



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

**MANUAL OPERATIVO DEL APARATO DE GLOBO DE HULE ASTM D 2167, ANÁLISIS
COMPARTIVO Y DESCRIPTIVO CON EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA ASTM D 1556
PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO**

Axel Antonio Guzmán Abril

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, junio de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANUAL OPERATIVO DEL APARATO DE GLOBO DE HULE ASTM D 2167, ANÁLISIS
COMPARTIVO Y DESCRIPTIVO CON EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA ASTM D 1556
PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

AXEL ANTONIO GUZMAN ABRIL

ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, JUNIO DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvira Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR	Ing. Alan Giovani Cosillo Pinto
EXAMINADOR	Ing. Rafael Enrique Morales Ochoa
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

MANUAL OPERATIVO DEL APARATO DE GLOBO DE HULE ASTM D 2167, ANÁLISIS COMPARTIVO Y DESCRIPTIVO CON EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA ASTM D 1556 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 15 de noviembre de 2011.



Axel Antonio Guzman Abril



Guatemala, 29 de noviembre de 2012

Ingeniero
Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles
Facultad de Ingeniería, USAC
Guatemala

Ing. Melini

Por medio de la presente informo a usted que he asesorado y revisado el trabajo de graduación titulado **"MANUAL OPERATIVO DEL APARATO DE GLOBO DE HULE ASTM D 2167, ANÁLISIS COMPARATIVO Y DESCRIPTIVO CON EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA ASTM D 1556 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO"**, el cual fue presentado por el estudiante Axel Antonio Guzmán Abril.

El trabajo aporta importantes resultados, así como conclusiones y recomendaciones en lo que se refiere al manejo y uso del aparato de globo de hule y cono de arena.

Dicho trabajo cumple con lo establecido y reconociendo la importancia del tema, doy mi respectiva aprobación, agregando que lo encuentro completamente satisfactorio.

Sin otro particular, me suscribo de usted atentamente,

OMAR ENRIQUE MEDRANO MENDEZ
INGENIERO CIVIL
CÓLEGIADO No. 6842

Omar E. Medrano Méndez
Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos, CII

Asesor

OMAR ENRIQUE MEDRANO MENDEZ
INGENIERO CIVIL
CATEDRÁTICO



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
26 de febrero de 2013

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **MANUAL OPERATIVO DEL APARATO DE GLOBO DE HULE ASTM D 2167, ANÁLISIS COMPARATIVO Y DESCRIPTIVO CON EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA ASTM D 1556 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Axel Antonio Guzmán Abril, quien 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

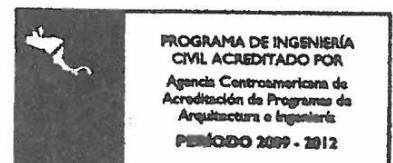

Ing. Civil Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador del Área de Materiales y
Construcciones Civiles



FACULTAD DE INGENIERIA
AREA DE MATERIALES Y
CONSTRUCCIONES CIVILES
USAC

/bbdeb.

Más de 130 Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





USAC
TRICENTENARIA
 Universidad de San Carlos de Guatemala

<http://civil.ingenieria.usac.edu.gt>

Universidad de San Carlos de Guatemala
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 Escuela de Ingeniería Civil



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Omar Enrique Medrano Méndez y del Coordinador del Área de Materiales y Construcciones Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Axel Antonio Guzmán Abril, titulado **MANUAL OPERATIVO DEL APARATO DE GLOBO DE HULE ASTM D 2167, ANÁLISIS COMPARATIVO Y DESCRIPTIVO CON EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA ASTM D 1556 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO** , da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

Hugo Leonel Montenegro Franco
 Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, junio de 2013.

/bbdeb.

Mas de **134** años de Trabajo Académico y Mejora Continua



Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 410.2013

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **MANUAL OPERATIVO DEL APARATO DE GLOBO DE HULE ASTM D 2167, ANÁLISIS COMPARATIVO Y DESCRIPTIVO CON EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA ASTM D 1556 PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO**, presentado por el estudiante universitario **Axel Antonio Guzmán Abril**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 14 de junio de 2013

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Es la fuente de mi vida, mi inspiración y la fuerza que me impulsa a seguir adelante, sin Él cual nada de esto hubiera sido posible y por El cual obtengo este éxito tan grande. Todo se lo debo a El
- Mis padres** Antonio Guzmán Carranza y Lorena Abril de Guzmán, porque me brindaron su apoyo incondicional y siempre fomentaron la lucha y la entrega para obtener grandes logros.
- Mis hermanos** Gabriela Guzmán Abril y Fernando Guzmán Abril, siempre a mi lado dándome ánimo y apoyo.
- Mi abuela** Clara Luz Abril Aguilar (q.e.p.d.), por sus consejos inagotables y fuentes de sabiduría, sus constantes oraciones, bendiciones y por su gran amor que brindó cada día de su vida. Te amo y sé que me escuchas en el cielo.
- Mi abuela** Mary Carranza, porque siempre estuvo pendiente de mí y mi desarrollo, por sus bendiciones. Nunca dejó de incentivar me para conseguir mis metas.

Mi bisabuela

Marina Turcios, nunca dejó de confiar en mí. Me impulso a seguir con mis metas hasta alcanzarlas y siempre darle la honra a Dios, un ejemplo de vida.

Mis amigos

Con los cuales lleve esta lucha, y con éxito logramos culminar nuestra carrera.

AGRADECIMIENTOS A:

- Dios** Por sobre todas las cosas Él es el que me dio la sabiduría, paciencia, perseverancia para luchar por mis metas y sueños.
- Mis padres** Antonio Guzmán y Lorena Abril por el sacrificio y esfuerzo para brindarme la educación que el día de hoy es un sueño cumplido, por su amor y dedicación, por todo lo que me han dado.
- Mi asesor** Omar Enrique Medrano Méndez, por su inmensa colaboración y guía para culminar mi carrera.
- Laboratoristas** En especial a José Istupe y Fernando Revolorio. Por su inmensa colaboración en todo el trabajo que requirió cada ensayo del presente trabajo.
- Amigos** Juan Rivera, Ángel Gonzales, Jonathan Sandoval, Ricardo González, André Juárez, Rafael Ávila, Francisco Mazat, Diego Nájera, Rubén Larrañaga, Mario Maldonado, entre otros.
- Familia Grady** Por sus innumerables consejos para impulsarme a terminar este proceso, motivándome a dar siempre más y buscar siempre en todo lo que haga seguir la voluntad del creador.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XXI
1. IMPORTANCIA DE LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD <i>IN SITU</i>	1
1.1. Métodos más utilizados	2
1.1.1. Método del Cono de Arena (ASTM D 1556)	3
1.1.2. Método del Globo de Hule (ASTM D 2167)	4
1.1.3. Método del Densímetro Nuclear (ASTM D 2922 y D 3017).....	4
1.2. Otros métodos	5
1.2.1. Método del Densímetro de Membrana	6
1.2.2. Método del Cono Gigante.....	6
1.2.3. Método mediante bloques	6
2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO POR EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA.....	7
2.1. Consideraciones generales del método.....	7
2.2. Descripción del ensayo.....	8
2.3. Significado y aplicaciones.....	9
2.4. Equipo	9

2.4.1.	Consideraciones generales del equipo	10
2.4.2.	Calibración	14
2.4.2.1.	Calibración del aparato de cono de arena	14
2.5.	Procedimiento	16
2.6.	Cálculos generales.....	20
3.	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD EN CAMPO POR EL MÉTODO DE GLOBO DE HULE	23
3.1.	Consideraciones generales del método	23
3.2.	Descripción del ensayo de globo de hule.....	24
3.3.	Significado y aplicaciones	24
3.4.	Equipo	25
3.4.1.	Consideraciones generales del equipo	25
3.4.2.	Manual de uso.....	30
3.4.2.1.	Modelos.....	30
3.4.2.2.	Ensayos de aplicación.....	32
3.4.2.3.	Aparato de globo de hule	32
3.4.2.4.	Accesorios de calibración.....	34
3.4.2.5.	Medidas específicas.....	35
3.4.2.6.	Forma de uso	36
3.4.2.7.	Procedimiento	37
3.4.2.8.	Consideraciones generales	42
3.5.	Cálculos generales.....	42
4.	DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO POR MEDIO DEL DENSÍMETRO NUCLEAR	45
4.1.	Consideraciones generales.....	45
4.2.	Descripción del ensayo del densímetro nuclear	46

4.3.	Significado y aplicaciones.....	46
4.4.	Procedimientos de determinación	49
4.4.1.	Retro-dispersión	50
4.4.2.	Transmisión directa	51
4.4.3.	Colchón de aire.....	53
4.5.	Equipo	55
4.5.1.	Elementos.....	55
4.5.2.	Modelos	56
4.5.2.1.	Modelo Troxler 3440.....	57
4.5.2.2.	Modelo Troxler 3430.....	58
4.5.3.	Calibración del equipo	59
4.5.3.1.	Respuesta de calibración	59
4.5.3.2.	Curvas de calibración	60
4.5.3.3.	Precisión del equipo	61
4.5.3.4.	Normalización.....	62
4.5.3.5.	Criterios de evaluación	62
4.5.4.	Métodos de operación segura	63
4.6.	Elementos radioactivos utilizados en el método	66
4.6.1.	Cesio 137.....	67
4.6.2.	Americio 241.....	67
4.6.3.	Berilio.....	68
4.6.4.	Límites de radiación.....	68
4.7.	Accidentes comunes en la utilización del equipo.....	69
4.7.1.	Posibles causas.....	69
4.7.2.	Incidentes de pérdida o robo de la fuente radiactiva	70
4.7.3.	Accidentes debido al transporte.....	70
4.7.4.	Accidentes de explosión e incendio.....	71
4.7.5.	Primeros auxilios/casos de emergencia	71

4.7.6.	Consideraciones de uso seguro	72
4.8.	Conclusión	73
5.	COMPACTACIÓN DE SUELOS	75
5.1.	Generalidades y fundamentos de la compactación de suelos.....	75
5.2.	Características de la compactación.....	75
5.3.	Compactación en campo.....	76
5.3.1.	Compactación en subbase	77
5.3.2.	Compactación en base.....	77
5.4.	Clasificación de las máquinas de compactación	78
5.4.1.	Por presión estática.....	79
5.4.2.	Por impacto	79
5.5.	Compactación de suelos no cohesivos	81
5.6.	Compactación con cohesión moderada	81
5.7.	Compactación de arcillas	82
5.8.	Humedad óptima de compactación	83
5.9.	Descripción del ensayo de Proctor.....	83
5.9.1.	Proctor estándar	83
5.9.1.1.	Equipo	84
5.9.1.2.	Procedimiento	85
5.9.1.3.	Consideraciones generales	86
5.9.2.	Proctor modificado	88
5.9.2.1.	Equipo	89
5.9.2.2.	Procedimiento	89
5.9.2.3.	Consideraciones generales	89
5.10.	Valor soporte california CBR	90
5.10.1.	Equipo	91
5.10.2.	Procedimiento	93
5.10.3.	Consideraciones generales	95

5.11.	Control de compactación	96
5.11.1.	Ensayos destructivos	97
5.11.2.	Ensayos no destructivos	97
5.12.	Estabilización de suelos	98
5.12.1.	Métodos más utilizados para la estabilización de suelos	98
5.12.1.1.	Estabilización suelo-cemento	98
5.12.1.2.	Estabilización mecánica	99
5.12.1.3.	Estabilización química	99
5.12.1.4.	Consideraciones generales	100
6.	PROCESO DE COMPACTACIÓN DEL SUELO	101
6.1.	Origen del suelo	101
6.2.	Muestreo.....	102
6.3.	Clasificación de los suelos.....	104
6.3.1.	Sistema de clasificación AASHTO.....	104
6.3.2.	Sistema unificado de clasificación de suelos	105
6.4.	Extracción de la muestra	107
6.5.	Granulometría.....	109
6.6.	Límites de Atterberg	112
6.6.1.	Límite Líquido	113
6.6.2.	Límite Plástico	114
6.6.3.	Límite de Contracción.....	114
6.7.	Aplicación del ensayo de contenido de humedad.....	115
6.8.	Aplicación del ensayo de Proctor	116
6.8.1.	Proctor estándar	116
6.8.2.	Proctor modificado.....	116
6.8.3.	Aplicaciones.....	118
6.9.	Compactación del suelo	119

6.10.	Resultados preliminares.....	123
6.11.	Aplicación de ensayos destructivos	124
6.12.	Método del cono de arena.....	124
6.12.1.	Método del globo de hule	126
7.	RESULTADOS FINALES Y COMPARACIÓN MÉTODO DE CONO DE ARENA Y MÉTODO DE GLOBO DE HULE	131
7.1.	Resultado final método de cono de arena.....	131
7.2.	Resultado final método del globo de hule	132
7.3.	Cálculos estadísticos de resultados	133
7.4.	Análisis comparativo	133
7.5.	Análisis comparativo con el método del densímetro nuclear..	139
7.6.	Análisis costo-beneficio.....	141
7.7.	Criterios de elección de método.....	144
7.8.	Consideraciones generales.....	147
	CONCLUSIONES.....	149
	RECOMENDACIONES	151
	BIBLIOGRAFÍA.....	153
	ANEXO.....	157

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Aparato de cono de arena.....	10
2.	Plato base del aparato cono de arena.....	11
3.	Arena Ottawa	12
4.	Balanza Ohaus de Capacidad 35 lb	12
5.	Speedy 2000 Determinador de humedad.....	13
6.	Voluvessel de manómetro en tapadera.....	31
7.	Voluvessel con manómetro en base	31
8.	Globos de hule para ensayo	33
9.	Diagrama del manual del aparato de globo de hule	41
10.	Medición por retro-dispersión.....	50
11.	Medición por transmisión directa.....	52
12.	Tipos de mediciones del densímetro nuclear	53
13.	Medición de humedad	54
14.	Densímetro nuclear modelo Troxler 3440	58
15.	Esquema de capas de suelo en una carretera.....	78
16.	Compactador de rodillo estático Volvo SD130D	79
17.	Apisonador Wacker BS-600 (60 Kg.)	80
18.	Compactador de placa vibratoria	80
19.	Equipo Proctor	85
20.	Gráfica de Proctor	87
21.	Máquina automática de carga CBR (HM-4156)	92
22.	Equipo CBR	93
23.	Moldes sumergidos en tanque especial	94

24.	Molde adaptado en máquina de compresión	95
25.	Disposición de tamices para ensayo de granulometría.....	109
26.	Curva granulométrica del material en estudio.....	111
27.	Límites de Atterberg del suelo plástico	113
28.	Curva PUS vs porcentaje H del Proctor modificado.....	118
29.	Prototipo de madera para proceso de compactación.....	120
30.	Compactadora SUBARU TV7DFW	121
31.	Proceso de compactación, primera fase.....	122
32.	Proceso de compactación, segunda fase	122
33.	Proceso de compactación, tercera fase.....	123
34.	Excavación de agujero, método del cono de arena	124
35.	Medición de los picnómetros	125
36.	Medición de la humedad por medio del SPEEDY.....	125
37.	Colocación del aparato sobre el plato base	126
38.	Manómetro del aparato de globo de hule	127
39.	Lectura inicial aplicando presión	127
40.	Manómetro en 3 psi para lectura inicial	128
41.	Lectura inicial aplicando succión.....	128
42.	Excavación agujero, método del globo de hule	129
43.	Aparato fuera de base para excavación de agujero.....	129
44.	Lectura final aplicando presión	130
45.	PUS Campo (cono de arena) vs PUS Laboratorio.....	134
46.	PUS Campo (globo de hule) vs PUS Laboratorio	135
47.	PUS (cono de arena) vs PUS (globo de hule)	135
48.	Porcentaje de Humedad del cono de arena vs globo de hule.....	136

TABLAS

I.	Volúmenes de agujeros de ensayos mínimos basados en el tamaño máximo de partícula	18
II.	Volumen de agua por gramo, basado en la temperatura (V_a)	28
III.	Volúmenes mínimos de agujeros de ensayo basado en el tamaño de partículas máximas.	39
IV.	Medidas de muestras de material para la humedad	48
V.	Límites de radiación máximos permisibles en el cuerpo	69
VI.	Métodos de realización de compactación dinámica	88
VII.	Datos de carga unitaria patrón	91
VIII.	Clasificación de uso de suelos según valor de CBR	96
IX.	Resultados granulometría del material en estudio	110
X.	Contenido de humedad inicial	115
XI.	Resultados ensayo de Proctor modificado	117
XII.	Contenido de humedad previo a la compactación	119
XIII.	Resultados finales ensayo cono de arena.....	131
XIV.	Resultados finales método globo de hule.....	132
XV.	Media y desviación estándar de resultados de ensayos	133
XVI.	Costos aproximados del aparato del cono de arena	142
XVII.	Costos aproximados del aparato del globo de hule	143
XVIII.	Costos aproximados del densímetro nuclear Troxler 3430	144

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
D_h	Densidad del suelo húmeda
D_s	Densidad del suelo seca
E	Energía de compactación
P_h	Peso húmedo del suelo
V	Volumen
V_a	Volumen de agua por gramo (ml/g)
V_t	Volumen de agua promedio del molde contenedor para la calibración del aparato del globo de hule
%C	Porcentaje de compactación del suelo

GLOSARIO

AASHTO	Asociación Americana de Vías Estatales y Oficiales. “American Association Of State Highway and Transportation Officials”.
Arcilla	Es el conjunto de partículas sólidas de suelo de diámetro menor a 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de transformarse en plástica al ser mezclada con agua. Se define químicamente como un silicato de alúmina hidratado.
Arena	Es el material de suelo compuesto por partículas de diámetro menores a 2 mm y mayores a 0.05 mm procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial.
Arena Ottawa	Es un tipo de arena que se rige bajo la norma ASTM D 1556, la cual contiene partículas que han sido pasadas por el tamiz No. 20 y retenidas en el tamiz No. 30, es decir varían entre 1 y 2 mm.
ASTM	Asociación Americana de Pruebas de Materiales. “American Society for Testing and Materials”.

Cohesión	Se refiere a la propiedad de los suelos de atracción intermolecular, la cual ocurre principalmente en las arcillas.
Compactación	Proceso en el cual a las partículas del suelo se les imparte una energía específica por medio del impacto o aplastamiento, formándose así una densidad intermolecular lo cual hace estable el material.
Densidad	Propiedad del suelo que determina el grado de compactación y cohesión tiene el mismo, se define como la masa entre el volumen de la misma.
Densímetro Nuclear	Aparato electrónico el cual hace uso de material radiactivo para determinar la densidad de un suelo en campo.
Globo de hule	Aparato utilizado para la determinación de densidades en campo por medio de un globo de látex y un recipiente cilíndrico calibrado.
Granulometría	Se refiere al análisis para la determinación de la cantidad en porcentaje de los diversos tamaños de las partículas que constituyen el suelo.
Grava	Agregado compuesto por acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas cuyo diámetro mínimo sobrepasa los dos milímetros de diámetro, siendo su máximo aproximadamente 3 pulgadas.

Humedad	Se define como la cantidad de agua en medida por su peso que contiene determinada cantidad de suelo.
Intemperismo	Es el proceso de transformación química de las rocas en partículas menores que conforman el suelo.
Limo	Es un suelo de grano fino con poca o ninguna plasticidad. El diámetro de sus partículas varía entre los 0.05 mm y 0.005 mm.
Manómetro	Instrumento de medición que determina la presión de fluidos contenidos en recipientes cerrados.
Permeabilidad	Se define como la capacidad del suelo de permitir que un líquido lo atraviese sin alterar su estructura interna.
Picnómetro	Aparato cónico-cilíndrico utilizada para determinar la densidad del suelo en campo.
Plasticidad	Es la propiedad que presentan los suelos de deformarse permanentemente, hasta cierto límite sin romperse.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación trata acerca de la elaboración de un Manual de uso del aparato del Globo de Hule como herramienta para la determinación de la densidad en campo. El mismo incluye un procedimiento de calibración y describe paso a paso el modo de empleo, sus limitaciones y especificaciones según la norma ASTM D 2167.

En los primeros cuatro capítulos se describen ampliamente los principales métodos para la determinación de la densidad en campo, así como también se presenta el Manual del aparato del Globo de Hule. Se muestran las normas, aplicaciones y limitaciones que rigen cada método. Incluye gráficos del aparato, así como una guía de ensamblaje del mismo.

En el capítulo 5 se encuentra la descripción teórica del proceso de compactación, maquinaria que se utiliza, ensayos que aplican junto con su norma que los rige, descripción, equipo, procedimiento de aplicación y consideraciones especiales. En el mismo capítulo se presenta al final una breve descripción de los principales métodos de estabilización de suelos para su compactación.

El capítulo 6 presenta el proceso que llevó realizar estos ensayos de laboratorio junto con sus resultados, así como describe el proceso de compactación que se llevó a cabo, el equipo que se utilizó y la aplicación del Método del Globo de Hule y el cono de arena para la determinación de la densidad del suelo compactado.

Finalmente en el capítulo 7 se presentan los resultados finales de los métodos para la determinación de la densidad utilizados junto con datos estadísticos determinados de la aplicación de una serie de ensayos de estos métodos para posteriormente presentar un análisis comparativo-cualitativo de ambos métodos, ventajas y desventajas de los mismos junto con el Método del Densímetro Nuclear.

OBJETIVOS

General

Presentar un manual de uso como herramienta y calibración del aparato del ensayo del Globo de Hule ASTM D 2167 como método para la determinación de la densidad en campo.

Específicos

1. Describir los principales métodos que se utilizan en la actualidad para la determinación de la densidad en campo.
2. Demostrar la fiabilidad de los métodos, Cono de Arena ASTM D 1556 y Globo de Hule ASTM D 2167, por medio de la aplicación de los mismos en un proyecto que inicia desde estudios de laboratorio hasta el monitoreo de la compactación en campo.
3. Realizar un análisis comparativo y cualitativo por medio de sus respectivos ensayos y resultados de los métodos del Cono de Arena ASTM D 1556 y Globo de Hule ASTM D 2167.
4. Establecer criterios de elección de métodos a través de un cuadro descriptivo de ventajas y desventajas de los métodos del Densímetro Nuclear ASTM D 2922, del Cono de Arena ASTM D 1556 y Globo de Hule ASTM D 2167.

INTRODUCCIÓN

El monitoreo y evaluación del grado de compactación de las capas del suelo en una obra civil es de suma importancia. De esta manera se asegura que la capa de suelo que se esté compactando sea lo suficientemente densa para evitar deformaciones debidas a la acción de cargas transformadas en esfuerzos distribuidos y punzantes. Para ello se han desarrollado diversidad de métodos de control, los cuales varían según sean las condiciones del proyecto, suelo, clima, economía entre otros factores.

En Guatemala se utilizan dos métodos principales, el Densímetro Nuclear y el Cono de Arena, ya que son los que se cuentan en el mercado brindado resultados confiables y versatilidad. Últimamente se ha empleado también el método por reflectometría ASTM D 6780, aunque no al mismo nivel que los anteriores. Pero existen otros métodos aún no han sido aplicados en el país, como es el caso del método del globo de hule.

La principal razón es que no se contaba con el aparato ni mucho menos con un manual detallado al alcance, por lo que el presente trabajo de graduación presenta un manual de uso que detalla paso a paso como ejecutar el ensayo así como el ensamblaje y calibración del equipo. Muestra también ensayos realizados por este método con su respectivo análisis a través de la reciente adquisición del aparato por medio del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Es de este punto de donde nace la necesidad de la creación de un manual de uso, con especificaciones, limitaciones y procedimiento detallado para poder utilizar como herramienta de trabajo del laboratorio de mecánica de suelos y del profesional o estudiante que lo necesite.

Para mostrar una representación de su uso y resultados y lograr determinar su grado de exactitud, se llevó a cabo un procedimiento de obra civil en un prototipo a pequeña escala de la aplicación de capas del suelo en una carretera. El proyecto se realizó desde la clasificación visual del material, los ensayos respectivos de laboratorio, la construcción de un perímetro reducido en representación de una carretera, la compactación del material y la determinación final de la densidad por medio del aparato del globo de hule y del cono de arena.

Con estos datos se realizó un análisis comparativo tomando en cuenta criterios estadísticos, teóricos, y prácticos. Finalmente se pudo comparar los resultados prácticos de ambos métodos mencionados con el dato determinado en laboratorio y así determinar su exactitud; y se presentaron los criterios de elección de los métodos para sus diferentes aplicaciones.

