densidad seca máxima γ_d : 1,970.14 Kg/m³ 122.98 lb/ft³
Humedad óptima Hop.: 6.90 %
Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

 Vo.Bo.
Ing. Omar Enrique Mejano Méndez
JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS


Inga. Telma Maricela Cano Méndez
DIRECTORA CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 14. Ensayo de compactación 2, muestra 2 separando gravas


	CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA FACULTAD DE INGENIERIA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA	
INFORME No. 393 S.S.A.		O.T.: 40,996
		No. 19045
Interesado:	Sergio Andrés Paz Barahona	Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
Asunto:	ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180	
Proyecto:	Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"	
Ubicación:	[Redacted] Ciudad de Guatemala	
Fecha:	lunes, 08 de noviembre de 2021	Muestra: Gravas separadas #2

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
6.5	123.1
7.0	123.8
7.4	123.95
8.0	123.7
9.0	123.0
10.0	122.5
11.0	122.3
11.5	122.3

Descripción del suelo:	Grava mal graduada con limo y arena color gris oscuro	
Densidad seca máxima γ_d :	1,985.68 Kg/m ³	123.95 lb/ft ³
Humedad óptima Hop.:	7.40 %	
Observaciones:	Muestra proporcionada por el interesado.	

	Atentamente,	
 Ing. Omar Enrique Méndez Méndez JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS	Vo.Bo.	 Inga. Telma Maricela Cano DIRECTORA CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
Edificio Emilio Beltrarena, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

Anexo 15. Ensayo de compactación 3, muestra 2 separando gravas



**CENTRO DE INVESTIGACIONES DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

INFORME No. 394 S.S.A.

O.T.: 40,996

No. 19046

Interesado: Sergio Andrés Paz Barahona Proctor Estándar: () Norma: A.A.S.H.T.O. T-99
 Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN. Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.H.T.O. T-180
 Proyecto: Trabajo de graduación "COMPARACIÓN DEL PESO UNITARIO SECO MEDIANTE EL ENSAYO DE PROCTOR MODIFICADO SEGÚN LA NORMA AASHTO T180 MÉTODO D CON UN MÉTODO EMPÍRICO DE SEPARACIÓN DE GRAVAS"

Ubicación: Ciudad de Guatemala
 Fecha: Lunes, 08 de noviembre de 2021 Muestra: Gravas separadas #3

GRAFICA DE DENSIDAD SECA-HUMEDAD



% HUMEDAD	DENSIDAD SECA lb/ft³
7	121.0
8	121.5
9	122.2
10	123.0
11	122.8
12	122.4

Descripción del suelo: Grava mal graduada con limo y arena color gris oscuro

Densidad seca máxima γ_d : 1,970.62 Kg/m³ 123.01 lb/ft³

Humedad óptima Hop.: 10.00 %

Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.



Atentamente,

Omar Enrique Medrano Méndez Vo.Bo.
 Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
 JEFE SECCIÓN MECÁNICA DE SUELOS Y ASFALTOS



Teima Marcela Carrero Morales
 Inga. Teima Marcela Carrero Morales
 DIRECTORA CII/USAC

FACULTAD DE INGENIERÍA -USAC-
 Edificio Emilio Beltranena, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo 2418-9115 y 2418-9121. Planta 2418-8000 Exts. 86253 y 86252
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería.