1. IMPORTANCIA DE LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD *IN SITU*

La determinación de la densidad *in situ*, es la comprobación del grado de compactación del suelo en obra, principalmente se utiliza en obras de construcción de carreteras dado que una mala compactación puede llevar a fallas de la misma. Es importante la consideración del contenido de humedad ya que este es el factor que se puede comprobar con datos obtenidos en laboratorio por medio del ensayo de Proctor, la diferencia con los datos de laboratorio y la aplicada en obra debe de ser la mínima para una ejecución idónea de la siguiente fase constructiva.

La densidad del suelo se debe monitorear constantemente cada cierto rango de distancia alrededor del perímetro de construcción para asegurarse de que se haya compactado al mismo nivel, intensidad, y homogeneidad. De otra forma la construcción se vería gravemente afectada cuando se apliquen las distintas cargas.

Es muy útil la determinación de la densidad *in situ* para el caso de suelos como gravas o arenas, los cuales no tienen cohesión y que por lo general no permiten obtener muestras inalteradas; y por medio de este ensayo se puede reproducir el suelo natural en la densidad a partir de una muestra alterada.

El incremento de la densidad se obtiene al reducir al máximo el contenido de aire en los vacíos manteniendo aproximadamente constante el contenido de agua. Los métodos desarrollados para la obtención de la densidad no solo

toman este dato sino determinan además el contenido de humedad para comprobarlo con el dato de laboratorio.

Principalmente se deben diferenciar dos tipos de peso unitario, en los datos que se obtienen del ensayo:

- Peso unitario húmedo (PUH): Es la división del peso del material húmedo dentro del volumen obtenido del mismo.
- Peso unitario seco (PUS): Es la división del peso del material seco dentro del volumen obtenido del mismo.

El peso unitario seco es el dato que se compara con el obtenido por medio del ensayo de Proctor modificado, y así poder obtener el porcentaje de compactación. Los datos de los pesos unitarios o densidades se pueden expresar en las siguientes unidades: (kg/m^3), (lb/pe^3) o (gr/cm^3).

1.1. Métodos más utilizados

Para realizar la lectura y comprobación de densidad en el campo, se utilizan varios métodos, pero son tres los más utilizados principalmente por su grado de exactitud:

- Método del Cono de Arena (ASTM D 1556).
- Método del Globo de Hule (ASTM D 2167).
- Método del Densímetro Nuclear (ASTM D 2922 Y D 3017).

1.1.1. Método del Cono de Arena (ASTM D 1556)

El Método del Cono de Arena es el más conocido y utilizado por su practicidad, rapidez, y confiabilidad. Aunque no es el método más exacto de todos, sus resultados son bastante confiables si la ejecución es bien realizada por laboratoristas experimentados.

La densidad natural del suelo se determina dividiendo la masa dentro del volumen que la contiene, para el cálculo del volumen que ocupa el material en el terreno se utiliza este método.

El aparato que se utiliza es un recipiente de forma cilíndrica cuya parte inferior termina en un embudo donde se encuentra una válvula que permite controlar el paso de la arena de calibración que contiene el recipiente.

Por medio de este aparato y la extracción del suelo con un perímetro circular fijo, se determinan los pesos y volúmenes necesarios para el cálculo correspondiente de la densidad. Es importante que el laboratorista que ejecute este ensayo sea lo más preciso posible para evitar datos erróneos.

El principio general es obtener el peso del suelo húmedo (P_{hum}), obtenido de una pequeña perforación hecha sobre la superficie del suelo y el espesor de la capa compactada. Así, se obtiene el volumen de dicho agujero, por lo que la densidad húmeda del suelo estará determinada como sigue:

$$PUH = \frac{P_{hum}}{Vol.Extraido}$$

Para la determinación de la densidad seca basta con encontrar el contenido de humedad del material extraído (w) y se determina como sigue:

$$PUS = \frac{PUH}{1+w}$$

1.1.2. Método del Globo de Hule (ASTM D 2167)

El método del Globo de Hule, es un método que ofrece bastante rapidez y practicidad. Para lograr resultados lo más exactos posibles se requiere de mucho cuidado y precisión en la ejecución del ensayo principalmente en la extracción del suelo.

El aparato que se utiliza se le conoce por su nombre en inglés de “*voluvessel*” y es un aparato que consiste en un recipiente de vidrio cilíndrico, graduado donde en el fondo se coloca un globo de látex estabilizado por medio de un plato metálico.

El objetivo de este ensayo es determinar la densidad del suelo por medio de la extracción del material, dejando un agujero cilíndrico para posteriormente llenarlo con el globo de látex lleno de agua y medir el volumen. Así se podrá determinar dividiendo la masa extraída dentro del volumen de agua que cubre el agujero.

El principal factor influyente en posibles errores en este ensayo es la precisión con la que se realice el agujero del suelo, ya que este supone un volumen aproximado del mismo.

1.1.3. Método del Densímetro Nuclear (ASTM D 2922 y D 3017)

El Método del Densímetro Nuclear es un método con un alto grado de complejidad de operación ya que se trabaja con elementos radiactivos los

cuales si no son manejados de una forma adecuada pueden causar grandes daños a la salud del laboratorista.

La gran ventaja de este método es la precisión de la lectura que toma. De todos los métodos desarrollados este es el que arroja el dato más exacto de la densidad. El método está basado en la interacción de los rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva y los electrones de las órbitas exteriores de los átomos del suelo, la cual es captada por un detector gamma situado a corta distancia de la fuente emisora sobre, dentro o adyacente al material a medir. La lectura de la intensidad de la radiación es convertida a medida de densidad húmeda por medio de una curva de calibración apropiada del equipo.

Para este método existen tres formas básicas de realizarlo las cuales son:

- Retro dispersión
- Transmisión directa
- Colchón de aire

1.2. Otros métodos

Existen otros métodos no muy utilizados para la determinación de la densidad en el campo que se ajustan mejor a ciertas condiciones del suelo. En algunos casos por ejemplo debido al tamaño de agregado máximo se deben utilizar estos métodos, dentro de los cuales se mencionan los siguientes:

- Método del Densímetro de Membrana
- Método del Cono Gigante
- Método mediante bloques

1.2.1. Método del Densímetro de Membrana

Este método es aplicable a suelos donde la mayor cantidad de agregado es grava media y gruesa. Se coloca un anillo metálico de diámetro aproximado de dos metros y se procede a excavar el material que encierra el perímetro del anillo con una profundidad de 30 cm. Después de extraer el material, se debe colocar una membrana plástica que se adapte al interior del anillo y al fondo de la grava. La membrana se llena con agua, tomando así la lectura del volumen que llena la cavidad y que corresponderá al volumen del material extraído. De esta forma se encuentra el peso unitario dividiendo el peso del material extraído dentro del volumen que se registra en la membrana.

1.2.2. Método del Cono Gigante

El Método del Cono Gigante es aplicable principalmente a suelos donde predominan las partículas de agregado mayores a 50 mm. O también en suelos como gravas uniformes, en donde la utilización de la arena no resulta conveniente puesto que esta ocuparía los vacíos que originalmente poseen las gravas. Como reemplazo de la arena Ottawa utilizada en el cono de arena, se utiliza comúnmente gravilla o bolitas de vidrio.

1.2.3. Método mediante bloques

El Método mediante bloques se utiliza para determinar la densidad de suelos cohesivos en estado natural, que no se deforman ni se desmoronan por ejemplo no es aplicable a suelos muy arenosos donde no hay cohesión. El peso y el volumen se determinan de muestras en estado inalterado, estas muestras son extraídas cuidadosamente mediante una espátula dándole forma de bloque a la muestra, donde se podrá obtener el peso y el volumen del bloque.

2. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO POR EL MÉTODO DEL CONO DE ARENA

AASHTO T191-02: *Standard Method of Test for Density of Soil in-Place by the Sand-Cone Method*

ASTM D 1556: *Standard Test Method of Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand Cone Method*

2.1. Consideraciones generales del método

Este ensayo se utiliza para determinar la densidad y el peso unitario en campo de los suelos usando un aparato de cono de arena. El método es aplicable para suelos sin una cantidad de rocas o agregado grueso de por lo menos 1½ pulgadas de diámetro. El suelo o el material de ensayo deben contener suficiente cohesión o atracción de partículas para mantener estable las paredes en un agujero pequeño con el fin de ser lo suficientemente firme para soportar presiones menores aplicadas por el proceso de excavación y también soportar la colocación del aparato del cono de arena sin deformarse o ladearse en lo más mínimo.

El método del cono de arena no es ejecutable para suelos orgánicos saturados o con un índice plástico elevado que producirá deformación o compresión durante la excavación del agujero del ensayo.

Cuando los materiales a ser ensayados contienen cantidades apreciables de partículas mayores de 1½ pulgadas (38 mm), o cuando el volumen del agujero es mayor de 0.1 pie³, las normas aplicables entonces son ASTM D

4914-08: *Standard Test Methods for Density and Unit Weight of Soil and Rock in Place by the Sand Replacement Method in a Test Pit* y ASTM D 5030-04: *Standard Test Method for Density of Soil and Rock in Place by the Water Replacement Method in a Test Pit*. Estos métodos cubren la determinación de la densidad en campo del suelo y rocas usando arena y agua correspondientemente para llenar un pozo revestido y determinar el volumen del pozo en prueba tomando en cuenta rocas mayores de 3 pulgadas.

El método por su modo de ejecución es considerado como un ensayo destructivo ya que en el procedimiento es necesario realizar una excavación para determinar el peso específico seco del campo.

2.2. Descripción del ensayo

Se realiza un agujero excavado a mano en el suelo que será ensayado y todo el material extraído es guardado en un recipiente, luego de esto, el agujero es llenado con una arena fina que fluya fácilmente con una densidad conocida, la arena utilizada comúnmente se denomina: arena *Ottawa*. Y posteriormente el volumen es determinado, la densidad húmeda de campo del suelo es determinada por la división de la masa húmeda del material extraído entre el volumen del agujero.

El contenido de agua del material removido es determinado y la masa seca del material y la densidad de campo seca es calculada usando la masa húmeda del suelo, el contenido de agua y el volumen del agujero.

2.3. Significado y aplicaciones

El método del cono de arena es comúnmente utilizado como un parámetro aceptable de densidad específica o como un porcentaje de máxima densidad, en suelos compactados. El método también puede ser utilizado para determinar la densidad en campo natural de depósitos de suelo, agregados, mezclas de suelos u otro material similar.

El uso de este método comúnmente se limita a suelos en una condición no saturada. No es recomendado para suelos que son débiles o de fácil deformación o con una condición de humedad de tal manera que el agua escurra en el agujero excavado.

La precisión del ensayo puede ser afectada por suelos que se deformen fácilmente o que se puedan producir cambios en el volumen del agujero excavado debido a vibraciones producidas por diversas situaciones como el caminar cerca del sitio de ensayo o maquinaria de construcción que pase cerca del sitio, es por ello que es recomendable parar cualquier actividad de construcción que produzca vibraciones en el suelo ya que pueden afectar grandemente los resultados.

2.4. Equipo

El aparato de cono de arena consiste en un frasco de vidrio o plástico con una capacidad de volumen que al menos exceda la cantidad requerida para llenar el agujero a excavar, aproximadamente de 3,785 cm³ de capacidad. El frasco debe estar unido a un embudo que a su vez se une a una válvula con un orificio de aproximadamente ½ pulgada. (13mm) de diámetro, adjuntada a la vez a otro embudo metálico que ajusta el diámetro deseado según sea el dato

del ensayo que se desee, por ejemplo, para el análisis de una capa subbase se utiliza un embudo metálico de 4" y para el análisis de una capa base se utiliza de 6 pulgadas de diámetro.

Figura 1. **Aparato de cono de arena**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012.

2.4.1. Consideraciones generales del equipo

La válvula del aparato debe de ser construida de tal forma que pueda realizar paradas para prevenir que siga rotando al momento de intentar detener el flujo de la arena. El embudo debe consistir de un metal lo suficientemente rígido para evitar deformaciones en el mismo, además las paredes del cono deben de encontrarse a 60° de la base para permitir un llenado de arena uniforme, el embudo final se le conoce comúnmente como “Picnómetro”.

Todo el aparato del cono de arena se estabiliza por medio de una base o plato metálico con una orilla biselada en el agujero del medio para adaptar el aparato con el plato. El plato debe de ser de preferencia cuadrado y con al menos 3” (75 mm) más largo que el embudo o cono metálico. Debe ser liso en la parte de abajo, y debe contener el suficiente grosor para ser rígido.

Figura 2. **Plato base del aparato cono de arena**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012.

La arena a utilizar para el llenado del agujero debe ser limpia, seca, con densidad uniforme, graduada, no cementante, durable y que tenga un amplio rango de fluidez. La gradación debe ser realizada con un coeficiente de uniformidad ($C_u = D_{60}/D_{10}$) menor a 2, con un tamaño máximo de partícula de 2 mm que lo determina el tamiz No. 10; y menos del 3 % del peso que pase el tamiz No. 60. La arena uniformemente graduada es necesaria para prevenir segregación durante el manipuleo, guardado y uso. Arena libre de finos y partículas finas es requerida para prevenir cambios de la densidad debido a la humedad de la atmósfera.

La arena que contiene partículas naturales redondeadas es deseable para el ensayo, arena con partículas de muchos ejes y ángulos, no permite el flujo libre de la misma lo cual dificulta en gran manera el procedimiento, condición que produce resultados inexactos. Comúnmente se utiliza un tipo de arena de partículas redondeadas de aproximadamente 2 mm de diámetro, con una buena fluidez, denominada arena Ottawa, la cual pasa por el tamiz No. 20 (0.085 mm) y se retiene en el tamiz No. 30 (0.606 mm), la arena se debe lavar y posteriormente secar en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$.

Figura 3. **Arena Ottawa**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012.

Se utiliza una balanza para determinar el peso del material extraído, así como de los picnómetros, la balanza debe de ser de 35 lb de capacidad con una sensibilidad de 0.01 lb. El siguiente modelo es un ejemplo de la misma.

Figura 4. **Balanza Ohaus de capacidad 35 lb**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012.

Durante el procedimiento del ensayo se hace necesario el uso del tamiz No. $\frac{3}{4}$ (19 mm), el cual sirve para eliminar partículas muy grandes que pueden estropear el resultado, es aquí donde se debe analizar si realmente aplica este ensayo o es mejor utilizar alternos.

También se utilizan una serie de accesorios que sirven para limpiar, excavar, guardar material, etc. Los cuales se mencionan a continuación.

- Martillo
- Cuchara
- Cincel
- Brocha
- Bandejas metálicas para guardar material del suelo

Para la determinación del contenido de humedad en el suelo es necesaria la utilización de un aparato llamado “Speedy”. Este aparato consta de una cámara cilíndrica de presión adjunta con un manómetro, balanza, carburo de calcio, medidor del carburo de calcio, esferas de acero de 1 centímetro de diámetro, y su equipo de limpieza. El aparato se rige por las normas ASTM D 4944-04 y AASHTO T-217.

Figura 5. **Speedy 2000 Determinador de humedad**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012.

El Speedy es un aparato utilizado para medir contenido de humedad en campo, ya que llevar muestras del suelo a un laboratorio para este ensayo no es práctico, por el contrario es difícil. Para este ensayo se necesita que todas las partículas que se ensayen pasen por el tamiz No. 4 (4,75 milímetros).

El problema con este ensayo es que se pueden producir inexactitudes debido a que la muestra que se utiliza en el aparato es muy pequeña para representar la humedad en toda el área. Por lo tanto otros métodos son recomendados cuando se requieren datos muy exactos.

2.4.2. Calibración

La calibración del equipo es un paso fundamental en el desarrollo de cualquier ensayo, cumple con el proceso de brindar un aparato el cual arroje datos exactos a la capacidad del mismo, es por ello que se brindan los aspectos principales para la calibración del equipo de este ensayo,

2.4.2.1. Calibración del aparato de cono de arena

La masa de arena contenida en el aparato del cono de arena y el plato base son dependientes de las acumulaciones de densidad de la arena. Por lo tanto, este procedimiento de calibración se debe realizar para cada aparato cuando se encuentren cambios en las acumulaciones de densidad de la arena. La calibración del aparato puede ser realizada por medio de 2 métodos principales:

- Mediante la determinación de la masa de arena calibrada que puede ser contenida en ambos, el embudo y el plato base.

- Mediante la determinación del volumen de la arena necesaria para llenar cada embudo y plato base; y aplicando este volumen constante siempre cuando nuevas acumulaciones en la densidad de la arena son calculadas.

- Método A:
 - Se llena el aparato con arena que fue secada previamente y condicionada al mismo estado anticipado durante el uso en el ensayo. Posteriormente se determina la masa del aparato cuando está lleno de arena.

 - Se coloca el plato base en una superficie limpia, nivelada y plana. Después se invierte el aparato y se asienta el embudo en el centro de la hendidura del agujero en el centro del plato base. Se marca e identifica el aparato y el plato base en su posición para que de esa manera el mismo aparato y plato base encajen y puedan ser colocados en la misma posición durante el ensayo.

 - Se abre la válvula completamente hasta que el flujo de arena se detenga, asegurándose que el aparato, plato base o superficie plana no vibren antes que la válvula sea cerrada.

 - Se cierra la válvula de una manera cortante, se remueve el aparato y se determina la masa del aparato y el restante de arena. Se calcula la masa de arena usada para llenar el embudo y plato base como la diferencia entre la masa inicial y final.

- Se repite el mismo procedimiento al menos 3 veces. La máxima variación entre cualquier determinación y el promedio no debe exceder en 1 %. Se usa el promedio de las 3 determinaciones para este valor en los cálculos del ensayo.

- Método B:
 - Se determina la masa de arena requerida para llenar el embudo del aparato y el plato base y se repiten todos los pasos del método A.

 - Se calcula el volumen del embudo y el plato base dividiendo la acumulación de densidad de la arena entre la masa determinada en el paso 5 del método A. Se realizan un mínimo de 3 determinaciones y se calcula un valor promedio. La máxima variación de volumen entre cualquier determinación y el promedio no debe exceder de 1 %. Se usa este promedio de valores para realizar cálculos del ensayo.

2.5. Procedimiento

- Se selecciona localidad y elevación que sea representativa del área a ensayar. Aproximadamente un área cuadrada de unos 50 cm de lado.

- Se inspecciona el aparato del cono de arena de daños, rotaciones flojas de la válvula, y que se ajuste perfectamente con el plato base. Posteriormente se llena el frasco contenedor con arena Ottawa.

- Se prepara la superficie de la localidad a ser ensayada de tal manera que quede nivelada y limpia. El plato base debe ser usado como una herramienta para aplanar la superficie y dejarlo en un nivel de plano liso.
- Se asienta el plato base en la superficie plana, asegurándose de que existe contacto con la superficie del suelo alrededor de la orilla del agujero del plato base. Posteriormente se marca la orilla del agujero del plato en el suelo para chequear el movimiento durante el ensayo, y si es necesario, asegurar el plato contra el movimiento por medio de clavos colocados en el suelo adyacente al plato por el perímetro, sin afectar el suelo a ser ensayado.
- En suelos donde la nivelación no es suficiente, es decir, no puede hacerse lo suficientemente plano, o donde espacios en el suelo permanecen, el volumen horizontalmente conectado con el embudo, plato y superficie del suelo debe ser determinado preliminar al ensayo. Se llena el espacio con arena del aparato, se determina la masa de arena usada para llenar el espacio, se vuelve a llenar el aparato y se determina una nueva masa inicial del aparato y la arena antes de proceder con el ensayo.
- El volumen del agujero del ensayo dependerá en el tamaño máximo de partícula en el suelo a ser ensayado. Los volúmenes del agujero del ensayo no deben ser menores a los presentados en la siguiente tabla basada en el tamaño máximo de partícula. Los tamaños máximos de partícula se expresan en las siguientes unidades pulgadas y milímetros, en tanto el valor del mínimo volumen de los agujeros se expresan en las siguientes unidades cm^3 y pie^3 .

Tabla I. **Volúmenes de agujeros de ensayos mínimos basados en el tamaño máximo de partícula**

Tamaño máximo de partícula		Volumen mínimo del agujero del ensayo		Cantidad de muestra para contenido de humedad
Pulg.	Mm	cm ³	pie ³	Gr
½	12,7	1415	0,05	250
1	25,4	2125	0,075	500
1 ½	38	2830	0,1	750

Fuente: elaboración propia.

- Se pesa el aparato de cono de arena por primera vez, sin dejar escapar nada de arena por la válvula, peso que se denomina “Picnómetro 1”.
- Se debe limpiar el plato base del agujero, e invertir el aparato de cono de arena sobre el plato de modo que se ajuste la boca del embudo con la circunferencia del agujero del plato.
- Es necesario tener cuidado con las vibraciones que se pueden producir debido al paso de personas alrededor o movimiento de equipo.
- Se abre la válvula y se deja fluir la arena hasta llenar el embudo y la orilla del plato base, teniendo cuidado evitar vibraciones cuando la arena está fluyendo y se cierra la válvula hasta asegurarse que la arena dejó de correr.

- Luego se determina el peso del aparato con la arena restante por medio de la balanza lo que se denomina “Picnómetro 2”. Se remueve la arena depositada y se guarda en una bandeja.
- Se excava el agujero del ensayo a través del agujero del plato base, teniendo cuidado de evitar deformaciones en el suelo que puedan destruir el agujero. Los costados del agujero deben inclinarse levemente para adentro y el fondo debe ser relativamente plano o cóncavo. El agujero debe dejarse libre tanto como sea posible de imperfecciones y obstáculos.
- Los suelos que carecen de cohesión tanto como arenas, o suelos muy granulares, requieren de mucho cuidado al momento de la excavación por lo tanto se requiere que se excave en forma cónica.
- El suelo extraído del agujero se pasa por el tamiz No. $\frac{3}{4}$ (19mm), y posteriormente se pesa tomando así el peso húmedo. El contenido que no pasa por este tamiz es regresado.
- Se realiza el mismo procedimiento que en el paso 9, solo que esta vez se deja fluir la arena hasta llenar el agujero, el plato base y el embudo del aparato, y se cierra la válvula tomando así una nueva lectura de la masa del aparato con arena restante lo que se denomina “Picnómetro 3”. Se retira la arena tratando de recuperar lo máximo posible y se limpia la superficie con una brocha.
- Para la determinación del contenido de humedad, se toma una muestra de 5 gramos del suelo húmedo que se extrajo y paso por el tamiz No. $\frac{3}{4}$ y se introduce dentro del aparato “Speedy” junto con 5 gramos de carburo

de calcio y se agita por varios minutos hasta que el manómetro para de incrementar el porcentaje de contenido de humedad, y el máximo será el dato a utilizar para determinar humedad con datos de tabla que proporciona cada equipo individual.

2.6. Cálculos generales

Para determinar la densidad en campo por medio del método del cono de arena se realizan los siguientes cálculos, tomando en cuenta los criterios planteados en el procedimiento:

- Determinación del peso de la arena en el embudo:
 - $P_{ae} = \text{Picnómetro 1} - \text{Picnómetro 2}$
- Determinación del peso de arena para llenar el embudo y el agujero:
 - $P_{ae + ag} = \text{Picnómetro 2} - \text{Picnómetro 3}$
- Determinación del peso de la arena en el agujero. Se resta el peso de la arena en el embudo más el agujero $P_{ae + ag}$, con el peso de la arena en el embudo P_{ae} :
 - $P_a = (P_{ae + ag}) - P_{ae} = (\text{Pic 2} - \text{Pic 3}) - (\text{Pic 1} - \text{Pic 2})$
- Determinación del volumen del agujero. Se divide el peso de la arena en el agujero P_a dentro del peso específico de la arena calibrada Ottawa

$$\text{Volumen} = \frac{P_a}{\text{Peso Unitario Arena Calibrada Ottawa}}$$

- Por último se determina el porcentaje de compactación, por medio de las siguientes fórmulas:

$$PUH = \frac{\textit{Peso Neto Humedo del material extraido}}{\textit{Volumen del agujero}}$$

$$PUS_{\text{campo}} = \frac{\textit{P.U.H.}}{100 + \% \textit{ de Humedad}} \times 100$$

$$\%C = \frac{\textit{P.U.S.campo}}{\textit{P.U.S.laboratorio}} \times 100$$

Es muy importante determinar el porcentaje de compactación del área de trabajo, ya que con el mismo se puede visualizar si la compactación fue la adecuada o no. Al final para la mayoría de laboratoristas, este es el dato de mayor importancia para ir controlando la densidad en campo.

3. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD EN CAMPO POR EL MÉTODO DE GLOBO DE HULE

AASHTO T 205-64: *Standard Test Method of Density of Soil In-Place by the Rubber Balloon Method*

ASTM D 2167: *Standard Test Method of Density and Unit Weight of Soil in Place by the Rubber Balloon Method*

3.1. Consideraciones generales del método

Una vez establecidos por medio de laboratorio los criterios de compactación para el suelo que se va a utilizar en un sitio determinado, comúnmente con limitaciones de humedad y densidad, es necesario utilizar algún método para verificar los resultados. Ya ha sido analizado el método del cono de arena, en este capítulo se determinarán los criterios y pasos necesarios para la determinación de la densidad por el método del globo de hule.

Es adecuado su uso en suelo compactado o terraplenes construidos que contengan partículas finas o que sea granular sin acumulación de rocas o partículas gruesas siempre y cuando el suelo no se deforme durante el ensayo. El método no es adecuado para suelo orgánico, saturado o de alta plasticidad, que probablemente se deforme bajo presiones aplicadas durante el ensayo. El método del globo de hule requiere de especial atención en la aplicación sobre:

- Suelos que consisten en material granular sin conexión que no mantengan estables sus paredes en la excavación de un agujero.
- Suelos que contienen cantidades importantes de material grueso en exceso, de partículas mayores a 1½" (37,5 milímetros).
- Suelos granulares que contiene grandes espacios vacíos.
- Materiales de relleno que contengan partículas con esquinas agudas, siempre para suelos que contengan cantidades importantes de partículas mayores a 1½" (37.5 milímetros).

3.2. Descripción del ensayo de globo de hule

El volumen de un agujero excavado en un suelo dado es determinado usando un recipiente calibrado lleno de agua para llenar una membrana de hule flexible, esta membrana debe llenar el agujero. La densidad de campo húmeda es determinada dividiendo la masa húmeda del suelo removido entre el volumen del agujero. El contenido de humedad y la densidad de campo húmeda son utilizadas para calcular la densidad de campo seca y el peso unitario seco.

3.3. Significado y aplicaciones

El método de globo de hule puede ser utilizado para determinar la densidad en campo y el peso unitario de depósitos de suelo natural e inorgánico, mezclas de suelo-agregado u otro material similar firme; además se puede determinar a través de éste método la densidad de suelos compactados utilizados en construcción de terraplenes, carreteras o rellenos estructurales.

El método también es comúnmente utilizado como base de aceptación para suelos compactados a determinada densidad específica o porcentaje máximo de densidad. El uso de este método comúnmente es limitado a una condición de suelo no saturado, y no es recomendable para suelos flojos o que se puedan deformar fácilmente, los cuales pueden someterse a cambios volumétricos durante la aplicación de presión en el ensayo.

El método puede no ser apto para suelos que contengan fragmentos de roca o materiales con partículas anguladas las cuales pueden penetrar la membrana de hule y consecuentemente romperla, es importante la consideración del tamaño de partícula del suelo, ya que si el tamaño es muy grande aproximadamente mayor a 2" se utilizan otros métodos como el de la membrana gigante el cual permite partículas muy grandes.

3.4. Equipo

El equipo es bastante sencillo, cuenta con elementos que establecen las condiciones ideales para la realización del mismo como se muestra en la siguiente sección.

3.4.1. Consideraciones generales del equipo

El principal objetivo del método de globo de hule es determinar la densidad de campo y peso unitario lo más exacto posible para poder hacer una comparación válida con los datos de laboratorio.

Es por ello que se recomienda realizar el ensayo con sumo cuidado tomando en cuenta principalmente la elaboración del agujero, es decir, hacerlo lo más preciso a la forma deseada y tomar las consideraciones pertinentes ya

mencionadas acerca del tipo de partícula del suelo para evitar desgaste en el equipo y sobretodo que es un globo de hule el que se inserta.

Además es recomendable también conseguir la mejor ubicación para realizar el ensayo puesto que como es un recipiente alto de vidrio o plástico, tiene una tendencia a inclinarse y reproducir datos falsos, para ello se deben tomar las consideraciones pertinentes para ajustar el aparato lo mejor posible al suelo de ensayo.

Es importante también considerar los pasos de calibración que se recomiendan principalmente para equipos nuevos, o que no se utilizan a menudo, de esta manera se asegura un ensayo seguro y bastante preciso.

- Calibración:
 - Los chequeos de la calibración del aparato se deben realizar periódicamente, como mínimo anualmente, y cuando se observen daños, reparaciones, o cambio de membrana que pueda afectar la presión del aparato.
 - Se verifica la exactitud y precisión del indicador de volumen utilizando el aparato para medir recipientes o moldes de un volumen conocido, que dimensionalmente simulen los agujeros de ensayo que son realizados en el campo.
 - Los aparatos y procedimientos deberán ser tales que los contenedores se midan dentro de 1 % del volumen actual.

- Moldes para calibración: Los moldes o recipientes recomendables para calibración, son los descritos en las normas ASTM D 698 y ASTM D 1557, ambos se relacionan a las taras utilizadas en el ensayo de laboratorio Proctor. Los recipientes son de 4 a 6 pulgadas (102 y 152 milímetros respectivamente) de diámetro con la misma altura aproximadamente. Otros moldes preparados para simular el agujero del ensayo pueden ser utilizados.
- Determinación del volumen en la calibración: Primero, se debe determinar la masa de agua en gramos requerida para llenar los recipientes o moldes de los agujeros. Utilizando un plato de vidrio y una fina capa de lubricante para sellar el recipiente, se toma el peso del recipiente junto el sellador (plato de vidrio y capa de lubricante).
- Se llena el recipiente y cuidadosamente se desliza el plato de vidrio sobre la abertura del recipiente de tal forma que se asegure que no existen burbujas de aire atrapadas y que el recipiente esté lleno completamente con agua. Se remueve el exceso de agua y se determina la masa del plato de vidrio, agua, y recipiente. Es necesario también tomar la temperatura del agua. Se calcula el volumen del recipiente de la siguiente forma:

$$V = (M_{asa\ 2} - M_{asa\ 1}) \times V_a$$

Es decir, se determina el volumen (ml) por la resta de las dos masas (gr) tomadas (el recipiente junto al plato de vidrio, y el recipiente junto al plato de vidrio y el agua que cubre todo el molde) multiplicadas por el volumen (ml/g) de agua basado en la temperatura tomada que se determina en la siguiente tabla.

Tabla II. **Volumen de agua por gramo, basado en la temperatura (V_a)**

Temperatura		Volumen de agua (ml/g)
°C	°F	
12	53,6	1,00048
14	57,2	1,00073
16	60,8	1,00103
18	64,4	1,00138
20	68,0	1,00177
22	71,6	1,00221
24	75,2	1,00268
26	78,8	1,00320
28	82,4	1,00375
30	86,0	1,00435
32	89,6	1,00497

Fuente: Anexo. Norma ASTM D 2167

Se repite el mismo procedimiento para todos los recipientes o moldes hasta tres volúmenes consecutivos, debiendo tener una variación máxima de 0.0001 pie^3 ($2.8 \times 10^{-6} \text{ m}^3$). Posteriormente se guarda el promedio de los tres intentos como el volumen del molde contenedor (V_i).

- Ensayo de chequeo de calibración: Se coloca el aparato de globo de hule sobre el plato base en una superficie horizontal lisa. Se aplica presión por medio del aparato y se toma una lectura inicial de presión e indicador de volumen.

- Posteriormente se transfiere de lugar el aparato a uno de los moldes o recipientes calibrados anteriormente por medio de la ayuda de una superficie horizontal de apoyo. Se aplica presión por medio del equipo tanto como sea necesaria hasta que ya no exista cambio en el indicador de volumen, y por consiguiente el globo de hule haya llenado todos los espacios del molde. Dependiendo en el tipo de aparato, el aplicador de presión debe medir al menos 5 psi (34,5 kPa).
- Es posible que sea necesario colocar cargas extras para evitar que el aparato se levante, por lo tanto se debe tomar nota de tanto las sobrecargas así como las cargas internas de aparato, y el cambio de volumen. La diferencia entre la lectura inicial y final del indicador de volumen, es el volumen del recipiente. Para retirar el equipo, se libera una válvula de aire que trae el equipo la cual libera de presión al globo para poder sacarlo fácilmente.
- Luego se determinan los volúmenes de los otros moldes y recipientes. Una calibración exitosa del aparato de globo de hule ha sido lograda cuando la diferencia entre el volumen indicado y el calibrado es de 1 % o menos, para todos los volúmenes tomados.
- Se selecciona la presión de operación óptima y se guarda el dato para el uso del aparato durante las operaciones de ensayo en campo.
- Recomendaciones: Es recomendable que la presión operativa ejercida por el aparato se mantenga tan baja como sea posible mientras se mantiene el 1 % de la exactitud del volumen.

- El uso de presiones mayores que las necesarias pueden requerir la aplicación de sobrecargas para prevenir que se levante el aparato. La combinación de presión con sobrecargas puede resultar en deformaciones alrededor e interior del agujero en el ensayo.

3.4.2. Manual de uso

El presenta manual describe explícitamente el procedimiento a realizar para su utilización en el campo. Se brindan algunos modelos y consideraciones principales para su empleo.

3.4.2.1. Modelos

Existen varios modelos del aparato de globo de hule los cuales fueron elaborados por distintas exigencias como diferentes rangos de indicadores de volumen, o de presión aplicable, o tamaños, etc. Existen dos categorías principales que se distinguen por su forma:

- Voluvessel, 1/20 cu. ft. (1 600 ml) de capacidad
- Voluvessel, 1/13 cu. ft. (2 230 ml) de capacidad

Dentro de estas clasificaciones existen dos clasificaciones adicionales para cada una, las cuales son las siguientes:

- Voluvessel, con manómetro y aplicador de presión en la tapadera.

Figura 6. **Voluvessel de manómetro en tapadera**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012.

- Voluvessel, con manómetro y aplicador de presión en la base adjunta.

Figura 7. **Voluvessel con manómetro en base**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012.

3.4.2.2. Ensayos de aplicación

Los principales ensayos de aplicación del aparato de globo de hule más conocido como Voluvessel se basan en la determinación de la densidad en campo y peso unitario, en todo tipo de suelo granular fino compactado. Principalmente está orientado a verificar el grado de compactación del suelo para obras como terraplenes, carreteras, cimentaciones de estructuras, etc.

3.4.2.3. Aparato de globo de hule

El aparato de globo de hule consiste en un recipiente cilíndrico de alta resistencia abierto en ambos extremos, graduado en pies cúbicos y centímetros cúbicos, con una membrana delgada (globo de hule) de 1 dm³ de capacidad, flexible y elástica, designada para medir el volumen del agujero del ensayo bajo las condiciones de este método.

El aparato se adapta a un plato base metálica, el cual viene incluido en el aparato para que no existan problemas de medidas ya que debe ser una unión perfecta. Los accesorios del aparato como el manómetro, inyector y liberador de presión también se incluyen los cuales solo deben de ser atornillados a la tapadera metálica del recipiente la cual viene diseñada para el procedimiento.

El inyector o bujía es hecha de un material elástico el cual cumple dos funciones principalmente, aplicar presión y succión dentro del recipiente. Para aplicar presión basta con apretar la bujía suelta y verificar donde sale el aire ya que de ese lado se aplica la presión y debe ser colocado en su adaptador de la tapadera metálica del recipiente. Y para aplicar succión basta con cambiar de dirección la bujía adaptándola nuevamente en el mismo sitio.

El aparato debe de estar equipado para que se pueda aplicar una presión controlada externa o una liberación parcial de presión al líquido del recipiente. Debe de ser de tal tamaño o peso, que no cause deformación al agujero excavado del ensayo y al área adyacente del ensayo durante la ejecución del mismo. Debe proveer un controlador de manómetro de presión u otro aparato similar para controlar la presión aplicada durante la calibración y el ensayo.

Se debe proveer un espacio para la aplicación de sobrecargas en el aparato. También debe tener un indicador de volumen que se ajuste al cercano 1%. La membrana flexible debe ser de tal tamaño y forma que se adapte para llenar el agujero del ensayo completamente sin arrugas o dobladuras cuando se encuentre expandido en el agujero del ensayo; además la resistencia de la membrana debe ser suficiente para soportar la presión y debe asegurar que llena completamente el agujero sin pérdida de líquido, para retirar la membrana o globo de hule del agujero, el aparato debe contener una válvula de liberación de presión.

Figura 8. **Globos de hule para ensayo**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012. Modelo H-4166.

Un plato base metálico es dispuesto para adaptar el aparato de globo de hule sobre él. El plato debe tener como mínimo una dimensión de lado de por lo menos dos veces el diámetro del agujero de ensayo mientras soporta el aparato y las sobrecargas si son utilizadas.

También se utilizan balanzas y escalas tal como se describe en el capítulo del método de cono de arena. Una balanza de escala que tenga como mínimo 20 kg. El ensayo de determinación de densidad por el método de globo de hule también necesita de aparatos de secado como equipo especial o estufas en el campo para la determinación del contenido de humedad.

Por último es necesario para el desarrollo del ensayo contar con algunas herramientas elementales como: cincel, martillo, cucharas, brochas, clavos, bolsas plásticas, bandejas metálicas, sobrecargas, espátulas, calculadora, regla para cálculos varios, principalmente la profundidad del agujero del ensayo.

3.4.2.4. Accesorios de calibración

El siguiente equipo forma parte y es requerido adicionalmente a los accesorios del ensayo para la calibración del método de globo de hule.

- Termómetro, de precisión de 1°F (0.5°C).
- Plato de vidrio de ¼" (6 mm) de grueso o más, y de diámetro suficiente para cubrir los moldes o recipientes de calibración que oscilan entre 4" a 6" de diámetro.

- Moldes de calibración. Contenedores de diferente volumen conocido que representan los agujeros del ensayo de globo de hule que se realizan en el campo.

3.4.2.5. Medidas específicas

Primero, es importante que se resalte el hecho que el método de globo de hule para la determinación de la densidad de campo y peso unitario se puede realizar en diferentes localidades del terraplén o suelo compactado donde lo requiera siempre y cuando cumpla las condiciones que se establecen en las consideraciones generales.

Segundo, para la presentación de resultados conviene presentar las medidas específicas acorde a lo que requiere la norma como mínimo, por lo tanto se deben realizar un reporte con las siguientes características y exigencias.

- Localidad del ensayo
- Elevación de la localidad
- Volumen del ensayo en m^3
- Densidad en campo húmeda en mg/m^3 o kg/m^3
- Peso unitario seco, kilonewton sobre metro cúbico (densidad seca por 9,807), o libra sobre pie cúbico (densidad seca por 62,43).
- Contenido de agua en campo del suelo presentado en porcentaje de masa seca, método y norma utilizada.
- Identificación y presión utilizada del aparato del ensayo
- Descripción visual del suelo

Si la densidad de campo y peso unitario es presentada como un porcentaje de otro valor, se incluye la siguiente información:

- Identificación del método o valor utilizado.
- La comparación de densidad seca máxima o peso unitario y el contenido de humedad óptimo utilizado.

3.4.2.6. Forma de uso

Principalmente se refiere a la forma de aplicación de las cargas aplicadas durante el ensayo de globo de hule, es decir, comúnmente se aplica solo presión interna durante el ensayo para que el globo de hule llene completamente el agujero y se pueda leer el volumen por medio del indicador, así como la presión aplicada por medio del manómetro, pero en ciertas ocasiones es necesario la aplicación de cargas extras en caso de que el globo no haya llenado toda la sección de agujero y se requiera poner más presión interna.

Al aplicar más presión interna, el aparato tendrá una tendencia a levantarse lo cual estropea totalmente el ensayo y se debe repetir. Estas circunstancias dependerán principalmente del volumen del agujero y que tan bien este excavado para que el globo lo llene fácilmente. Por este motivo existen dispositivos de venta los cuales incluyen sobrecargas. Este dispositivo se adapta al aparato de globo de hule fácilmente y en el caso de que se requieran sobrecargas se aplican, y no es necesario tomar su peso sino que ya lo trae graduado.

3.4.2.7. Procedimiento

El procedimiento del método de globo de hule para la determinación de la densidad de campo y el peso unitario se describe a continuación como sigue:

- Verificar el aparato de desperfectos mecánicos o ruptura del globo de hule.
- Se coloca el globo de hule en la roldana inferior de la base metálica del recipiente cilíndrico y se ajusta de modo que no pueda zafarse del aparato por medio del hule adaptador.
- Se verifica la escala del indicador de volumen que se encuentra en el recipiente cilíndrico.
- Se adapta el manómetro, la bujía de aplicación de presión y succión y la válvula de liberación de presión a la tapadera superior como muestra la figura 9. El manómetro y la bujía van en el mismo adaptador como se observa en la tapadera, en el proceso de ensamblaje se enrosca el adaptador que es el mismo que contiene el manómetro en la figura de la tapadera armada.
- Se enrosca la tapadera inferior al recipiente de cilíndrico
- Se procede a llenar el recipiente cilíndrico con agua. La medida final dependerá de las circunstancias, debe cumplir con la suficiente agua como para llenar el agujero y un poco más para que esta no se salga de la escala mostrada. Se recomienda colocar agua hasta llegar a 500 centímetros cúbicos exactos de la escala del recipiente.

- Posteriormente se enrosca la tapadera superior con la válvula abierta
- Se prepara la superficie donde se realizará el ensayo de tal forma que quede plana, nivelada y libre de obstáculos sin partículas grandes. Dependiendo en el contenido de agua y la textura del suelo la superficie debe ser nivelada usando un *bulldozer* (compactador), para comprobar que el área de ensayo no está deformada, sobre compactada, torneada, o de alguna manera deformada.
- Se ensambla el aparato en el plato metálico en la localidad elegida
- Usando la misma presión y sobrecarga determinada durante la calibración del aparato y con la válvula de liberación cerrada se aplica presión por medio de la bujía y se toma una lectura inicial.
- El plato base debe permanecer en el mismo lugar durante todo el ensayo. La lectura inicial garantiza un mejor resultado del volumen ya que llena espacios entre la parte final del aparato hasta la superficie de la tierra que se encuentra sin estar excavada aún, lo cual reduce este porcentaje de volumen que no cuenta como parte del volumen del agujero excavado.
- Se remueve el aparato del área del agujero del ensayo liberando la presión por medio de la válvula y cambiando la bujía a modo de succión. Se cierra la válvula nuevamente para poder aplicar la succión y poder movilizarlo sin que el globo se salga y explote.
- Usando cucharas, cinceles, martillos, y todas las herramientas necesarias, se excava el agujero determinado por el perímetro del plato base y la profundidad determinada para el tamaño máximo de partícula del suelo. Para realizar el agujero se necesita de práctica en la

excavación para que el suelo alrededor de la esquina de arriba no se deforme. El agujero del ensayo debe tener volumen mínimo como se muestra en la siguiente tabla, basada en el tamaño máximo de partícula en el suelo de ensayo.

Tabla III. **Volúmenes mínimos de agujeros de ensayo basado en el tamaño de partículas máximas**

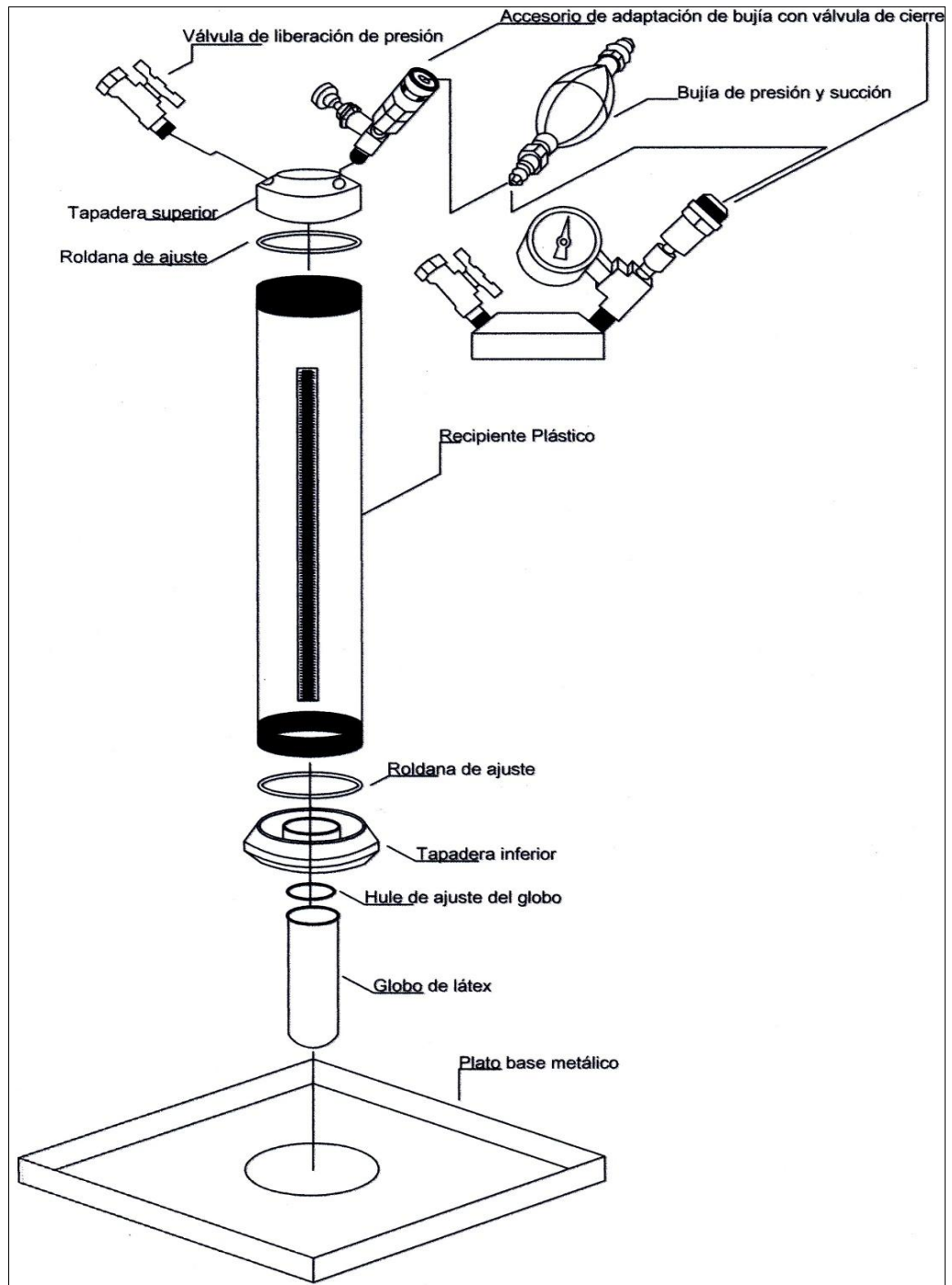
Tamaño máximo de partícula		Volumen mínimo de agujero		Cantidad mínima para muestra de contenido de humedad
Pulgadas	mm	cm ³	pie ³	g
½	12,5	1420	0.05	500
1	25,0	2120	0.075	1 000
1½	37,5	2840	0.1	2 000

Fuente: elaboración propia.

- Si se encuentran partículas de mayor tamaño o si grandes partículas aisladas fueran halladas, entonces se moverá de localidad o se cambiara de método. Cuando prevalecen partículas mayores a 1½" (37.5 mm), aparatos más grandes o volúmenes de ensayo son requeridos. Volúmenes mayores de agujeros proporcionan mayor exactitud.
- Las dimensiones óptimas del agujero de ensayo, están relacionadas con el diseño del aparato de globo de hule, así como de la presión utilizada. En general, las dimensiones se deben aproximar a las utilizadas en el proceso de la calibración. El agujero debe mantenerse libre de obstrucciones tanto como sea posible, ya que ellas pueden afectar la precisión o pinchar la membrana de hule.

- El suelo extraído debe pesarse para determinar una masa húmeda y debe guardarse una bandeja aparte. Posteriormente se determina el contenido de humedad de la muestra de suelo colocándolo en un horno a 110°C por al menos 24 horas para después determinar su peso seco y posteriormente por medio de cálculos descritos más adelante se determina la humedad (%w). Si no se cuenta con un horno al alcance, se pueden utilizar estufas o el aparato *Speedy*.
- Después de haber cavado el agujero se coloca el aparato sobre el plato base en la misma posición que se colocó en la lectura inicial. Con mucho cuidado se abre la válvula de presión, se podrá observar como el globo baja inmediatamente por gravedad sobre el agujero. Posteriormente se cambia la bujía a modo presión y se cierra la válvula para poder aplicarla. Se aplica presión hasta asegurarse de que el globo se halla adaptado al contorno del agujero lo mejor posible, y se toma una segunda lectura.
- La diferencia entre la lectura inicial y la última lectura del indicador de volumen determina el volumen del agujero, V_a .
- Se retira el aparato liberando la válvula de presión, colocando la bujía en modo succión, se cierra la válvula y se procede a aplicar la succión de modo que el globo no se salga abruptamente. En una superficie plana se coloca el aparato, se libera la válvula y se abre la tapadera del mismo y con mucho cuidado se voltea para sacar el agua. Se seca el equipo guardándolo en un lugar seguro para un posterior uso.
- A continuación se muestra el diagrama del aparato junto con sus líneas guías de ensamblaje para una mejor ilustración.

Figura 9. Diagrama del Manual del aparato de Globo de Hule



Fuente: elaboración propia, con AutoCad 2010.

3.4.2.8. Consideraciones generales

El factor importante de éste método es la exactitud y precisión con la que se aplica, es decir, para que el método arroje datos aproximados al valor verdadero se necesita realizar el ensayo con mucha precaución. Por ejemplo, en la realización del agujero, es necesario cavar lo más uniformemente posible para que el globo de hule pueda adaptarse y llenar todos los espacios posibles y de esa manera determinar correctamente el volumen del agujero.

Otra consideración importante, es que a pesar que el aparato viene calibrado de fábrica, siempre es recomendable verificar la calibración por medio de los pasos descritos anteriormente.

Es importante que el aparato este lo mejor posible ajustado y que todas las piezas se encuentren en su lugar para que el aparato funcione correctamente, todas éstas consideraciones son necesarias para un buen uso del equipo y que el ensayo arroje los datos más exactos.

3.5. Cálculos generales

Para la determinación del peso unitario seco del material utilizando el método del globo de hule se realizan una serie de cálculos, los cuales se presentan a continuación.

- Se calcula el porcentaje de contenido de humedad (w) del suelo como sigue:

$$W = \frac{\text{Peso humedo del suelo excavado}}{\text{Peso seco del suelo excavado}} \times 100$$

- Cálculo del volumen del agujero (v_a) en cm^3

$$V = V_{\text{final}} - V_{\text{inicial}}$$

- Cálculo de la densidad de campo húmeda (D_h) del suelo removido del agujero del ensayo en (g/m^3)

$$D_h = \frac{M_{\text{humeda}}}{V_a(1 \times 10^3)}$$

- Se calcula la densidad de campo seca (D_s) del suelo removido del agujero del ensayo en (g/m^3)

$$D_s = \frac{D_h}{1 + \frac{w}{100}}$$

- Se calcula el peso unitario seco en campo como sigue:

$$\text{PUS} = D_s \times 9.807 \text{ en } \text{kN}/\text{m}^3$$

$$\text{PUS} = D_s \times 62.43 \text{ en } \text{lb}/\text{pie}^3$$

4. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE CAMPO POR MEDIO DEL DENSÍMETRO NUCLEAR

AASHTO T 310: *Standard Specification for In-Place Density and Moisture Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth)*

ASTM D 2922: *Standard Test Method for Density of Soil and Soil-Aggregate in Place by Nuclear Methods (Shallow Depth).*

4.1. Consideraciones generales

El método del densímetro nuclear es un método preciso, rápido y eficaz. El proceso se realiza por medio de un aparato electrónico el cual es capaz de medir directamente en el sitio la densidad y humedad del suelo, agregados y asfaltos; por medio de la atenuación de radiaciones gamma donde la fuente y el detector permanecen en la superficie; o la fuente o el detector es colocado a una profundidad conocida aproximadamente 300 mm (12”), mientras el detector o fuente permanece en la superficie dependiendo del método de ejecución.

La determinación de la densidad en la masa por unidad de volumen del material bajo ensayo es calculada por medio de la comparación de la tasa detectada de radiación gamma con información calibrada establecida anteriormente.

El método se basa en que la cantidad de electrones presente por unidad de volumen en el suelo es proporcional a la densidad del mismo. Por lo tanto se puede correlacionar el número de rayos gamma dispersos con el número de

rayos detectados por unidad de tiempo, el cual es inversamente proporcional a la densidad húmeda del material. La lectura de la intensidad de la radiación es convertida a medida de densidad húmeda por medio de curvas de calibración del mismo equipo con que se realizó el ensayo.

El método del densímetro nuclear también cubre la determinación del contenido de humedad del suelo y agregados por medio de la termalización o por medio de alentar los neutrones rápidos donde la fuente de neutrones y el detector termal neutrón, ambos permanecen en la superficie. El contenido de agua en masa por unidad de volumen del material se determina comparando la tasa de detección de la termalización o el alentar los neutrones con la información calibrada establecida anteriormente.

4.2. Descripción del ensayo del densímetro nuclear

El método para determinación de la densidad por medio del densímetro nuclear es de los más eficientes métodos no destructivos. Se basa en 3 formas de transmitir la radiación los cuales se describirán más adelante:

- Retro dispersión
- Transmisión directa
- Colchón de aire

4.3. Significado y aplicaciones

Los tipos de formas en que se desarrolla este método, que se describirán más adelante, son útiles así como rápidas y no destructivas técnicas para la determinación de densidad y el contenido de humedad en el suelo y agregado. Estos métodos son adecuados para el control de calidad del ensayo, para la

construcción e investigación. La naturaleza no destructiva de los ensayos permite la repetitividad de las mediciones a ser realizadas en una sola localidad.

Para el caso de la determinación de humedad, los principales fundamentos o bases inherentes en el ensayo del método son que el hidrógeno presente está en forma de agua, y que el material bajo ensayo es homogéneo. Los resultados del ensayo pueden verse afectados por la composición química, muestra heterogénea y debido a un grado menor de la densidad del material y textura de la superficie del material a ensayar.

Rocas muy grandes o espacios de vacíos muy grandes que se encuentren en el paso de la fuente-detector pueden causar densidades erróneas, pueden ser mayores o menores al valor real. Cuando se sospecha de una falta de uniformidad en el suelo debido a las capas, rocas o vacíos, el volumen del ensayo del sitio debe ser excavado y ser examinado visualmente para examinar y determinar si el material a ensayar puede ser representativo del material entero en general y si correcciones por rocas son requeridas.

La muestra del volumen para el método de retro dispersión es de aproximadamente 0.0028 m^3 (0.10 pie^3) y para el método de transmisión directa es de 0.0057 m^3 (0.20 pie^3), cuando la profundidad del ensayo es de 15 cm (6"). La muestra actual de volumen es indeterminada y varía con cada aparato y densidad del material. En general, mientras mayor sea la densidad menor es el volumen en el ensayo.

Para el caso de la determinación del contenido de agua, la composición química de la muestra puede afectar dramáticamente las mediciones y ajustes que sean necesarios. El hidrógeno en otra forma que no sea agua, y el carbón pueden causar valores mucho más altos que el real.

El contenido de agua que se determina a través de este método no es necesariamente el promedio de agua con el volumen de la muestra que se utiliza en las mediciones. La medición es grandemente influenciada por el contenido de agua del material cercano a la superficie, el del suelo y agregado representado en la medición es indeterminado también y varía con el contenido de agua del material, de esta manera, mientras más grande sea el contenido de agua en el material menor será el volumen de la medición.

Si es necesario muestras del material medido para propósitos de correlación con otros métodos de ensayo o corrección por rocas, el volumen medido puede ser aproximadamente 200 mm (8") de diámetro del cilindro ubicado directamente debajo la línea central de la más rápida fuente de neutrón y detector termal de neutrón. La altura del cilindro a ser excavado se determina según la siguiente tabla:

Tabla IV. **Medidas de muestras de material para el contenido de humedad**

Contenido de humedad		Altura del cilindro		Volumen	
kg/m ³	lbf/pie ³	Mm	Pulgada	m ³	pie ³
80	5	250	10	0,0079	0,29
160	10	200	8	0,0063	0,23
240	15	150	6	0,0047	0,17
320	20	125	5	0,0039	0,15
400	25	112	4,5	0,0035	0,13
480	30	100	4	0,0031	0,12

Fuente: Tabla de Norma ASTM D 3017.

4.4. Procedimientos de determinación

Para la aplicación y ejecución de este método se siguen los siguientes pasos:

- Se selecciona la ubicación; si el densímetro se encuentra en una distancia menor de 250 mm (10") de cualquier proyección vertical que pueda influenciar en el resultado como una zanja o una tubería, se debe seguir el proceso de corrección de fábrica para el equipo.
- Se remueve todo el material disperso o que puede interferir con el ensayo. Se remueve el material tanto para llegar al material que verdaderamente representa una muestra válida de la zona.
- Se debe aplanar así como raspar el suelo para llegar a una superficie horizontal lisa y obtener el máximo contacto entre el densímetro y el material a ser ensayado. La colocación del densímetro en la superficie del material a ser ensayado es crucial para el éxito de la determinación de densidad utilizando el tipo de medición de retro-dispersión. La condición óptima en todos los casos es el contacto total entre la superficie inferior del densímetro y la superficie del material que se ensaya.

Como se explicó anteriormente existen 3 principales métodos de medición no destructivos para la determinación de la densidad por medio del densímetro nuclear, los cuales se presentan a continuación.

4.4.1. Retro-dispersión

La medición no destructiva de la densidad por la retro-dispersión, es una medición rápida y eficaz, se basa en que las emisiones gamma y los detectores permanecen dentro del densímetro, que se coloca lo más pegado posible sobre la superficie de una muestra valida de representación del material de ensayo. Las emisiones gamma penetran el material a ser ensayado, las cuales a su vez son recibidas por los detectores los cuales las cuantifican. El método de retro-dispersión es usado principalmente en capas delgadas asfálticas y capas delgadas de concreto hidráulico, en la siguiente figura se representa como se transmiten las emisiones gamma por este método.

Figura 10. **Medición por retro-dispersión**



Fuente: Catálogo de modelo densímetro nuclear Troxler *Road Readers*™.

4.4.2. Transmisión directa

El método de medición de transmisión directa es el más riesgoso debido a que la fuente radiactiva sale del aparato. Mediante una varilla de perforación se realiza un orificio de acceso de una profundidad y alineación tal que se asegure que la inserción de la fuente gamma no se ladee con respecto al plano del área preparada para el ensayo. La profundidad del orificio debe ser mayor que la profundidad de donde se colocará la fuente.

De este modo las emisiones gamma se transmiten a través del material de ensayo hacia los detectores dentro del densímetro. El método minimiza la incertidumbre causada por las superficies rugosas y la composición química del material, y así obteniendo un gran grado de exactitud. La transmisión directa es utilizada para la supervisión de capas de espesor medio a grueso de suelos, agregados, capas asfálticas y losas de concreto. Para la correcta ejecución de la medición se toman en cuenta las siguientes consideraciones específicas que optimizan la utilización del método y aseguran la exactitud de los resultados.

- Se coloca el densímetro en la superficie del suelo cuidadosamente se alinea de manera que la sonda este directamente sobre el orificio preformado.
- Posteriormente se inserta la sonda en el orificio
- El densímetro se debe asentar firmemente rotándolo sobre la sonda
- Cuidadosamente se jala el densímetro en la dirección que traerá el lado de la sonda en contra del lado del agujero que está más cerca de la localidad del detector (fuente).

- Se aleja todo tipo de fuente radioactiva del densímetro para evitar afectar la medición.
- Posteriormente se realizan y guardan uno o más lecturas del periodo normal de medición.
- Por último se determina la tasa de la lectura de la cuenta estándar. De esta tasa y la apropiada calibración y ajustes de datos, se determina la densidad de campo.

A continuación se presenta una ejemplificación de cómo se transmiten las emisiones gamma por el método de transmisión directa.

Figura 11. **Medición por transmisión directa**



Fuente: Catálogo de modelo densímetro nuclear Troxler *Road Readers*™.

4.4.3. Colchón de aire

El método de colchón de aire es diferente respecto de los otros métodos debido a que en este caso el densímetro nuclear no tiene un contacto directo con la superficie del suelo a ensayar, enés es colocado sobre unos soportes los cuales crean un espacio vacío, es decir, el colchón de aire. Este método requiere además de la toma de una o más lecturas en la posición de retro-dispersión para la comprobación de las mediciones, lo cual lo hace un método poco eficiente y bastante lento. Se muestra en la siguiente figura, como se coloca el aparato y la dirección de las emisiones gamma.

Figura 12. **Medición por método del colchón de aire**



Fuente: Catálogo de modelo densímetro nuclear Troxler *Road Readers*™.

- Humedad
 - Para el caso de la determinación de la humedad del suelo por medio del método no destructivo del densímetro nuclear, la fuente de neutrones y el detector deben de estar dentro del densímetro y sobre la superficie del suelo de ensayo.
 - Las emisiones de neutrones a alta velocidad se introducen en la capa de material evaluada y se detienen parcialmente por colisiones contra los átomos de hidrógeno dentro del material, el detector de helio dentro del densímetro determina la cantidad de neutrones termalizados, que se correlaciona directamente con la cantidad de humedad en el material.

Figura 13. **Medición de humedad**



Fuente: Catálogo de modelo densímetro nuclear Troxler *Road Readers*™.

4.5. Equipo

Es un equipo que se basa en la emisión de rayos gamma mediante fuentes de elementos radioactivos, existen distintos modelos a elección, a continuación se presentan los elementos de un modelo estándar.

4.5.1. Elementos

El equipo del densímetro nuclear se compone principalmente de los siguientes componentes:

- Densímetro nuclear:

Es un instrumento de conteo electrónico, capaz de ser colocado en la superficie de material bajo ensayo y realizar conteos a través de emisiones gamma, el cual contiene:

- Una fuente sellada de alta radiación de energía gamma la cual puede ser cesio o radio.
- Detector Gamma: cualquier tipo de detector gamma como puede ser los tubos Geiger-Mueller.
- Bloque de referencia estándar: un bloque de material utilizado para el chequeo de la operación del densímetro y para establecer condiciones para una referencia de reproducción del ensayo.
- Aparato de preparación del sitio: un plato, regla o cualquier instrumento de nivelación adecuado el cual puede ser usado para

aplanar el sitio del ensayo, y en el método de transmisión directa guiar la unidad de perforación para preparar el agujero perpendicular.

- Varilla guía de perforación: es una varilla de un diámetro mayor a la carilla del instrumento para la medición de transmisión directa, utilizada para preparar un agujero en el material bajo ensayo.
- Extractor de la varilla de perforación: es una herramienta que se utiliza para remover la varilla guía de perforación en una dirección vertical para que la varilla no dañe el agujero durante la extracción.
- Dos cargadores adaptadores: es un adaptador para CC (12VCC) y el otro para CA (115/230 VCA 50/60 Hz.).

4.5.2. Modelos

Existen varios modelos del densímetro nuclear, con infinitas características cada uno dependiendo las necesidades del usuario. Principalmente se describirán brevemente dos modelos del densímetro en éste trabajo de graduación, los cuales son: Troxler 3440 y 3430.

Existen otros modelos de densímetro nuclear que incluyen otras características que no se describirán. Dentro de ellos podemos mencionar densímetros Troxler: 3430 plus, 4640-B, 3450, 3216; Humboldt: HS-5001EZ081, HS-5001EZ082, HS-5001EZ121, HS-5001EZ122, entre otros.

4.5.2.1. Modelo Troxler 3440

Este modelo de densímetro nuclear Troxler cuenta con las siguientes características:

- Peso liviano de 13.2 kg (29 lb)
- Reporte directo en la pantalla de densidad húmeda, densidad seca, humedad, porcentaje de humedad, porcentaje de vacíos y porcentaje de compactación.
- Baterías recargables NICAD o baterías alcalinas de relevo
- Guías de operación en pantalla
- Almacenamiento de datos: el modelo es capaz de almacenar hasta 450 registros de ensayos los cuales se pueden almacenar y transferir a una computadora o impresora. Utiliza un software llamado “*Roadreader DMS*” el cual viene incluido con el densímetro nuclear. Sirve para el análisis y reporte vía computadora personal.
- Indexado automatizado: este elimina la fuente de error humano en la programación de la profundidad del ensayo. Puede determinar automáticamente la profundidad de la medición.
- Funciones especiales: dentro de las cuales se pueden mencionar la auto-verificación y programas de servicio; selección de precisión; y calibración en el lugar del proyecto para materiales especiales.

4.5.2.2. Modelo Troxler 3430

Este modelo de densímetro nuclear Troxler cuenta con las siguientes características:

- Peso liviano de 13.2 kg (29 lb)
- Reporte directo en la pantalla de densidad húmeda, densidad seca, humedad, porcentaje de humedad, porcentaje de vacíos y porcentaje de compactación.
- Baterías recargables NICAD o baterías alcalinas de relevo
- Guías de operación en pantalla

Figura 14. Densímetro nuclear modelo Troxler 3440



Fuente: Catálogo de modelo densímetro nuclear Troxler *Road Readers*™.

4.5.3. Calibración del equipo

Densímetros nucleares nuevos deben ser calibrados antes de su uso. Incluso equipos viejos deben ser calibrados después de reparaciones que pudieron afectar la geometría del equipo. Densímetros existentes deben ser calibrados para restablecer las curvas de calibración, tablas, o coeficientes equivalentes si el densímetro no cumple con las tolerancias específicas en el proceso de verificación.

4.5.3.1. Respuesta de calibración

La respuesta de calibración del densímetro debe ser de $\pm 16 \text{ kg/m}^3$ en el bloque en el cual el densímetro fue calibrado. Esta calibración puede ser realizada por el fabricante o el usuario, la respuesta del instrumento nuclear está influenciada por la composición química de los materiales de ensayo, esta respuesta debe ser tomada en cuenta para establecer la densidad de bloque estándar. El bloque utilizado para la calibración debe ser capaz de generar una curva general y segura que cubra el rango entero de densidad de los materiales a ser ensayados en el campo. La densidad de este bloque estándar debe ser determinada con una precisión de $\pm 0.2 \%$.

Suficiente información debe ser tomada en cada bloque estándar de densidad para asegurar la determinación de precisión de un instrumento requerido para el uso de campo.

Los estándares exitosos que se han establecido de calibración, se han realizado con magnesio, aluminio/magnesio, granito y caliza. Estos estándares han sido utilizados en combinaciones entre ellos con curva de información histórica y bloques para producir una calibración precisa y segura.

4.5.3.2. Curvas de calibración

Las curvas de calibración se establecen para convertir las medidas determinadas por el densímetro a porcentajes de mediciones conocidas. Estas se establecen determinando la razón de conteo nuclear de cada uno de distintos materiales de densidades conocidas y posteriormente trazando la razón de conteo contra densidad y ajustando una curva a través de los puntos resultantes.

El método que se utiliza para establecer la curva, es el mismo para determinar la densidad de campo. Se determina las densidades de los materiales mencionados en la calibración como la del magnesio, aluminio, caliza o granito para establecer la curva de calibración. Estos materiales deben ser uniformes y variar dentro de un rango de densidades que incluya la del suelo de ensayo.

Se debe realizar un chequeo de las curvas de calibración si el equipo es nuevo o de reciente adquisición o si los resultados de los ensayos se estiman inexactos. Si se utiliza el método de cono de arena para comprobar la curva de calibración, se compara el promedio de al menos 5 mediciones con el densímetro nuclear y una con el cono de arena en exactamente la misma posición en el campo.

Si la densidad de cada uno de los ensayos de comparación determinados por el cono de arena varía de $0,08 \text{ g/cm}^3$ de la densidad determinada por el densímetro nuclear y si el promedio de los ensayos de cono de arena difiere en menos de $0,032 \text{ g/cm}^3$ del promedio de las mediciones nucleares, no es necesario hacer ajustes a la curva de calibración.

De otro modo, si el promedio de las determinaciones de densidad por el cono de arena está a más de $0,032 \text{ g/cm}^3$ por sobre o debajo del promedio de las mediciones del densímetro, los siguientes ensayos deberán ser ajustados en el monto de la diferencia de los promedios, y así trazando una curva de calibración corregida la cual sería paralela a la original.

4.5.3.3. Precisión del equipo

La precisión del equipo está definida como el cambio de densidad correspondiente a una desviación estándar en la cuenta o medición debido a la decadencia aleatoria de la fuente radioactiva.

La densidad del material y el tiempo del período de la medición deben ser establecidas en cuentas por minuto.

La desviación estándar debe ser determinada a partir de 20 o más pruebas tomadas sin mover el instrumento.

La precisión del sistema, partiendo del modo anterior, se expresa de la siguiente manera:

$$P = \frac{\sigma}{S}$$

Dónde:

- σ = Una desviación estándar de la cuenta.
- S = Pendiente de la curva de calibración definida como valor de densidad.

4.5.3.4. Normalización

La normalización se realiza cada día de uso y cuando las medidas de los ensayos no demuestren confiabilidad. Es necesario realizar chequeos de operación del equipo con un patrón de referencia dado por cada medidor.

Posteriormente, después de emplear un tiempo de estabilización para el equipo de acuerdo a las instrucciones del fabricante, se procede a realizar al menos 4 lecturas repetitivas de 1 minuto cada una sobre el patrón de referencia. Los límites de aceptación están dados por la siguiente expresión:

$$N_s = N_o \pm 1,96 \sqrt{N_o}$$

Donde:

- N_s = Cuenta medida al chequear la operación sobre el patrón de referencia.
- N_o = Cuenta establecida previamente en el patrón de referencia.

4.5.3.5. Criterios de evaluación

Se siguen los siguientes criterios para evaluación de la normalización:

- El chequeo se debe repetir si la media de las lecturas repetitivas se encuentra fuera de los límites de aceptación.
- El equipo se considera en condiciones satisfactorias si el segundo chequeo cumple con los límites de aceptación.

- La curva de calibración necesita de chequeo si el segundo chequeo no cumple con los límites establecidos.
- Se efectúa un nuevo conteo de referencia N_0 si el chequeo de la curva de calibración muestra que no hay cambios significativos o diferencias significativas en ella.

4.5.4. Métodos de operación segura

El método del densímetro nuclear es muy efectivo, rápido y no destructivo; pero al mismo tiempo es muy riesgoso dado que contiene material radioactivo que puede afectar la salud de los operarios, principalmente se tiene mucho cuidado en aspectos como la operación, el almacenamiento y transporte.

Para poder operar el densímetro es necesario contar con la experiencia suficiente y la autorización por medio de una licencia brindada por el Ministerio de Energía y Minas de la República de Guatemala, en este caso. Esto se hace como medida de seguridad principalmente para el operario mismo. Por lo tanto es adecuado seguir las siguientes consideraciones de operación segura.

- Todo operador o persona que esté expuesta a radiaciones a causa de su trabajo deberá contar con un dosímetro personal que consiste en una presilla del cinturón del lado derecho, destinado a detectar y registrar las radiaciones ionizantes. Los dosímetros deberán ser proporcionados por la empresa.
- En ningún caso el operador debe usar un dosímetro asignado a otra persona o prestar el suyo.

- Los dosímetros deben ser utilizados por los operadores exclusivamente durante el desarrollo de las actividades que lo requieran. Está prohibido exponer deliberadamente estos a radiaciones.
- Antes de proceder a la operación con el equipo radioactivo se demarcará el área de trabajo con conos, letreros y el símbolo relacionado con el riesgo de la radioactividad.
- Solo el operador autorizado podrá manipular el equipo, permaneciendo en las proximidades sólo el personal autorizado y restringiendo el ingreso de personal ajeno a la operación.
- Primero se perforará y marcará el suelo y el perímetro de la placa de raspado para que, posteriormente el operador baje el vástago procediendo así a medir.
- Nunca deberá bajarse el vástago sin que el equipo esté completamente apoyado en el suelo y ubicado en la perforación.
- No se trabajará en zonas de vehículos o maquinarias en movimiento coordinando los trabajos con la supervisión a fin de determinar, los accesos, rutas de circulación, zonas de medición y horarios.
- Verificar que las vías de circulación en el área de operación estén expeditas.
- Cuando se finalice la tarea se procederá a guardar y mantener en su caja de transporte el equipo, después se retira la señalización del terreno.

Es de suma importancia tomar en cuenta consideraciones especiales para el almacenamiento del equipo después de su uso y para su transporte; debido que malos usos en este sentido pueden tener consecuencias en la salud y el equipo. A continuación se demarcan consideraciones especiales al respecto.

- La bodega donde se almacene el equipo deberá estar construida con un material sólido que asegure el control de la radiación al exterior.
- En el caso que la bodega se ubique en una obra provisoria y por tanto, los materiales requeridos para la construcción del recinto no se ajusten a lo señalado en el punto (a), se deberá construir un recinto de hormigón previsto de un marco con una tapa metálica de protección con un sistema de cierre con porta candado que lo asegure de terceras personas.
- Debe estar identificada con letreros visibles y alusivos (En la puerta de acceso y los cuatro costados de la bodega) que indiquen “Precaución Material Radioactivo solo personal autorizado”, que incluya el nombre y teléfono de persona encargada.
- Para equipos portátiles de uso en obras viales, cuando estos no se encuentren en uso, serán guardados dentro de este tipo de bodega y en el interior de una caja metálica de hierro, la cual será destinada exclusivamente a contener estos equipos.
- La bodega de almacenamiento será de uso exclusivo para el densímetro, es decir, no guardará otro tipo de equipos, materiales o herramientas.

Para el caso del transporte se toman en cuenta las siguientes consideraciones especiales:

- El transporte del densímetro nuclear debe ser realizado únicamente por personas autorizadas.
- El responsable del transporte deberá chequear el equipo antes de llevarlo, verificar las condiciones en que se encuentra e informar de cualquier anomalía si existiera, así como si cuenta con la autorización correspondiente del Servicio de Salud para su uso y transporte.
- El densímetro nuclear nunca debe ser transportado en la cabina
- Antes de iniciar el camino el encargado de transporte deberá preocuparse que el equipo esté debidamente sujeto para evitar cualquier daño o hurto.
- Nunca se debe dejar el vehículo de transporte con el densímetro en su interior sin una persona que lo custodie.
- Llevar una bitácora de registros con los datos de las salidas e ingresos desde el lugar de almacenamiento del equipo, día hora, lugar de trabajo, además de indicar el nombre del operador responsable.

4.6. Elementos radioactivos utilizados en el método

El densímetro nuclear es un aparato electrónico que incluye varios elementos radioactivos que se deben conocer para analizar su forma de mecanismo y efectos que podrían tener al contacto con el cuerpo humano.

4.6.1. Cesio 137

El Cesio-137 se clasifica como un isótopo del Cesio que se produce principalmente por fisión nuclear. Tiene un periodo de semi-desintegración de 30 años.

El elemento es soluble en agua y también sumamente tóxico en cantidades ínfimas. Una vez liberado al medio ambiente, permanece ahí durante muchos años. Uno de los efectos más dañinos es que puede causar cáncer entre 10, 20 ó 30 años a partir del momento de la ingestión, inhalación o absorción, cuando una suficiente cantidad ingresa al organismo.

Las fuentes donde va el elemento Cesio-137 dentro del densímetro nuclear deben ir selladas y encapsuladas (soldadas) con acero inoxidable para evitar la fuga del material radioactivo. Las emisiones de fotones y neutrones no cuentan con protección.

La utilización del Cesio-137 conlleva un riesgo bastante alto, sirve para la medición de la compactación y determinación de densidad y humedad del material de ensayo, es necesario evitar el contacto directo debido a la manipulación del mismo.

4.6.2. Americio 241

El Americio es una sustancia química radioactiva manufacturada. El Americio no tiene isótopos estables naturales, uno de los dos isótopos más importantes es el Americio-241.

La vida media del americio es de 432 años, lo cual lo hace sumamente peligroso si ingresa al medio ambiente: puede llegar a ser muy dañino dado que después de una exposición al elemento, éste puede llegar a entrar al cuerpo humano concentrándose en los huesos donde permanece por mucho tiempo.

La radiación que se emite por el Americio puede llegar a alterar el material genético de las células de los huesos y esto puede producir cáncer de huesos. La probabilidad de desarrollar cáncer es baja si la dosis es baja, y aumenta a medida que la dosis aumenta. El Americio es un elemento que hay que manipular con mucho cuidado dado que contiene una radio toxicidad muy elevada.

4.6.3. Berilio

El Berilio es un elemento metal grisáceo duro que ocurre naturalmente en rocas, carbón y en polvo volcánico. El mineral de berilio es minado, el elemento es purificado para uso en armas y reactores nucleares. Se utiliza como fuente de elemento radioactivo en el densímetro nuclear, comúnmente va mezclado con el Americio.

El Berilio puede ser muy dañino si se respira, los efectos dependen de la cantidad a la que se está expuesta, la duración de la exposición y la susceptibilidad individual. Altas exposiciones pueden producir condiciones agudas, que es similar a la pulmonía y se llama enfermedad aguda de berilio.

4.6.4. Límites de radiación

Es importante el conocimiento de los límites de radiación a los cuales una persona que normalmente se encuentre expuesta o trabaje con material

radioactivo puede estar. A continuación se presenta un resumen de estos límites dados en (mRem) la cual es una medida de medición de radiación en el cuerpo humano.

Tabla V. **Límites de radiación máximos permisibles en el cuerpo humano**

Dosis máxima permisible para personas expuestas a material radioactivo	
mRem	Tiempo
5000	1 año
400	1 mes
100	1 semana
20	1 día
2,2	1 hora

Fuente: elaboración propia.

4.7. Accidentes comunes en la utilización del equipo

Debido a que se utiliza un densímetro nuclear para la determinación de la densidad el cual contiene materiales radioactivos nocivos para la salud humana se deben considerar las regulaciones siguientes las cuales denotan causas y efectos.

4.7.1. Posibles causas

Se destacan a continuación varios tipos de accidentes que pudieran ocurrir en el almacenaje del equipo, transporte o utilización.

Estos accidentes se podrán evitar si se siguen las consideraciones pertinentes que se establecieron anteriormente.

4.7.2. Incidentes de pérdida o robo de la fuente radiactiva

En esta categoría se denotan más los accidentes por descuido de equipo. Esto podría ocurrir por el abandono de varios accesorios como el equipo medidor, el equipo de transporte o como consecuencia de volcadura del mismo en el transporte.

Otras de las causas de estas eventualidades se pueden dar por no seguir los lineamientos de seguridad física respecto a la vigilancia del equipo medido, cerrar el vehículo de transporte cerrar el almacén de material radioactivo.

4.7.3. Accidentes debido al transporte

Los principales accidentes que se dan debido al transporte pueden ser:

- Choque del vehículo
- Volcadura del vehículo
- Incendio del vehículo

Este tipo de accidentes tienen la misma probabilidad de ocurrencia que cualquier otro tipo de vehículo, debido a esto es necesario tomar todas las medidas de seguridad concernientes.

Otros incidentes que puede ocurrir son los impactos sobre el contenedor, estos se pueden dar por la caída del mismo, caída sobre el contenedor de alguna estructura debido a accidente o derrumbe y aplastamiento inadvertido de

maquinaria pesada. Estos tipos de accidentes tienen como consecuencias la pérdida de la integridad del blindaje de la fuente y por consiguiente fuga de la radiación.

4.7.4. Accidentes de explosión e incendio

Unos de los eventos más catastróficos que se podrían dar son la explosión y el incendio, los cuales traen graves consecuencias principalmente a la salud o a la vida del personal que se encuentre en los alrededores del evento.

Comúnmente después de la explosión se presenta un incendio, por lo tanto es de suma importancia que se tomen todas las precauciones debidas, dado que se establece por norma principal que la vida humana tiene prioridad sobre cualquier aparato o evento.

4.7.5. Primeros auxilios/casos de emergencia

Básicamente los efectos secundarios que pueden causar los elementos radioactivos son de suma gravedad los cuales requieren tratamiento médico el cual rebasa los objetivos de ésta sección del presente trabajo, es por ello que se presentan un breve resumen de los pasos básicos a seguir en el caso de que pueda ocurrir una explosión y como proceder con los primeros auxilios para después proceder al traslado al hospital del o los damnificados.

- Primero es necesario eliminar o suprimir la causa, por ejemplo, si la ropa se encuentra en llamas se debe impedir que el accidentado corra, enrollarlo en una manta o abrigo o hacerlo rodar por el suelo.

- Segundo, se debe proceder a enfriar las quemaduras rociando las regiones quemadas con abundante agua a una temperatura entre 10 y 20 °C, durante 10 o 15 minutos.
- Luego es necesario cubrir las quemaduras protegiéndolas con sabanas limpias y de ser posible con compresas estériles.
- Posteriormente se cubre al herido con una manta o similar a fin de evitar el enfriamiento general.
- El siguiente paso es de suma importancia, se debe colocar al quemado en una posición horizontal, preferiblemente de espaldas o en posición lateral si tiene quemada la espalda o boca abajo si tiene quemados los costados y la espalda, en fin tratar de mantener las quemaduras al aire libre.
- No se debe dar de beber ni comer al quemado grave
- Se debe avisar lo más pronto posible a servicios de urgencias, y realizar la evacuación inmediata.

Es importante que se lleven a cabo todos estos pasos en caso de que los reactivos produzcan una explosión por algún accidente. Lo más importante es salvaguardar la vida humana por encima de toda pérdida material.

4.7.6. Consideraciones de uso seguro

Se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones de uso seguro del densímetro nuclear con el fin de evitar accidentes que en un determinado caso podrían ser mortales, se listan a continuación algunas de las condiciones generales de uso seguro.

- Contar con el entrenamiento adecuado para operar el densímetro nuclear.
- Contar con un manual de protección y emergencias
- Seguir los procedimientos y consideraciones necesarias del equipo
- Contar con medidores de radiación en el área de trabajo
- Colocar los avisos correspondientes en áreas visibles y despejadas

Todos estas consideraciones generales de uso seguro son de vital importancia para poder determinar la densidad con exactitud y procurar reducir accidentes para proteger al ser humano.

4.8. Conclusión

El método del densímetro nuclear para la determinación de la densidad y el contenido de humedad, es un método seguro, preciso, sumamente rápido y normado, lo cual lo convierte en una de las opciones más confiables en cuanto a la seguridad de datos que arroja el método, el mismo cuenta con varias opciones de medición, y cada cual se adecúa a las condiciones de la región y del material de ensayo.

Para la operación del método es necesario tener los permisos legales necesarios para su uso, dado que un uso inadecuado puede producir grandes daños al operador, es por eso, que se debe obtener la licencia correspondiente para el uso, tener la experiencia necesaria y tomar todas las consideraciones pertinentes descritas anteriormente donde el principal objetivo es evitar poner en riesgo las vidas humanas por medio de la absolución de accidentes.

5. COMPACTACIÓN DE SUELOS

El proceso de compactación es un punto fundamental a tratar para complementar el concepto de medición de densidad, es por ello que se brindan los parámetros, lineamientos y ensayos a realizar principales para ejemplificar el tema, como se presenta a continuación.

5.1. Generalidades y fundamentos de la compactación de suelos

La compactación de suelos es un medio para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los mismos. En el proceso de la compactación se eliminan los espacios vacíos y contenido de humedad excesivo para que el suelo se distribuya lo mejor posible con las partículas unidas.

El proceso de compactación se logra por medio de la aplicación de cierta cantidad de energía al suelo por medio de equipo mecánico o electromecánico y de esa manera aumentar de su densidad y consecuentemente se aumenta también la capacidad soporte y estabilidad entre otros.

5.2. Características de la compactación

El principal objetivo de la compactación es el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo para fines ingenieriles. Es fundamental el procedimiento de la compactación en la construcción de estructuras sobre el suelo ya que mejorará las propiedades del mismo y asegurará la estabilidad de la construcción sobre él. A continuación se mencionan algunas propiedades principales que mejora la compactación:

- La capacidad soporte del suelo aumenta, es decir, se le podrá aplicar una carga mayor sin que el suelo se deforme.
- El asentamiento en el terreno disminuye, lo cual evita el hundimiento de la superestructura.
- La permeabilidad del suelo disminuye, así como el escurrimiento y la penetración del agua en el mismo. Se puede regular los drenajes para la distribución del agua.
- También disminuye el hinchamiento y la contracción del suelo, debido a que sin vacíos el agua penetra y se producirá hinchamiento en épocas invernales y contracción en épocas calurosas.
- Los daños debido a las heladas son nulos ya que el agua se expande y por lo tanto el volumen aumenta al congelarse haciendo que pavimentos se hinchen y estructuras se agrieten.

5.3. Compactación en campo

Se debe analizar el tipo de suelo con el que se dispone para determinar si es adecuado ya sea para sub-base, base o ambas. Luego de haber realizado los análisis correspondientes se procede a realizar el proceso de compactación el cual se lleva a cabo en dos partes. Primero se debe realizar la compactación de la subbase y posteriormente se procede a realizar la compactación de la base. Lo principal independientemente del área que se esté compactando es poder llegar lo más cercano posible a las condiciones ideales que son determinadas por los datos del laboratorio.

5.3.1. Compactación en subbase

La capa subbase es de un material determinado que se coloca sobre la subrasante y que el objetivo principal es el de drenar al pavimento y controlar los cambios de volumen (elasticidad y plasticidad que se puedan producir en la subrasante y puedan ser perjudiciales). La subbase controla la sección capilar del agua proveniente de los niveles freáticos cercanos, protegiendo el pavimento de hinchamientos que se puedan producir.

La sub-base es la capa encargada de soportar, transmitir y distribuir uniformemente las cargas a la subrasante, es por ello que ésta capa se debe constituir de una combinación de arenas específicas y gravas las cuales hagan del suelo lo más estable posible. Para ello se puede ayudar de otros materiales finos mezclados con un porcentaje de arcillas que no afecte considerablemente la plasticidad del suelo. Una compactación adecuada es fundamental en la etapa del proceso completo, para ayudar a la estabilización del suelo, se puede agregar selecto a la subrasante para que posteriormente se proceda al relleno de la subbase y su compactación.

5.3.2. Compactación en base

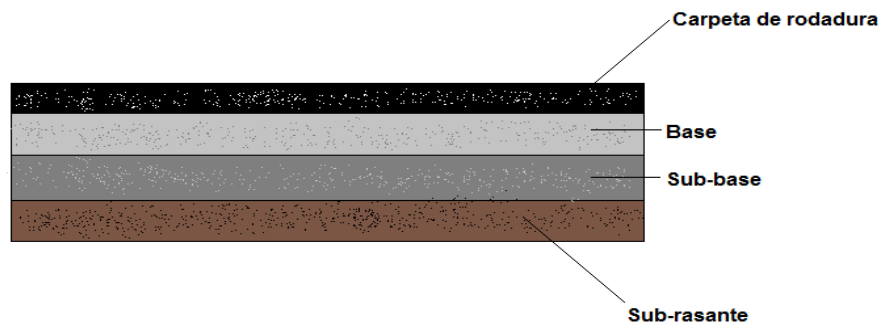
La capa base se coloca sobre la capa sub-base, y tiene como objetivo principal el de absorber los esfuerzos debido a las cargas de vehículos, estructuras, entre otros según sea el caso.

La base debe también distribuir los esfuerzos uniformemente a la sub-base y el terreno de fundación.

Para esta capa es recomendable utilizar un material granular bien graduado el cual se puede mezclar con cemento u otro material adherente para mejorar sus propiedades, el material se puede obtener de depósitos de grava de ríos, el cual puede ser triturado para llegar a las condiciones específicas requeridas al material también se le puede añadir selecto para mejorar sus propiedades mecánicas.

Se presenta a continuación una esquematización de cómo se colocan las capas en una carretera como ilustración de lo anteriormente descrito.

Figura 15. **Esquema de capas de suelo en una carretera**



Fuente: elaboración propia.

5.4. Clasificación de las máquinas de compactación

Se pueden utilizar muchas máquinas mecánicas y mecánico-eléctricas para imprimir los golpes que proporcionan la energía necesaria para compactar las partículas del suelo, estas máquinas se clasifican generalmente como se explica a continuación.

5.4.1. Por presión estática

Logran la compactación utilizando una maquinaria pesada cuyo peso comprime las partículas del suelo sin necesidad de movimiento vibratorio, se utilizan principalmente en gravas y arenas mecánicamente estables, por ejemplo: el rodillo estático o rodillo liso, como se puede apreciar en la siguiente ilustración:

Figura 16. **Compactador de rodillo estático Volvo SD130D**



Fuente: Volmaquinaria de construcción España S.A. Catálogo 2012.

5.4.2. Por impacto

En este caso la compactación se produce por una placa apisonadora que golpea y se separa del suelo a alta velocidad y golpes repetitivos. Por ejemplo: un apisonador o bailarina como comúnmente se le conoce.

Figura 17. **Apisonador Wacker BS-600 (60 Kg.)**



Fuente: Wacker Neuson, Maquinaria de compactación 2012

1.1.1 **Por vibración**

Las maquinas por vibración logran la compactación aplicando al suelo vibraciones a alta frecuencia, estas máquinas pueden ser: placas o rodillos vibratorios. Estos son muy útiles para compactar suelos granulares, ya que la vibración reduce las fuerzas de fricción dejando que las partículas caigan libremente por su propio peso

Figura 18. **Compactador de placa vibratoria**



Fuente: Wacker Neuson, Maquinaria de compactación 2012.

5.5. Compactación de suelos no cohesivos

Los suelos no cohesivos son suelos granulares que se componen de rocas, piedras, gravas y arenas, principalmente de partículas gruesas sin cantidad considerable de arcilla que pueda hacer cohesivo el material. En el caso de material granular el proceso de compactación ideal, resulta el de la vibración pero debe tenerse en cuenta que el comportamiento de los suelos de partícula gruesa depende mucho de la granulometría.

Para este tipo de suelo entonces se requiere una fuerza moderada aplicada en una amplia área o choque de vibración, la compactación eficiente en los suelos no cohesivos requiere de presiones mayores para los suelos secos que para los húmedos. La eficiencia se mejora aumentando la presión durante la compactación a medida que el peso específico y la resistencia aumentan.

5.6. Compactación con cohesión moderada

Este es el tipo de material donde existe una variedad de mezcla de tamaño de partícula, en el cual se mezclan suelos granulares y arcillosos lo que brinda al suelo una cohesión moderada. Para este tipo de material se debe analizar el tamaño máximo de partícula mediante una granulometría para determinar qué tipo de compactación se realiza.

Es recomendable si se tiene una mezcla uniforme y un tamaño máximo de partícula moderado utilizar maquinaria de compactación por vibración la cual ayudara a que se acoplen de una manera eficiente todas las partículas en la mejor posición, pero también se debe considerar que a medida que aumenta la cohesión, disminuye rápidamente la eficacia de los vibradores como medio de

compactación ya que por pequeña que sea la adherencia entre partículas, estas infieren con su tendencia a desplazarse a posiciones más estables, por lo cual si se detecta muchos finos se recomienda utilizar rodillos compactadores ya que estos han brindado muy buenos resultados.

Siempre es importante el análisis del suelo para determinar si es aceptable para la utilización de una base o sub-base, ya que de otro modo es necesario cambiarlo o modificarlo con otros materiales.

5.7. Compactación de arcillas

Este es el suelo de material cohesivo, donde la mayoría del mismo es arcillo-limoso, por lo cual, es necesario un análisis profundo ya que las arcillas tienden a expandirse con el contacto de agua y cambios climáticos.

Debido a que el material es de partícula muy fina, la compactación se produce por la reorientación y distorsión de las partículas y sus capas absorbidas. Esto es posible gracias a una fuerza lo suficientemente grande para vencer la resistencia de cohesión por las fuerzas entre partículas.

Es por ello que para este tipo de material es de suma importancia que se controle el contenido de humedad del suelo y el que se le adiciona para cumplir con los datos de laboratorio así como el mezclarlo con materiales granulares no cohesivos y poder lograr una granulometría más adecuada cuando lo amerite.

De esa manera se recomienda que se compacte por medio de un rodillo estático o por presión con maquinaria adecuada, como se ha mostrado anteriormente.

5.8. Humedad óptima de compactación

La humedad óptima de compactación es una propiedad fundamental en el campo para la compactación de suelo, este dato se determina en laboratorio mediante la extracción de la muestra del suelo la cual es analizada y ensayada por medio del método de Proctor el cual determina el peso volumétrico máximo y humedad óptima que debe contener un suelo al momento de compactar.

El dato de la humedad óptima se determina graficando el contenido de humedad utilizado y el peso unitario seco, es necesario graficar todas las iteraciones realizadas para obtener un mejor resultado y poder acercarse al dato ideal de humedad. El ensayo Proctor se describe en los siguientes incisos.

5.9. Descripción del ensayo de Proctor

ASTM D 1557-07: *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soils Using Modified Effort (56 000 ft-lbf/ft³)*

AASHTO T 180-01: *Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54 kg (10lb) Rammer*

5.9.1. Proctor estándar

El ensayo de Proctor estándar consiste en colocar tres capas iguales de suelo humedecido en un cilindro con un volumen de 1/30 de pie cúbico e imprimirle 25 golpes a cada capa con un martillo de deslizamiento vertical y de 2.5 kg (5.5 lb) de peso, cayendo desde una altura de 30 cm.

La energía que se proporciona mediante los golpes se puede determinar con la siguiente expresión:

$$E = \frac{W \times H \times N}{V}$$

Dónde:

- E: Energía específica de compactación (kg-cm/cm³).
- W: Peso del martillo en kg.
- H: Altura de caída del martillo en cm.
- N: Número total de golpes del martillo.
- V: Volumen total del suelo compactado.

Por lo tanto, mientras se aumenta la energía de compactación para un mismo suelo, entonces aumenta su peso volumétrico seco máximo y disminuye su humedad óptima.

5.9.1.1. Equipo

- Cilindro metálico de 4 ó 6 pulgadas dependiendo el método que se adopte.
- Martillo de compactación de 2.5 kg de peso y 30 cm de altura libre.
- Tamiz No. 4 y No. $\frac{3}{4}$
- Balanza de al menos 20 kg de capacidad y aproximación de 1 g o una de 35 lb de capacidad y aproximación de 0.01 lb.

- Horno de rango mínimo de 110° C con aproximación de 5°C
- Tarros metálicos para cada iteración de golpes
- Espátula, cucharón, charolas de lámina
- Regla de acero para rasar
- Probeta graduada 500 cm³

Figura 19. **Equipo Proctor**



Fuente: NL Scientific Instruments SDN.BHD. 2012.

5.9.1.2. **Procedimiento**

El procedimiento que se sigue en el ensayo del Proctor estándar es el mismo procedimiento utilizado en el Proctor modificado. Por lo tanto se describirá el procedimiento del ensayo de Proctor en la sección del método modificado y en esta sección se especifican las diferencias de ambos como sigue:

- Martillo de 2,5 kg de peso y una altura libre de 30 cm
- Se aplican 25 golpes con el martillo apisonador
- El procedimiento anterior se realiza sobre 3 capas de suelo dentro del cilindro metálico a diferencia del modificado donde se realiza sobre 5 capas de suelo hasta obtener la humedad óptima y el peso unitario seco máximo.

5.9.1.3. Consideraciones generales

El método de Proctor se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido como ha sido descrito anteriormente para diferentes contenidos de humedad. Esta prueba tiene como objetivo el:

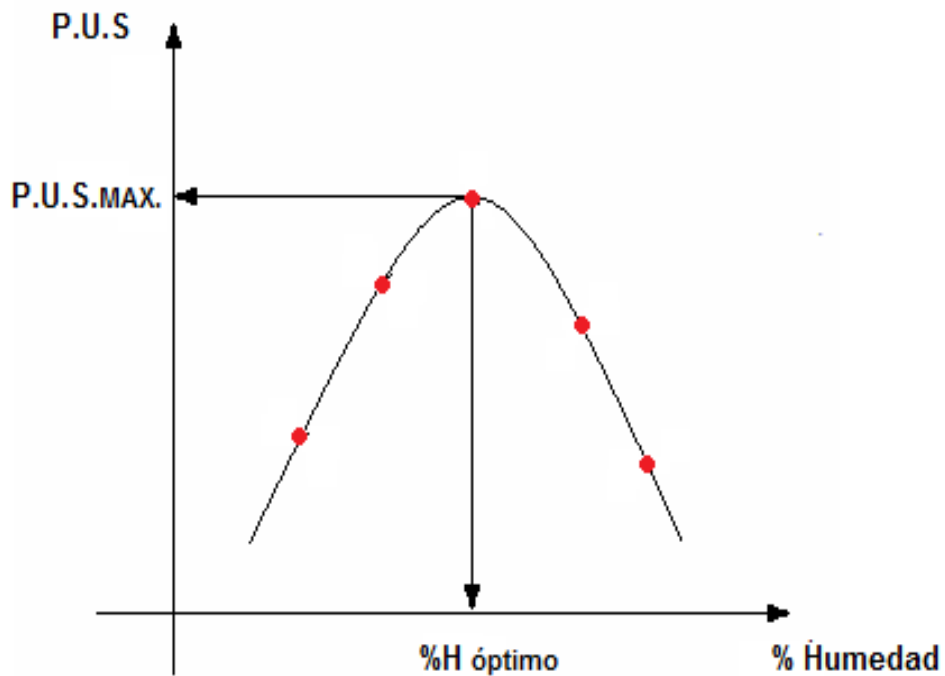
- Determinar el peso unitario seco máximo ($PUS_{MAX.}$) que puede alcanzar un material, así como la humedad óptima a la que deberá realizarse la compactación.
- Determinar el grado de compactación alcanzado por el material durante la construcción o cuando ya se encuentran construidos los caminos, aeropuertos, y calles, relacionando el peso unitario obtenido en el lugar con el peso unitario máximo de Proctor.

En todos los suelos, al incrementarse la humedad, se aplica un medio lubricante entre sus partículas que permite el acomodo de las mismas cuando se sujetan a esfuerzos de compactación.

Por lo tanto, si se sigue aumentando la humedad empleando el mismo esfuerzo de compactación, se llega a obtener el mejor acomodo de partículas del suelo y por ende, el mayor peso unitario seco, con una determinada humedad denominada humedad óptima. Esta es la humedad que se deberá lograr en el campo para que la compactación sea la idónea.

Para la determinación del dato de la humedad se grafica el peso unitario seco contra el contenido de humedad, cada punto es una iteración de 25 golpes en cada capa según sea la categoría de Proctor hasta alcanzar el porcentaje de humedad deseado para una buena compactación, la representación se muestra como sigue.

Figura 20. **Gráfica de Proctor**



Fuente: elaboración propia.

5.9.2. Proctor modificado

Básicamente el Proctor modificado cumple con todos los requisitos descritos en el Proctor estándar, y además brinda una información más acorde a las situaciones críticas de cargas aplicadas al suelo.

Este método se diferencia del estándar principalmente en la cantidad de capas y el peso del martillo para imprimir la energía, es por ello que es el método que se utiliza en la actualidad para todo tipo de construcción.

Para este método existen al igual que para el estándar, cuatro categorías o subdivisiones de procedimiento las son métodos de compactación dinámica ya que involucran la impresión de golpes ya sea manual o con martillo automático, dichas categorías se presentan a continuación.

Tabla VI. **Métodos de realización de compactación dinámica**

Método	Molde de (pulg)	Pasa por Tamiz No.	No. De Capas	No. De Golpes
A	4"	4	5	25
B	6"	4	5	56
C	4"	$\frac{3}{4}$	5	25
D	6"	$\frac{3}{4}$	5	56

Fuente: elaboración propia.

5.9.2.1. Equipo

La diferencia entre el método estándar y el modificado, es que en este último se utiliza un martillo de 5 kg el cual puede imprimir una energía mayor ya que tiene un mayor peso y altura libre y un cilindro de 4 o 6 pulgadas.

5.9.2.2. Procedimiento

Este procedimiento básicamente es el mismo que el del Proctor estándar con las diferencias ya antes mencionadas.

- Se utiliza un martillo de 5kg de peso a una altura libre de 45 cm
- Se aplican 25 golpes con el martillo apisonador
- El procedimiento anterior se realiza sobre 3 capas de suelo dentro del cilindro metálico a diferencia del modificado donde se realiza sobre 5 capas de suelo hasta obtener la humedad óptima y el peso unitario seco máximo.

5.9.2.3. Consideraciones generales

Se debe tener cuidado con el tipo de suelo en estudio ya que suelos arenosos requerirán mucha agua para que se alcance el peso unitario seco máximo al igual que suelos arcilloso absorberán mucha agua y es difícil la extracción del mismo de los moldes luego de la compactación, en este caso se requerirá de maquinaria específica para sacar el suelo.

5.10. Valor soporte california CBR

ASTM 1883-07: *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of Laboratory-Compacted Soils*

AASHTO T 193-99: *Standard Method of Test for the California Bearing Ratio*

Este es uno de los ensayos más importantes que se realiza en un estudio de suelos ya que determina la resistencia de suelos compactados en laboratorio con una humedad óptima al esfuerzo cortante de un suelo, que se produce por las distintas cargas aplicadas y evalúa las condiciones de la subrasante, subbase y base para pavimentos.

El porcentaje de CBR o relación de soporte se obtiene como la división entre la carga unitaria necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del martillo en un área aproximada de 19,4 centímetros cuadrados dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado, esto se representa por medio de la siguiente expresión:

$$\% \text{ CBR} = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} \times 100$$

Tabla VII. **Datos de carga unitaria patrón**

Penetración		Carga unitaria patrón	
mm	pulg	MPa	Psi
2,5	0,10	6,9	1 000
5,0	0,20	10,3	1 500
7,5	0,30	13,0	1 900
10,0	0,40	16,0	2 300
12,7	0,50	18,0	2 600

Fuente: BOWLES, Joseph. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil p. 190.

5.10.1. Equipo

- Tres moldes de compactación de 6" (15,2 centímetros) de diámetro por 17,8 centímetros de altura que incluye el collarín.
- Tres discos espaciadores de 15,1 centímetros de diámetro por 6,14 centímetros de altura.
- Martillo de compactación de 5 kilogramos de peso con altura libre de 45 centímetros.
- Máquina de compresión equipada con pistón de penetración, de capacidad de 10 000 libras, con cabezal que avance a razón de 0,05 pulgagas/minuto, para forzar el pistón de penetración dentro del espécimen. La máquina debe contar con indicadores de carga cada 10 lb o menor, dispositivo indicador de carga con lecturas de curso no menor de dos pulgadas.

- Pistón de penetración de 4,95 centímetros de diámetro con sección transversal de 19,4 centímetros cuadrados y no menor de 8 centímetros de longitud.
- Pesos para sobrecarga
- Micrómetro de reloj con aproximación de 0,001 pulgadas para medir la penetración.
- Aparato para medir la expansión con deformímetro de carátula con precisión de 0,01 milímetros.
- Horno de secado de rango de 110 ° centígrados
- Cronómetro
- Tanque de inmersión

Figura 21. **Máquina automática de carga CBR (HM-4156)**



Fuente: HUMBOLDT, Construction Materials Testing Equipment Catálogo 2012.

Figura 22. **Equipo CBR**



Fuente: KENCO KENSAINS SDN BERHAD, Catálogo 2012.

5.10.2. Procedimiento

- A una muestra de aproximadamente 4,5 kilogramos se le agrega el contenido de agua óptimo determinado por el ensayo de Proctor modificado.
- Compactación: se procede a llenar el molde con la primera de 5 capas del material uniformemente humedecido y se le imparten ya sea 65, 30 ó 10 golpes según sea el ensayo de los tres moldes, por cada capa.
- Se retira la base y el collarín y se rasa la muestra intentando que no quede espacios vacíos dentro del molde y que quede una superficie plana al eje horizontal, se retira también el disco espaciador y se procede a pesar el molde con el suelo compactado el cual será el peso unitario total del suelo.

- Se coloca la placa perforada con el vástago ajustable sobre el suelo compactado y se añaden las pesas adicionales que sean necesarias para obtener la sobrecarga total que no sea menor a 4,5 kilogramos, y se registra la sobrecarga total, el mismo procedimiento se realiza para los tres moldes donde se han impactado 65, 30 y 10 veces cada uno.
- Se sumergen los tres moldes y pesas en un tanque de agua de manera que el agua cubra todo el molde y collarín y se ajusta el deformómetro con lecturas al 0,01 milímetros en su soporte para cada molde para las respectivas lecturas.
- Posteriormente se procede a realizar las lecturas de penetración tomando también las respectivas lecturas del deformómetro de carga.
- Se realiza la extracción de la muestra del molde y se toman dos muestras del material para el contenido de humedad.

Figura 23. **Moldes sumergidos en tanque especial**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 24. **Molde adaptado en máquina de compresión**



Fuente: Laboratorio Mecánica de Suelos, USAC.

5.10.3. Consideraciones Generales

El ensayo del valor relativo california CBR cumple básicamente con dos objetivos los cuales son:

- Brindar la información acerca de la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimento cuando el suelo se satura, esta información es de vital importancia especialmente si se tiene de base un suelo arcilloso.
- Brindar la indicación de la pérdida de resistencia debida a la saturación en el campo.

A continuación se presenta una tabla donde se muestra el uso para cada valor determinado de CBR.

Tabla VIII. **Clasificación de uso de suelos según valor de CBR**

CBR	Clasificación General	Usos
0-3	Muy pobre	Sub-rasante
3-7	Pobre regular	Sub-rasante
7-20	Regular	Sub-base
20-50	Bueno	Base y sub-base
>50	Excelente	Base

Fuente: BOWLES, Joseph. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil.

Para determinar el valor de CBR, se debe realizar una gráfica donde se dibuje una curva de resistencia a la penetración (kPa) que sería la ordenada, contra la penetración mm, para cada molde. Si la curva no es lineal a través del origen, entonces se debe extender una línea desde la porción recta de la curva para tratar de interceptar el eje de las abscisas. La diferencia entre ese valor y la penetración correspondiente a cero, es una corrección que se debe realizar para el cálculo del CBR.

5.11. Control de compactación

Los datos obtenidos en el laboratorio por medio de los ensayos de Proctor modificado y el valor soporte california CBR, determinan las condiciones en las cuales el suelo que fue ensayado debe ser humedecido y compactado en campo. Por medio de estos estudios se elige el tipo de suelo para cada una de las capas que se encuentran debajo del pavimento.

Para verificar y comprobar que la energía de compactación ha sido la necesaria determinada por el ensayo de CBR y para verificar el contenido de humedad óptimo para dicha compactación que haya sido proporcionado de acuerdo al ensayo de Proctor modificado se realizan los ensayos de determinación de densidad en campo, los cuales se han descrito anteriormente. Estos ensayos se dividen en dos grupos los cuales se describen a continuación.

5.11.1. Ensayos destructivos

Principalmente los ensayos que se mencionan a continuación son catalogados como ensayos destructivos, ya que para realizarlos es necesario realizar una excavación en el suelo ya compactado, lo cual perjudica el terraplén preparado para aplicar la siguiente base de material o bien para colocar la carpeta de rodadura, dentro de esta categoría se encuentran:

- Ensayo de Cono de arena
- Ensayo de Globo de hule
- Ensayo del densímetro de membrana
- Ensayo del cono gigante
- Ensayo mediante bloques

5.11.2. Ensayos no destructivos

Se considera el único ensayo no destructivo utilizado en Guatemala al método del densímetro nuclear ya que este determina el peso unitario, contenido de humedad y densidad por medio de radiaciones gamma que provienen del elemento radioactivo que se encuentra dentro del aparato el cual solo se coloca sobre el suelo de ensayo y procede a determinar los datos mencionados anteriormente.

Por lo tanto, queda a criterio del constructor el utilizar cualquiera de las dos categorías antes mencionadas dependiendo de las necesidades y economía con la que dispone la compañía para realizar este importante ensayo.

5.12. Estabilización de suelos

Aunque muchas veces se pueda contar con material previo para realizar la compactación, este material no es adecuado dado a que contiene mucha materia orgánica. Ésta descompone cualquier adición o cimentación y además permite mucho el asentamiento lo cual la hace altamente inestable y dañina.

Por lo tanto, es necesario obligatoriamente buscar soluciones alternativas para este fenómeno. En la actualidad lo que se acostumbra a realizar es la estabilización del suelo por medio de la adición de otro material. A continuación se describe la estabilización con algunos de los materiales más utilizados.

5.12.1. Métodos más utilizados para la estabilización de suelos

A continuación se describe la estabilización del suelo con algunos de los materiales que generalmente son más usados:

5.12.1.1. Estabilización suelo-cemento

El cemento se está utilizando cada vez más como estabilizador de suelos, principalmente en la construcción de carreteras y presas de tierra. Es un método de estabilización bastante fácil de usar y que mejora en mucho las propiedades del material, primordialmente para suelos arenosos y arcillosos.

El cemento ayuda a disminuir el límite líquido y a incrementar el índice plástico y la manejabilidad de los suelos arcillosos, en los cuales la estabilización con cemento es efectiva cuando el límite líquido es menor que 45-50 y el índice plástico es menor que aproximadamente 25.

Los suelos granulares y arcillosos con baja plasticidad son los más adecuados para la estabilización con cemento. Las arcillas cálcicas son más fácilmente estabilizadas por la adición de cemento, mientras que las arcillas sódicas e hidrogenadas que tienden a expandirse responden mejor a la estabilización con cal.

Para la compactación en el campo se agrega la cantidad necesaria de cemento y se mezcla con el suelo ya sea en el sitio o en una planta mezcladora, luego se lleva al sitio para posteriormente compactarlo con la humedad óptima.

5.12.1.2. Estabilización mecánica

La estabilización mecánica consiste en el mejoramiento del suelo por medio de cambios graduales. Generalmente se utilizan dos o más suelos naturales los cuales se mezclan para obtener un material compuesto el cual será superior a cualquiera de sus componentes. A este material se le debe añadir roca triturada o escoria para mejorar sus propiedades, no es muy utilizado ya que no asegura el mejoramiento y se requiere de otros análisis.

5.12.1.3. Estabilización química

Se refiere a la reacción química que se produce en suelo por la adición de algún material que la provoque, dentro de esta se puede catalogar la estabilización con cemento y cal. La utilización de ésta última es quizás la más

usada para estabilizar suelos. Principalmente se utiliza para estabilizar bases y sub-bases de carreteras. Las mezclas efectivas se realizan adicionando de un 10 % - 35 % de ceniza volátil y de un 2 % - 10 % de cal, esta mezcla es compactada bajo condiciones controladas con la cantidad óptima de agua para obtener el suelo estabilizado.

5.12.1.4. Consideraciones generales

Para poder estabilizar y modificar un suelo se deben tomar varias consideraciones necesarias para determinar el mejor agente estabilizador para el material en estudio, la estabilización depende mucho del comportamiento del suelo así como de sus deficiencias, por ejemplo: si el suelo no es cohesivo, se puede modificar y brindarle la cohesión que necesita por medio de un agente ligante. Por el otro lado, si el material es cohesivo, este se modifica por medio de aumentar la resistencia a la humedad alterando la película de agua absorbida e incrementando la cohesión y la fricción interna.

Otro aspecto importante es la forma en que se puede contrarrestar el efecto de la retracción y expansión por medio de sementar y modificar la capacidad del mineral arcilloso para la absorción de agua haciendo del suelo un material resistente a los cambios de humedad. El otro efecto que se puede controlar es la permeabilidad y este se logra llenando los poros con un material impermeable o modificando la estructura del mineral de arcilla y el agua absorbida para impedir la floculación, y para aumentar la permeabilidad se extraen las partículas finas creando un material conglomerado.

Para que un material sea un buen agente estabilizador este deberá ser compatible con el material de suelo, de fácil manejo y preparación y de bajo costo.

6. PROCESO DE COMPACTACIÓN DEL SUELO

El proceso de compactación es fundamental para la estabilidad del suelo donde se desea ejecutar la obra. Como se ha mencionado, los métodos de determinación de densidad de campo, así como los ensayos de laboratorio, nos determinan los valores ideales que se deben manejar, es por ello que se describe el proceso de la compactación como sigue.

6.1. Origen del suelo

La mayor parte del suelo que cubre la tierra está formado por el intemperismo de varias rocas, dentro del intemperismo existen dos tipos principales: el mecánico y el químico, el mecánico es aquel donde el suelo está formado por la acción física sobre las rocas a través del tiempo, tales como la corriente de agua de ríos, viento, olas, hielo glacial, congelamientos, expansiones y contracciones por cambios climáticos.

El intemperismo químico es el proceso químico por medio del cual se descompone una roca, cambiando sus propiedades y convirtiéndola en otro tipo de roca de menor tamaño. En ambos casos las rocas son transportadas mediante procesos físicos, a estas rocas se les llama “suelos transportados”, los cuales son transportados por corrientes de aguas (aluviales), depositados por la acción de glaciares (glaciales), o por la acción del viento (eólicos).

Tomando como base la procedencia natural de las rocas y los procesos físico-químicos que se llevaron a cabo para su formación, se puede clasificar en tres categorías de suelos según su origen como sigue.

- Ígneas: Estas se forman cuando el magma se enfría y se solidifica, con o sin cristalización, bajo la superficie, formando rocas intrusivas (plutónicas), y en la superficie formando rocas extrusivas (volcánicas), o formando rocas hipoabisales que es un punto intermedio entre las volcánicas y plutónicas.
- Sedimentarias: estas son las rocas que se formaron por la acumulación de sedimentos por medio de procesos principalmente físicos. Pueden formarse a las orillas de ríos, en el fondo de barrancos, valles, lagos, mares, y en la desembocadura de ríos, se hallan dispuestas en estratos.
- Metamórficas: son aquellas rocas que han sido formadas a partir de otra mediante el proceso de metamorfismo. El metamorfismo nunca implica un cambio de estado, y se da indistintamente en rocas ígneas como en rocas sedimentarias cuando éstas quedan sometidas a altas presiones. Las rocas metamórficas son clasificadas según sus propiedades químicas. Los factores que clasifican las rocas metamórficas son dos: los minerales que las forman y las texturas que presentan.

6.2. Muestreo

El primer aspecto que se toma en cuenta en un muestreo es que la muestra que se tome sea representativa del terreno. Un muestreo representativo es importante pues tienen que tener los mismos valores en campo y en laboratorio. A menos que la muestra obtenida sea representativa del suelo en estudio, cualquier análisis de la muestra solo será aplicable a la propia muestra y no al material del cual procede.

Las muestras se pueden catalogar bajo dos categorías: alteradas e inalteradas. Una muestra alterada es aquella que no guarda las mismas condiciones que cuando se encontraba en el campo, e inalterada es aquella en la cual se tomaron todos los cuidados necesarios para conservar las mismas propiedades del terreno del cual procede.

Para poder realizar los estudios que corresponden al suelo compactado, se debe tomar todas las precauciones para traer una muestra inalterada, es decir cortar un pie cúbico de material de arista de un área representativa, teniendo cuidado de conservar el perfil estratigráfico del suelo si este aplica y la cual debe ser parafinada para conservar las condiciones de humedad.

La extracción de muestra se divide en 3 principales ramas las cuales son: preliminares, definitivos y geofísicos. Las cuales se subdividen en:

- Métodos de exploración o preliminares:
 - Pozos a cielo abierto (muestreo inalterado o alterado)
 - Perforaciones
 - Métodos de lavado
 - Métodos de penetración estándar
 - Métodos de penetración cónica

- Perforaciones en boleos y gravas Métodos definitivos
 - Pozos a cielo abierto (muestreo inalterado)
 - Métodos con tubo de pared delgada
 - Métodos rotatorios para roca

- Métodos geofísicos
 - Sísmico
 - Magnético y gravimétrico
 - Resistencia eléctrica

6.3. Clasificación de los suelos

En la clasificación de suelos existen varios métodos para realizarla, principalmente dentro del campo de la ingeniería civil y la geotecnia se maneja el sistema AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), los cuales son los más conocidos y por ende utilizados, en donde ambos sistemas de clasificación utilizan los límites de Atterberg junto con un análisis granulométrico para clasificar el material.

6.3.1. Sistema de clasificación AASHTO

La clasificación de suelos AASHTO establece 7 grupos de suelos y agregados con base en los resultados que se obtienen en la granulometría, el límite líquido y el límite plástico. También se determina un octavo grupo que corresponde a los suelos orgánicos.

La clasificación por este método se puede utilizar cuando se requiere una clasificación geotécnica precisa, principalmente para la construcción de carreteras. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se hace por medio de un índice de grupo (IG). El concepto de índice de grupo es utilizado para la determinación de la calidad del suelo en estudio para el uso en sub-rasantes, sub-bases y bases. Para la determinación del IG se utiliza la siguiente fórmula:

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

Donde:

F_{200} : porcentaje del material que pasa el tamiz No. 200, expresado en número entero.

LL: límite líquido

IP: índice de plasticidad

Siempre que el límite líquido de un material no pueda ser determinado, el índice de grupo del mismo se considera 0. También si el valor del IG es negativo según la ecuación, entonces se debe considerar 0.

6.3.2. Sistema unificado de clasificación de suelos

Este sistema está basado en una modificación y adaptación de Arthur Casagrande más general de su propio sistema propuesto en 1942 para aeropuertos. El sistema cubre los suelos gruesos y finos, distinguiendo ambos a través del tamiz No. 200, es decir, lo que pasa este tamiz es material fino, mientras lo que no, es material grueso. Un suelo es considerado grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas y finas, si más del 50% son finas.

Para comprender este sistema de clasificación es necesario describir las abreviaciones utilizadas, las cuales están basadas en su significado de palabras en inglés. El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres de los suelos más típicos de ese grupo los cuales se describen de la siguiente manera:

- G: “*gravel*”, significa “grava” y es donde este material predomina
- S: “*sand*”, significa “arena”

Para separar las gravas de las arenas, el sistema utiliza el tamiz No. 4, así de esta forma, si el material que se retuvo en el tamiz No. 200 se retiene en más del 50% de sus partículas en el tamiz No. 4 este pertenece al grupo G, y pertenece al grupo S en caso contrario. Las gravas y las arenas se subdividen en 4 grupos, los cuales son los siguientes:

- W: “*well graded*”, material prácticamente limpio de finos “bien graduado”.
- P: “*poorly graded*”, material prácticamente limpio de finos “mal graduado”.
- M: “*del sueco mo, mjala*”, material con cantidad apreciable de finos no plásticos, relacionado a suelos con “limos”.
- C: “*clay*” material con cantidad apreciable de finos, literalmente “arcilla”.

Estos en combinación forman los grupos de clasificación del sistema S.U.C.S. Por ejemplo: GW, SW, GP, SW, GM, SM, GC, SC.

También existe una clasificación adicional para suelos finos, dentro de la cual entran los limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y los limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos 3 grupos se subdivide según su límite líquido en 2 grupos:

- Si el LL es menor al 50%, es material de baja compresibilidad se añade el símbolo (L), en inglés *“low compressibility”*.
- Si el LL es mayor al 50%, es material de alta compresibilidad se añade el símbolo (H), en inglés *“high compressibility”*.

De esta forma, también se puede obtener una combinación de grupos la cual se establece de la siguiente forma: ML, CL, OL, MH, CH, OH. El término “compresibilidad” es necesario aclarar que no se refiere a la baja o alta plasticidad ya que esta propiedad se expresa únicamente por medio de los parámetros del LL e IP.

Por último existe una última clasificación que se refiere a los suelos altamente orgánicos, tales como turbas y suelos pantanosos extremadamente compresibles que forman un grupo independiente con el símbolo (Pt), del inglés *“peat”* que significa “turba”.

6.4. Extracción de la muestra

La extracción de la muestra contiene una gran responsabilidad en los datos que se obtengan, ya que según sean los ensayos que se necesiten ellos conllevarán un tipo de extracción la cual debe de ser suficiente para representar la situación y condiciones actuales. Dentro del tipo de extracción de manera general, existen dos tipos: la extracción de muestras alteradas e inalteradas. Dentro de estas se encuentran los tipos de sondeos ya mencionados.

La extracción de muestra es alterada cuando no conserva las mismas condiciones de donde se encontraba en el terreno de donde tiene origen, e inalterada en caso contrario. Para obtener muestras alteradas el muestreo se

debe efectuar acorde el fin que persiga, es decir, no es lo mismo una extracción para una granulometría, que para la obtención de un perfil estratigráfico.

La obtención de la muestra de un sondeo a cielo abierto con un pozo de 1,5 por 1,5 metros de sección y de la profundidad requerida se efectúa el siguiente procedimiento:

- Se corta toda sección seca y suelta de suelo con el fin de obtener una superficie fresca y óptima.
- Se toma una muestra de cada capa en un recipiente y se coloca una tarjeta de identificación.

Para la extracción de muestras inalteradas, el caso más simple es el que corresponde al de cortar un determinado trozo de suelo del tamaño deseado no menor a 1 pie (0,30 por 0,30 por 0,30), cubriéndolo con una capa de parafina para evitar pérdidas de humedad y empacándolo debidamente para su envío a laboratorios. Para realizarla se siguen los siguientes pasos:

- Se limpia y alisa la superficie del terreno y se marca el contorno del trozo
- Se excava una zanja alrededor de esto y se profundiza el contorno
- Se corta el trozo de suelo con el cuchillo y se retira
- La cara del trozo extraído que corresponda al nivel del terreno se marca con una señal cualquiera para conocer la posición que ocupaba en el lugar de origen y posteriormente se achaflan inmediatamente las aristas de la muestra y se le aplican tres capas de parafina caliente.

6.5. Granulometría

La granulometría se define como la determinación de la cantidad en porcentaje de los diversos tamaños de partículas que constituyen el suelo. Este ensayo se rige por las normas AASHTO T087-86: *Standard Method of Test for Dry Preparation of Disturbed Soil and Soil Aggregate Samples for Test*, AASHTO T088-00: *Standard Method of Test for Particle Size Analysis of Soils*, ASTM D421-98: *Standard Practice for Dry Preparation of Soil Samples for Particle-Size Analysis and Determination of Soil Constants* y ASTM D422-02: *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*.

Del ensayo granulométrico se pueden desprender dos principales modos de ejecución los cuales son: tamizado y por sedimentación. Se tamiza el material cuando las partículas del mismo son principalmente gruesas, sin embargo cuando el material es sumamente fino se realiza por sedimentación.

Figura 25. **Disposición de tamices para ensayo de granulometría**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería Sección de Mecánica de Suelos.

Después de realizado el ensayo de granulometría con lavado al material en estudio del presente trabajo se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla IX. **Resultados granulometría del material en estudio**

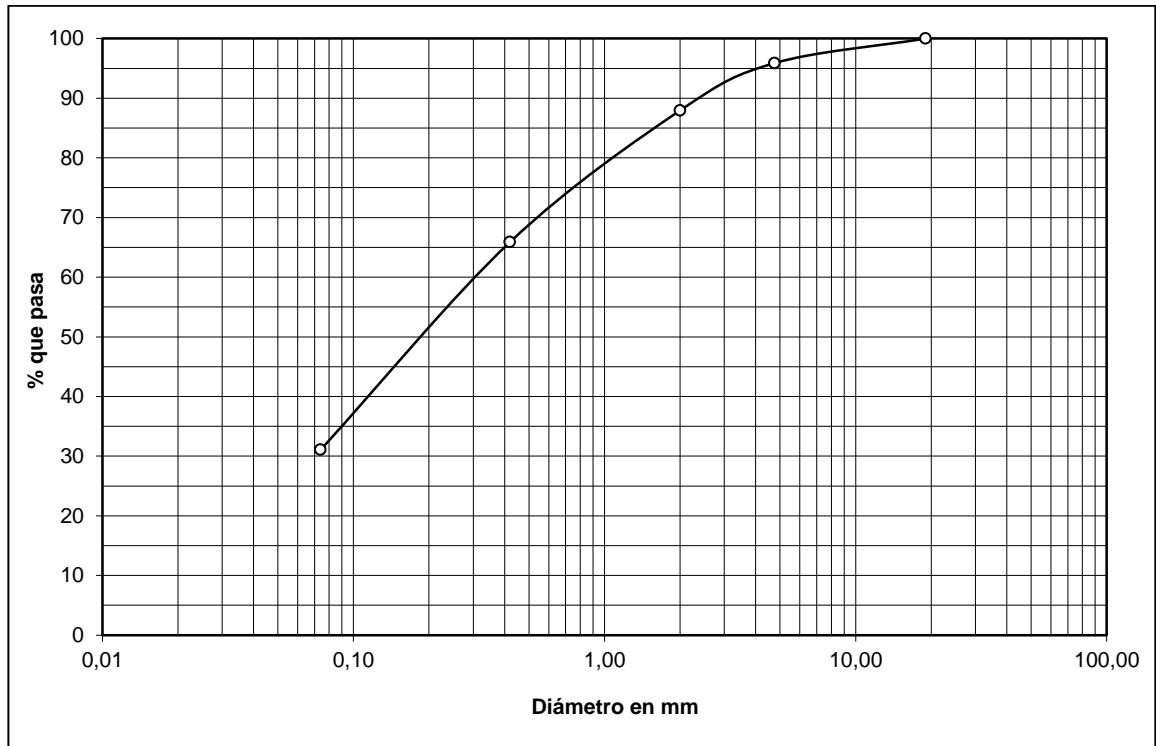
Peso Bruto Seco = 877,30 gr					
Tara = 152,25 gr					
Peso Neto Seco = 725,05 gr					
Tamiz	Abertura	Peso Bruto	Tara	Peso Neto	Porcentaje
No.	Mm	gr	gr	gr	%
3/4"	19	652,05	152,25	499,8	100
4	4,76	622,3	152,25	470,05	95,89
10	2	564,66	152,25	412,41	87,95
40	0,42	404,68	152,25	252,43	65,88
200	0,074		152,25	225,25	31,06

Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería Sección Mecánica de Suelos.

Los resultados presentados en la tabla anterior arrojan la siguiente distribución de tamaño de partículas:

- Gravas: 04,10 %
- Arenas: 64,83 %
- Finos: 31,07 %

Figura 26. **Curva granulométrica del material en estudio**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería Sección Mecánica de Suelos.

Con los diámetros efectivos en milímetros de D_{10} : 0, D_{30} : 0, D_{60} : 0,3; y consecuentemente coeficiente de uniformidad y graduación de 0, dando un material bastante uniforme en el tamaño de sus partículas. Por lo tanto, la clasificación del material según su granulometría utilizando los sistemas descritos anteriormente es:

- AASHTO: A-2-4
- S.U.C.S.: SM, arena pómez color beige

6.6. Límites de Atterberg

Para comprender el concepto de los límites de Atterberg es necesario definir la propiedad de los suelos que hace referencia a la capacidad de los mismos de deformarse hasta cierto límite sin romper la estructura del suelo en un determinado plano, la cual se denomina plasticidad.

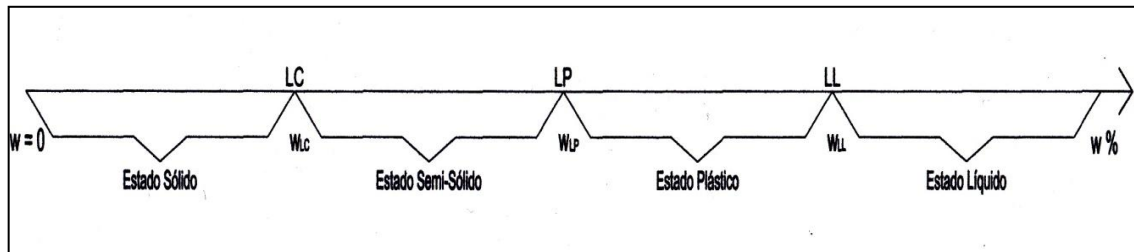
Esta propiedad se hace muy evidente en las arcillas las cuales tienen una amplia capacidad de deformación sin llegar a la ruptura en comparación con las arenas. Para determinarla se hace necesario el uso de los límites de Atterberg, donde se separan los cuatro estados de consistencia de los suelos coherentes, los cuales son: Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) y Límite de Contracción (LC).

A través de estos límites se puede dar una idea del tipo de suelo en estudio. La determinación del suelo que se realiza en ambos sistemas de clasificación descritos anteriormente se utilizó los valores límites mencionados.

Otro aspecto a mencionar es el Índice Plástico (IP), el cual se determina por medio de la diferencia entre el valor del límite líquido y el límite plástico. Los límites líquido y plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla del suelo, sin embargo, el índice plástico depende de la cantidad de arcilla contenida.

Cuando no es posible la determinación del límite plástico del suelo se establece que no es plástico (NP), consecuentemente el valor del índice plástico es cero. El valor del índice de plasticidad muestra ese rango por el cual el material con la humedad determinada en el mismo tiene un estado plástico, generalmente se da con frecuencia en suelos con mucha cohesión. La siguiente figura muestra los cambios y rangos que marcan los límites de Atterberg.

Figura 27. Límites de Atterberg del suelo plástico



Fuente: elaboración propia.

Respecto al IP, cuando éste es igual a cero significa que el suelo no es plástico, y cuando es menor a siete significa que el suelo es de baja plasticidad; se encuentra entre 7 y 17 significa que el suelo es de mediana plasticidad y cuando es mayor a 17, el suelo presenta una alta plasticidad.

6.6.1. Límite líquido

El límite líquido representado en la figura 27 es el punto de contenido de humedad expresado en porcentaje, que marca el cambio del suelo de estado líquido a plástico. Los suelos plásticos contienen en el límite líquido una resistencia bastante baja de esfuerzos de corte de aproximadamente de 0,025 kilogramos sobre centímetro cuadrado.

En este caso la cohesión del suelo es prácticamente nula debido principalmente al alto contenido de humedad que se pueda encontrar. Para determinar el límite líquido de un suelo se hace por medio de la copa de Arthur Casagrande, con la cual se le imparte 25 golpes a un suelo humedecido, y se determina el contenido de humedad para el cual a los 25 golpes una ranura realizada al material en la copa se cierra.

6.6.2. Límite plástico

El límite plástico es el punto de contenido de humedad expresado en porcentaje, que marca el cambio del suelo de estado semisólido a un estado plástico. Para determinar el límite plástico se utiliza el sobrante del material utilizado en la determinación del límite líquido al cual se le extrae la humedad por medio de la evaporación mezclando el material hasta tener una mezcla plástica que sea moldeable. Posteriormente se realiza una bola pequeña que deberá moldearse en forma de cilindro con movimiento de rodillo.

Deberá repetirse este procedimiento hasta que al momento de alcanzar un filamento de 1/8" de diámetro, el filamento se rompa, en ese punto se toman los pedacitos rotos y se pesan, posteriormente se secan al horno y se vuelven a pesar para determinar el contenido de humedad correspondiente al límite plástico. Cuando en un determinado suelo no se pueda realizar el filamento por falta de cohesión total se dice que es un suelo no plástico.

6.6.3. Límite de contracción

El límite plástico es el punto de contenido de humedad expresado en porcentaje, que marca el cambio del suelo de estado sólido a semisólido, es decir, el punto con el cual una reducción de agua no ocasiona disminución en el volumen del material. La diferencia entre el límite plástico y el límite de contracción se denomina índice de contracción (IC).

Para el caso del material en estudio, no presentó ninguna plasticidad así como cohesión, ya que el material al estar humedecido cerraba a los 3 golpes, y además no se podía formar el filamento del ensayo del límite plástico. Este comportamiento es típico de los suelos con altos porcentajes de arena.

6.7. Aplicación del ensayo de contenido de humedad

Para determinar cuánta agua se necesitaría en el proceso de compactación, previo a la realización del ensayo de Proctor, se determinó el contenido actual de ese momento, por lo que se tomó dos muestras representativas del material en su estado natural, el cual arrojó los siguientes resultados:

Tabla X. **Contenido de humedad inicial**

Muestras	A	B
P.B.H.	64,67 g	61,42 g
P.B.S.	55,61 g	52,87 g
Tarros	24,73 g	20,44 g
P.N.H.	39,94 g	40,98 g
P.N.S.	30,88 g	32,43 g
H %	29,34	26,36 g
H % Final	27,85	

Fuente: Ensayo de contenido de humedad CII, sección Mecánica de Suelos, USAC.

Al determinar el contenido de humedad se procedió a colocar 1 m³ del material de estudio a secar al sol para poder reducir este alto contenido de agua y por consiguiente poder tener el porcentaje de humedad óptimo que se determinará en el ensayo de Proctor.

6.8. Aplicación del ensayo de Proctor

Para iniciar el experimento físico del prototipo de carretera, luego de haber realizado la granulometría y la clasificación de suelos se procedió a la ejecución del ensayo de Proctor. A continuación se muestran los resultados del mismo para el suelo de muestra.

6.8.1. Proctor estándar

Para poder aplicar los métodos de determinación de densidad en campo se decidió aplicar los ensayos que mejor adaptaran una situación crítica en el diseño de una carretera, el cual es uno de los proyectos más comunes donde se mide la densidad constantemente. Por lo tanto, se realizó el ensayo del Proctor modificado el cual considera una mayor energía de aplicación considerando como si se estuvieran aplicando las mayores cargas.

6.8.2. Proctor modificado

La ventaja de la aplicación del Proctor modificado es que es el más utilizado ya que considera una mayor carga, por consiguiente mayor energía aplicada y mejor compactación, el hecho de que el suelo, en cualquiera de sus capas se encuentre muy bien compactado da confianza al constructor de poder aplicar la carpeta de rodadura sin contratiempos. A continuación se presentan los resultados que se obtuvieron del Proctor modificado.

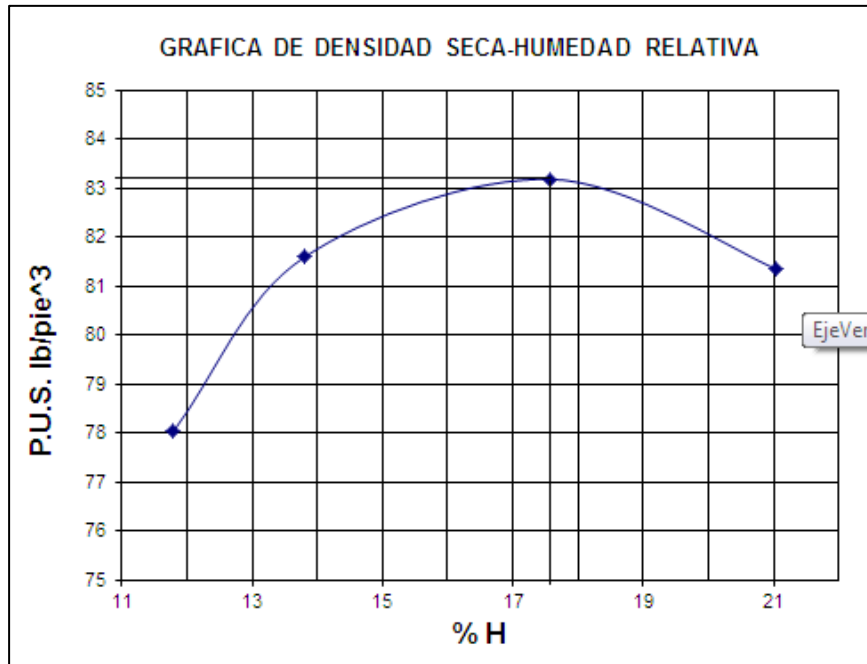
- No. de Capas: 5
- No. de Golpes: 25
- Peso del Martillo: 10 lb

Tabla XI. **Resultados ensayo de Proctor modificado**

No. de Columna:	1		2		3		4	
Intervalo de Humedad:	12		16		20		24	
P.B.H.	5 520		5 605		5 680		5 690	
TARA	4 200		4 200		4 200		4 200	
P.N.H.	1 320		1 405		1 480		1 490	
P.U.H.	87,22		92,84		97,80		98,46	
Tarro	Y	X	y	x	y	x	y	x
P.B.H.	43,2	42,5	62,6	60,8	63,1	49	68,2	64,9
P.B.S.	41	40,2	58,2	56,2	56,9	44,9	62,5	59,1
Tara	21,5	21,5	24,7	24,4	21,6	21,6	34,9	32
Dif.	2,2	2,3	4,4	4,6	6,2	4,1	5,7	5,8
P.N.S.	19,5	18,7	33,5	31,8	35,3	23,3	27,6	27,1
% DE HUMEDAD	11,28	12,30	13,13	14,47	17,56	17,60	20,65	21,40
% DE H. PROMEDIO	11,8		13,8		17,6		21,0	
P.U.S.	78,02		81,58		83,18		81,35	

Fuente: Ensayo de Proctor modificado CII, sección Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 28. **Curva PUS vs porcentaje H del Proctor modificado**



Fuente: Ensayo de Proctor modificado CII, sección Mecánica de Suelos, USAC.

Con la gráfica obtenida anteriormente, se puede observar que tenemos el P.U.S._{máx} de 83,2 lb/pe³ ó 1332,86/m³ y una humedad óptima del 18,3%. Estas condiciones se deben cumplir en el campo o al menos acercarse lo máximo posible para que las capas que se coloquen en la construcción de una carretera no tengan ningún problema.

6.8.3. Aplicaciones

Como se mencionó anteriormente, una de las más grandes aplicaciones es la construcción de carreteras, las cuales requieren un monitoreo constante alrededor de la longitud de la misma para asegurarse que se está cumpliendo con las condiciones determinadas en el Proctor.

El Proctor lo que determina es un peso unitario seco con una determinada humedad de compactación para asegurarse de que el suelo haya recibido la suficiente energía de impacto y que en el futuro no ocurran asentamientos que puedan transmitirse a través de toda el área afectando lo que se encuentre en los niveles superiores. Este ensayo puede utilizarse para determinar las características de construcción de edificaciones, puentes, viviendas.

6.9. Compactación del suelo

Después de haber realizado los ensayos preliminares del material, se procedió a la compactación del mismo para poder visualizar y ejemplificar a pequeña escala lo que sería este proceso. Para ello se construyó un prototipo aproximado del proceso de compactación hasta la medición de sus densidades así como los contenidos de humedad y posteriormente poder realizar un análisis de ventajas y desventajas. Previo al proceso de compactación se midió la humedad del suelo para saber si existía un sobrante o faltante respecto a la humedad óptima que se determinó en el ensayo de Proctor modificado como se presenta a continuación.

Tabla XII. **Contenido de humedad previo a la compactación**

Muestras	A	B
P.B.H.	76,45	89,82
P.B.S.	71,33	82,33
Tarros	23,65	26,67
P.N.H.	52,8	63,15
P.N.S.	47,68	55,66
H %	10,74	13,46
H % Final	12,10	

Fuente: Ensayo de contenido de humedad CII, sección Mecánica de Suelos, USAC.

El contenido de humedad final fue del 12.1%, el óptimo del 18.3% y el faltante del 6.2%. Por lo tanto se calculó la cantidad de agua necesaria para suplir la diferencia con base a 1 m³ del material en estudio.

$$0.062 \times 1000 \text{ litros} = 62 \text{ litros}$$

$$62 \text{ litros} / 3.78 \text{ (gal/litro)} = 16.40 \text{ galones}$$

$$16.40 \text{ gal} / 5 \text{ (gal/bote)} = 3.28 \text{ botes de agua}$$

Se determinó como unidad de medida practica el uso de botes para humedecer el material y obtener el contenido de humedad óptimo. Para el prototipo de carretera se construyó un marco de madera sobre una superficie nivelada de 2 metros de largo por un metro de ancho. El perímetro de madera era de una pulgada de espesor, el cual se estabilizó por medio de estacas y varillas de acero de 3/8" en su alrededor en posiciones críticas. En las uniones también se reforzó con dos tablas laterales para evitar que en el momento de la compactación el marco se venciera por presión lateral.

Figura 29. **Prototipo de madera para proceso de compactación**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Para la ejecución de la compactación se solicitó ayuda de la sección de Servicios Generales de la Universidad de San Carlos de Guatemala, la cual proporcionó una bailarina compactadora con las siguientes características:

- Motor ROBIN EH-12 4 tiempos a gasolina: 4 caballos de fuerza, carburador de flotador.
- RPM 3600
- Tamaño de plancha: 11.3 x 13.4 pulgadas
- Fuerza de impacto 3200 libras
- Impactos por minuto 640 a 600
- Peso operacional: 172 libras

Figura 30. **Compactadora SUBARU TV7DFW**



Fuente: Compactadora, sección de Servicios Generales, USAC.

El proceso de compactación se llevó a cabo colocando el material en 3 capas de 10 cm cada una aproximadamente. La sección de Servicios Generales también colaboró por medio de la inclusión de un operador que llevara a cabo la tarea de compactar cada capa con el fin de que los resultados sean los más cercanos a los especificados en los ensayos de laboratorio.

Figura 31. **Proceso de compactación, primera fase**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 32. **Proceso de compactación, segunda fase**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 33. **Proceso de compactación, tercera fase**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

6.10. Resultados preliminares

Durante el proceso de compactación se pudo ir viendo cada etapa de simulación del prototipo de carretera, en ciertas ocasiones fue necesario la adición de agua aparte de la que ya se había mezclado para que fuera una buena compactación. Una de las razones posibles para ello fue que el material contenía muchas partículas finas las cuales consumen mucha agua absorbiéndola sin dejar para el resto de partículas.

El proceso fue todo un éxito, el material quedó bien compactado. Se tuvieron leves inconvenientes con las esquinas del perímetro de madera ya que la compactadora no podía pasar por esos sitios sin dañar la estructura lo cual hubiera ocasionado el vencimiento total de la madera.

6.11. Aplicación de ensayos destructivos

Se denominan ensayos destructivos ya que para poder realizarlos es necesaria la abertura de agujeros dentro de la capa de la carretera. Para la determinación de la densidad en este caso se emplearon los métodos del cono de arena y globo de hule. Posteriormente se presentarán los resultados finales de ambos. Es necesario aclarar que los agujeros que se realizaron en el material compactado se excavaron lejos del perímetro de madera del prototipo ya que en esa área no se pudo compactar bien por la cercanía a la madera; por lo que se hicieron en la zona central de la plataforma como se podrá observar.

6.12. Método del cono de arena

A continuación se presenta una breve reseña del proceso que se llevó a cabo para la medición de la densidad por medio del ensayo del cono de arena.

Figura 34. **Excavación de agujero, método del cono de arena**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 35. **Medición de los picnómetros**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 36. **Medición de la humedad por medio del SPEEDY**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

6.12.1. Método del globo de hule

A continuación se presenta una breve reseña del proceso que se llevó a cabo para la medición de la densidad por medio del ensayo del cono de arena.

Para un mejor análisis del proceso de aplicación del ensayo del globo de hule es aconsejable observar la posición del globo dentro del aparato cuando este contiene agua, es decir, cuando el globo este ejerciendo presión hacia abajo se observará débil como si estuviera vacío, sin embargo cuando la presión sea de succión entonces el globo se observará como si estuviera lleno de aire.

Figura 37. Colocación del aparato sobre el plato base



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 38. **Manómetro del aparato de globo de hule**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 39. **Lectura inicial aplicando presión**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 40. **Manómetro en 3 psi para lectura inicial**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 41. **Lectura inicial aplicando succión**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 42. **Excavación agujero, método del globo de hule**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 43. **Aparato fuera de base para excavación de agujero**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Figura 44. **Lectura final aplicando presión**



Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, sección de Mecánica de Suelos, USAC.

Como se puede observar en la última figura, el globo no se mira ya que al aplicar presión al aparato sobre el agujero ya excavado éste se introduce y toma el contorno del hueco para determinar el volumen.

7. RESULTADOS FINALES Y COMPARACIÓN MÉTODO DE CONO DE ARENA Y MÉTODO DE GLOBO DE HULE

A partir de los ensayos realizados, se presentan los resultados en una forma esquematizada de cada uno de ellos como sigue:

7.1. Resultado final método de cono de arena

Los resultados del ensayo del cono de arena fueron los siguientes:

Tabla XIII. **Resultados finales ensayo cono de arena**

Ensayo cono de arena			
Ensayo	1	2	3
Pic 1 (lb)	10,45	10,3	12,45
Pic 2 (lb)	9,45	9,25	11,35
Pic 3 (lb)	5,62	5,8	7,86
Peso material húmedo excavado (lb)	2,95	2,55	2,54
% H SPEEDY material excavado	21,7	22,72	22,72
Peso de la arena en el agujero Pa (lb)	2,83	2,4	2,39
Volumen del agujero (pie³)	0,03009038	0,02541027	0,02530172
P.U.H. (lb/pie³)	98,0379859	100,353125	100,388452
P.U.S CAMPO (lb/pie³)	80,557096	81,7740588	81,8028454
% de Compactación	96,8234327	98,2861284	98,3207277

Fuente: Ensayo cono de arena, CII sección de Mecánica de Suelos, USAC.

7.2. Resultado final método del globo de hule

De manera similar se realizaron tres ensayos consecutivos para determinar la densidad en campo por el método de globo de hule, el cual arrojó los siguientes resultados:

Tabla XIV. Resultados finales método globo de hule

Resultados ensayo del globo de hule			
Ensayo	1	2	3
Nivel Inicial (cm³)	500	500	500
Lectura Inicial (cm³)	505	505	505
Lectura Final(cm³)	1 260	1 200	1 280
Peso Húmedo material excavado (lb)	2,55	2,4	2,7
Volumen (pie³)	0,02666257	0,02454369	0,02736887
% H	19,44	20,59	20,14
P.U.H. (lb/pie³)	95,6396805	97,784794	98,6522397
P.U.S. Campo (lb/pie³)	80,0734097	81,0886425	82,1143997
% de Compactación	96,242079	97,4623107	98,6951919

Fuente: Ensayo globo de hule, CII sección de Mecánica de Suelos, USAC.

En ambos métodos para determinar la densidad en campo se realizaron tres ensayos consecutivos intentando ubicar el mejor sitio dentro del prototipo, para su desarrollo. Además se realizaron cálculos de estadísticos para su interpretación basada en parámetros ingenieriles.

7.3. Cálculos estadísticos de resultados

A partir de los resultados obtenidos en ambos ensayos se realizaron cálculos como el promedio y la desviación estándar para cada serie de ensayos de cada método como se muestra a continuación:

Tabla XV. **Media y desviación estándar de resultados de ensayos**

Método	Descripción	Ensayos			Promedio	Desviación Estándar
		1	2	3		
Globo de hule	P.U.S. Campo (lb/pie ³)	80,07	81,09	82,11	81,092	1,020
	% de Compactación	96,24	97,46	98,70	97,467	1,227
Cono de arena	P.U.S CAMPO (lb/pie ³)	80,56	81,77	81,80	81,378	0,711
	% de Compactación	96,82	98,29	98,32	97,810	0,855

Fuente: elaboración propia.

7.4. Análisis comparativo

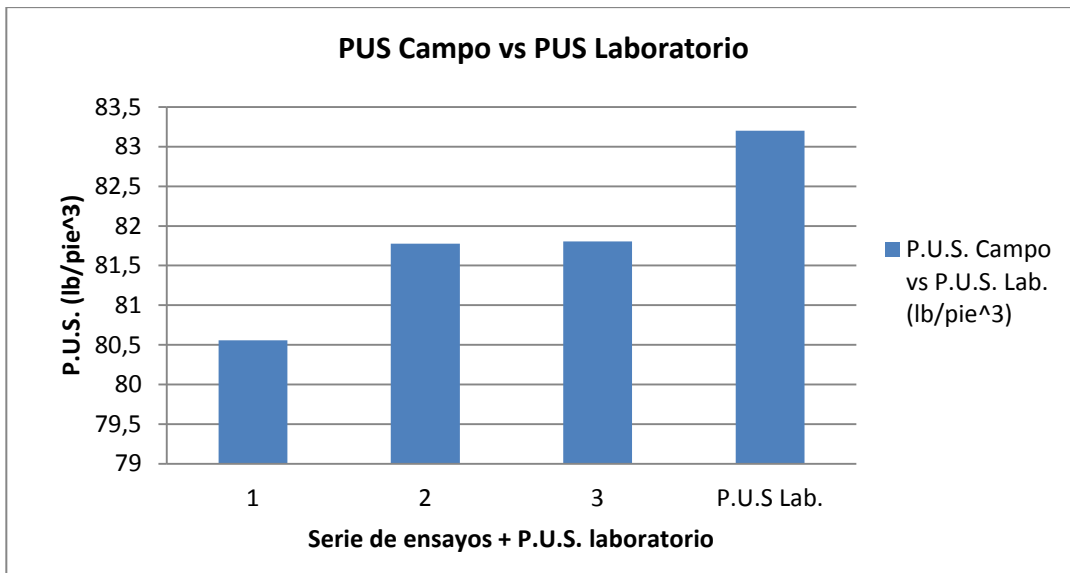
La desviación estándar es uno de los datos más importantes a analizar, ya que esta permite dar una idea acerca de que tan alejados o cercanos están los resultados del promedio. Mientras menor sea el dato que arroje, significa que existe menos variación entre sus resultados.

Por consiguiente, se puede observar que el método del cono de arena maneja una menor desviación del promedio y por lo tanto los resultados obtenidos variaron poco.

En el caso del método del globo de hule la desviación estándar es un poco mayor pero esto no significa que los datos son erróneos ni que hubo mucha dispersión, sino que la dispersión fue ligeramente mayor al cono de arena.

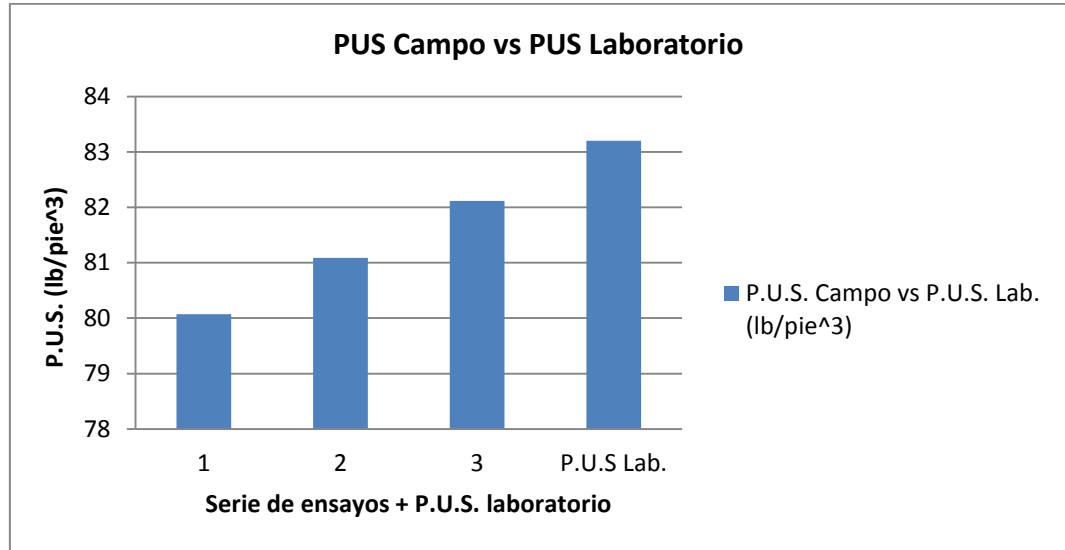
Para proseguir en el análisis se presentan unos gráficos comparativos los cuales muestran las diferencias principales de los datos obtenidos en campo con los resultados del laboratorio.

Figura 45. **PUS Campo (cono de arena) vs PUS Laboratorio**



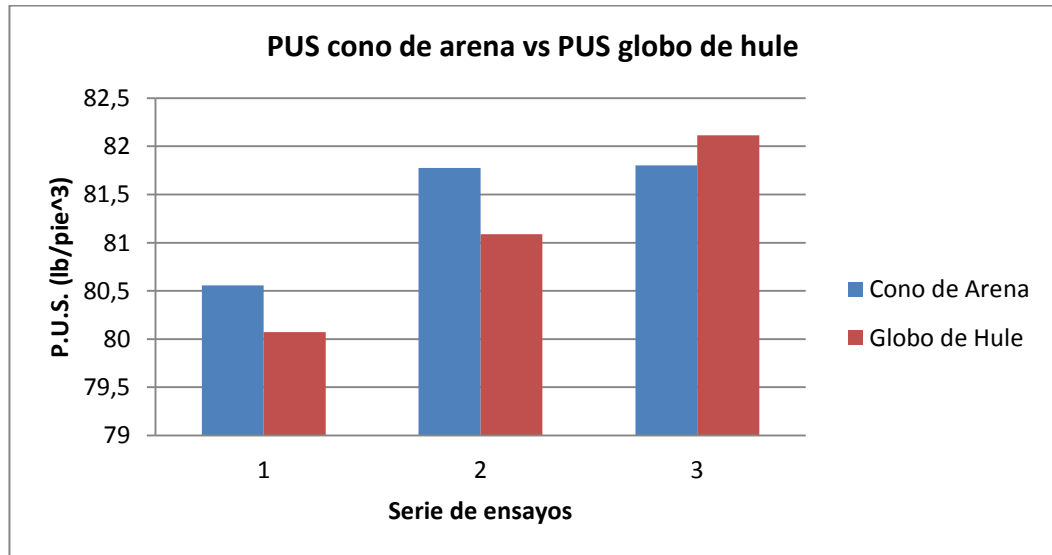
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. **PUS Campo (globo de hule) vs PUS Laboratorio**



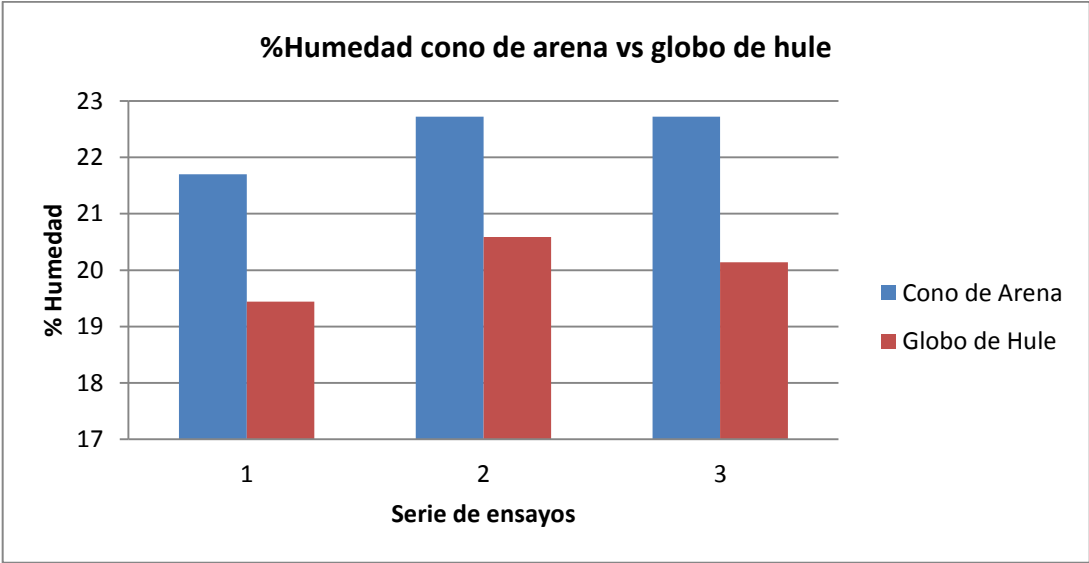
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. **PUS (cono de arena) vs PUS (globo de hule)**



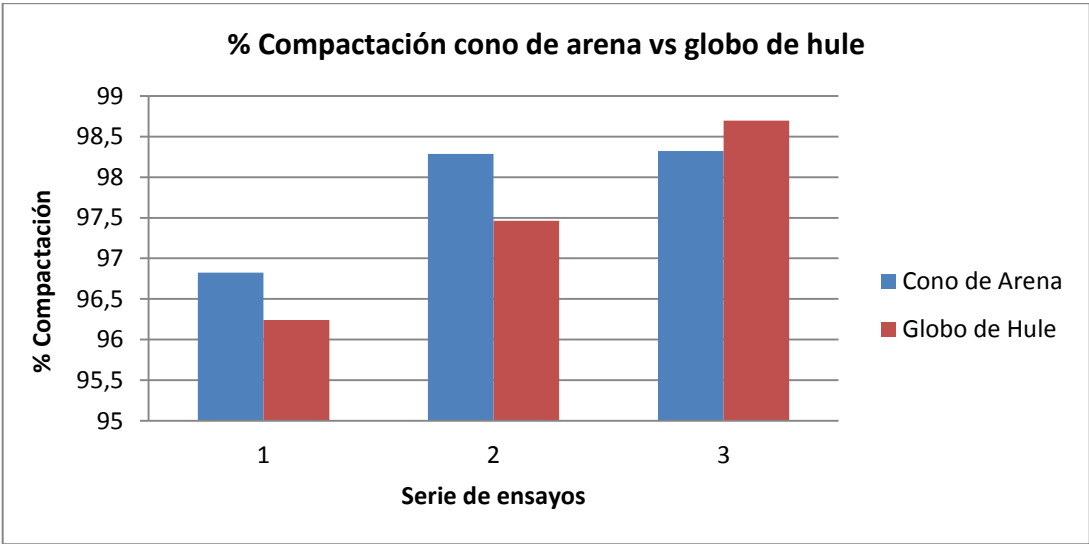
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. **Porcentaje de humedad del cono de arena vs globo de hule**



Fuente: elaboración propia.

Figura 1. **Compactación del cono de arena vs globo de hule**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 45 se puede observar como se van distribuyendo los pesos unitarios secos del suelo compactado (determinados por el método del cono de arena) en comparación con el valor que debería tener según el ensayo de Proctor modificado que se realizó. Se puede observar una uniformidad relativa congruente a la desviación estándar determinada, así mismo esto se puede observar en la figura 46, pero esta vez los valores del peso unitario seco son representados por la ejecución del método del globo de hule.

Para poder visualizar lo que ocurría con el peso unitario seco, la humedad del suelo y su porcentaje de compactación también se realizaron gráficos representativos que muestran la comparación entre los 3 ensayos que se realizaron con el método del cono de arena con los 3 ensayos realizados a través del método del globo de hule, representados en las figuras 47, 48 y 49.

Es importante resaltar el hecho de que la humedad para ambos ensayos se determinó por medio de distintos métodos, es decir, para el método del cono de arena se utilizó el método del uso del SPEEDY (equipo descrito anteriormente en el capítulo 2), y en el ensayo del globo de hule se determinó la humedad por medio del uso determinando las diferencias del peso húmedo respecto al seco, es interesante visualizar la diferencia entre ambos, ya que en promedio para el primero da un resultado de 22.38% en promedio y el segundo de 20.06%.

Como se pudo notar, los porcentajes de humedad que arrojan los ensayos son superiores al establecido en el laboratorio, esto pudo suceder por diversos factores. El principal factor es que se agregó mucha agua adicional a la establecida en los cálculos debido a que no se estaba compactando como se deseaba.

Esta necesidad de agua también pudo ser afectada por el hecho de que se trabajó sobre un marco de madera y sobre una plataforma elevada sobre el nivel del suelo, por lo tanto existía presión lateral en cada impacto ocasionando pérdida de agua por los costados y consecuentemente la necesidad de agregar más.

Este hecho también pudo afectar la densidad determinada, es decir, la falta de presión lateral hace que no exista fuerza alguna más que el perímetro de madera con sus apoyos para que contrarreste la presión ejercida por la compactadora, por lo tanto se crea dispersión de partículas y pérdida de cohesión que a diferencia de haber compactado en una zona donde hubiera existido la suficiente presión lateral que contrarrestara este efecto, se ha dejado libre y se ha modificado el grado final de compactación.

Otro aspecto importante a destacar es el hecho de que ambos métodos arrojan un porcentaje de compactación bastante cercano al 100%, aceptable para diversos casos, por ejemplo una sub base.

El peso unitario seco determinado por ambos métodos es también muy aproximado al obtenido en el laboratorio, levemente más exacto el método del cono de arena ya que no requiere de presión adicional para mantener el equipo en posición para medir el volumen, aunque para el tercer ensayo de la serie del método del globo de hule, este arroja un resultado más cercano.

Por lo tanto es importante el hecho de visualizar que la diferencia de aplicación es mínima y por consiguiente influyen otros factores para la elección del método que se explicarán más adelante.

7.5. Análisis comparativo con el método del densímetro nuclear

A partir del análisis presentado de los resultados de los ensayos del cono de arena y el globo de hule, se presenta ahora un breve análisis cualitativo del densímetro nuclear respecto de los otros métodos. Este análisis es cualitativo ya que no se realizó ningún ensayo con el densímetro nuclear debido que para realizarlo se necesita una licencia autorizada de uso de equipo radioactivo otorgada por el Ministerio de Energía y Minas de la República de Guatemala, la cual para obtenerla se requiere de un tiempo prolongado de práctica y capacitación.

El análisis cualitativo, para compararlo con los otros métodos estudiados, se realizó por medio de las ventajas y desventajas que representa este método, principalmente para el tipo de aplicación que se desea, el lugar donde se realiza, la cooperación de un ambiente ideal, entre otros como se muestra a continuación:

- Los resultados que se obtienen por este método presentan una mayor exactitud (siempre y cuando las condiciones del suelo sean ideales, como se describió en el capítulo 4), así como rapidez de ejecución. Basta con tener el aparato listo y colocarlo sobre la superficie plana para que haga la lectura.
- Otro resultado muy importante es que a diferencia de los otros dos métodos, este es un método o ensayo no destructivo, es decir, para obtener la densidad no es necesario excavar o deformar la superficie del suelo, utilizando los procedimientos de retro-dispersión o colchón de aire.

- Es un equipo de fácil adaptabilidad, el cual no se ve afectado por fuertes vientos o turbulencia aérea.
- Para la aplicación y medición de la densidad, el equipo cuenta con facilidades de selección, es decir, puede seleccionarse la profundidad a la que se desea medir la densidad dependiendo del tipo de equipo.
- Por su facilidad y rapidez de uso, lo hace beneficioso para obras grandes, de largos recorridos, que requieran de una constante medición en un corto tiempo sin afectar la estructura de la capa en la cual se esté monitoreando.

Por otro lado existen también desventajas que son importantes de mencionar para poder desarrollar un criterio amplio de elección de la situación requerida, dentro de las cuales se podrían mencionar las siguientes:

- Se requiere de un operario especializado en su uso, con una licencia autorizada, la cual a su vez para obtenerla requiere pasar tiempo de entrenamiento que quizás los operarios de la construcción no tengan.
- Al trabajar con sustancias radioactivas la salud del operador se puede ver gravemente afectada, por lo que se requiere mucho cuidado y un uso profesional.
- El contenido radioactivo que pueda salir por algún error, puede dañar el medio ambiente.
- Es imposible realizar el ensayo con condiciones ambientales adversas como la lluvia o humedad excesiva.

- Cuando este método se emplea en zonas no uniformes, los resultados se pueden ver afectados debido a que el rebote de los rayos gamma puede no ser el deseable. Además, también las vibraciones cercanas puede afectar la lectura.
- El costo del equipo es muy elevado, sin contar con el costo de calibración del equipo que también es bastante alto. La economía siempre es un factor determinante.

Es muy importante evaluar estos criterios de elección para poder elegir el mejor método que se adapte a las situaciones que se presenten. El otro aspecto importante a considerar es el económico como se presenta a continuación.

7.6. Análisis costo-beneficio

Para cerrar un análisis completo es muy importante considerar el área financiera. Cada ensayo tiene su costo, pero a este hay que agregarle la mano de obra. El principal aspecto de esta sección es el costo del aparato, ya que este es el factor inicial que evalúan las empresas de construcción.

Si se cuenta con un sub-contrato para el desarrollo de los ensayos de mecánica de suelos, solo requiere verificar el costo de los materiales no renovables más la mano de obra.

Por lo tanto se presentan los siguientes cuadros con costos aproximados que se deben ir actualizando constantemente conforme pasa el tiempo.

Tabla XVI. **Costos aproximados del aparato del cono de arena**

Equipo	Unidad	Costo Aproximado
Equipo: Recipiente cilíndrico con válvula metálica + plato base metálico	U	Q 1 475,00
Arena Ottawa	Lb	Q 23,00
Speedy	U	Q 15 100,00
Carburo de calcio	Lb	Q 120,00
Dial Speedy	U	Q 4 275,00
Total de aparato sin contar accesorios misceláneos		Q 20 993,00
Mano de obra	Unidad	Costo
Costo del ensayo	U (ensayo)	Q 250
Operario	día	Q 200
Total mano de obra		Q 450
Total Cono de Arena		Q 21,443.00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Costos aproximados del aparato del globo de hule**

Equipo	Unidad	Costo Aproximado
Equipo: Recipiente de vidrio + tapaderas metálicas con adaptadores incluidos, bujía, válvula de liberación, manómetro, hule de sujeción	U	Q 1 550,00
Globos de hule	U	Q 150,00
Total de aparato sin contar accesorios misceláneos		Q 1 700,00

Mano de obra	Unidad	Costo
Costo del ensayo	U (ensayo)	Q 250
Operario	día	Q 200
Total mano de obra		Q 450

Total Cono de Arena	Q 2,150.00
----------------------------	---------------

Fuente: elaboración propia.

Se observa una considerable diferencia de costo entre ambos métodos, factor que puede ser determinante para la elección de uno a pesar de que el otro sea más apropiado para ciertas condiciones.

Tabla XVIII. **Costos aproximados del densímetro nuclear Troxler 3430**

Equipo	Unidad	Costo Aproximado
Equipo: Densímetro nuclear modela Troxler 3430	U	Q 75 000,00
Calibración del equipo	U	Q 1 150,00
Total de aparato sin contar accesorios misceláneos		Q 76 150,00

Mano de obra	Unidad	Costo
Costo del ensayo	U (ensayo)	Q 350
Operario	día	Q 300
Total mano de obra		Q 650

Total Cono de Arena		Q 76 800,00
----------------------------	--	--------------------

Fuente: elaboración propia.

Como se puede notar, el costo del densímetro nuclear está muy por encima de los otros aparatos, incluso si se subcontratara y solo se tomara el costo de mano de obra. Por consiguiente el factor que más favorece este método es la rapidez y exactitud del ensayo.

7.7. Criterios de elección de método

Como se ha visto durante todo el presente trabajo de graduación, existen 3 métodos de medición de densidad para monitoreo de suelos compactados en obras. Fueron descritos detalladamente cada uno de ellos, sus usos, características, costos, consideraciones generales entre otros. Por lo tanto se presentan ahora ventajas y desventajas de los métodos del cono de arena y del globo de hule, con una comparación con el método del densímetro nuclear.

- Ventajas del Método de Cono de arena
 - Equipo de costo moderado y de fácil adquisición en el mercado
 - Ensayo de bajo costo en mano de obra
 - Ensayo con un alto grado de exactitud en resultados
 - Equipo de fácil uso tanto en determinación de densidad como de humedad.
 - Ensayo avalado por normas internacionales

- Desventajas del Método de Cono de arena
 - Ensayo de ejecución destructiva
 - Toma un tiempo considerable en la elaboración del ensayo. Factor muy importante en las obras de gran tamaño.
 - No es posible de ejecutar en lluvia o condiciones de humedad extrema.
 - Es gravemente afectado por vibraciones cercanas, producido ya sea por maquinaria o seres humanos en los alrededores.
 - Conforme pasan los ensayos, la densidad de la arena Ottawa se puede ver afectada, ya que al recuperar la misma se pudo haber colado partículas de otro tipo de material.
 - Requiere de otras herramientas importantes como pesas, cinceles, tamices, brochas, entre otros.

- No es recomendable la aplicación de este método para suelos arenosos ya que la arena Ottawa difícilmente se podrá recuperar.
- Costo de calibración del equipo considerable.
- Ventajas del Método del Globo de hule
 - Equipo de bajo costo y de fácil adquisición en el mercado
 - Ensayo de bajo costo en mano de obra
 - Ensayo con un alto grado de exactitud en resultados, levemente menor que el método del cono de arena.
 - Equipo de fácil uso en la determinación de densidad y humedad
 - Ensayo avalado por normas internacionales
 - Alta rapidez de aplicación del ensayo. Requiere más tiempo que el método del densímetro nuclear pero es mucho más rápido que el método del globo de hule.
 - Bajo costo de calibración del equipo
 - Es posible su aplicación en condiciones de alta humedad y leve lluvia.
 - Desventajas del método del globo de hule
 - Ensayo de ejecución destructiva
 - Es afectado por vibraciones cercanas producidas por maquinaria

- Requiere de agua para el ensayo, recurso indispensable que pudiera no estar al alcance, principalmente en obras de largo recorrido.
- Utiliza globos de látex de membrana delgada, de fácil rompimiento. Es necesario contar con los suficientes si la obra es grande, vienen en bolsas de 10 globos de repuesto.
- Requiere de otras herramientas importantes como pesas, cinceles, tamices, brochas, entre otros.
- No es recomendable la aplicación de este método para suelos con mucha grava, o partículas que puedan reventar el globo cuando se aplique la presión para llenar el volumen.
- Costo de calibración del equipo considerable

7.8. Consideraciones generales

Como se ha mencionado, la selección del método depende de la situación y envergadura de la obra así como del capital económico con que se disponga para el monitoreo de compactación.

En la sección anterior se presentaron las ventajas y desventajas de los principales ensayos, las cuales sirven para determinar el tipo método que se elegirá.

Es importante tomar en cuenta todos estos factores ya que una vez se haya seleccionado el método, éste se deberá llevar a cabo en toda la obra.

CONCLUSIONES

1. El Método del Globo de Hule, se presenta como una alternativa viable en el país para su utilización ya que ahora se cuenta con un manual de uso y calibración así como resultados satisfactorios que lo garantizan.
2. El Método del Cono de Arena sigue siendo el procedimiento más utilizado en Guatemala, ya que sus limitaciones técnicas son pocas y su grado de exactitud es bastante alto, aunque finalmente se determina que es el método que consume más tiempo por ensayo.
3. El Densímetro Nuclear se presenta como el método más riesgoso para la salud del laboratorista que lo aplique y personas que interactúen con él, pero también se establece como el más rápido y confiable en el caso de proyectos grandes que requieran cientos de puntos de control de la compactación del suelo ya que solo requiere 20 segundos aproximadamente en realizar las lecturas. Además es el único método que su procedimiento es no destructivo.
4. Surge la interrogante del método que presenta mayor exactitud de lectura dentro de los ensayos destructivos, siendo este el Método del Cono de Arena ya que se determinó como un método ligeramente más exacto con un porcentaje de compactación de un 97.81% por sobre un 97.47% del Método del Globo de Hule. Sin embargo el Cono de Arena es más laborioso y por ende el que mayor tiempo consume en su aplicación.

5. El Método del Globo de Hule es ideal para mediciones en suelos arenosos, ya que fácilmente puede determinar su volumen sin perder material ni alterar factores propios del aparato como en el caso del Cono de arena donde se produciría un leve cambio en la densidad propia de la arena Ottawa que utiliza para esta medición.

6. La dependencia de recursos naturales externos al aparato como el agua en el caso del Método del Globo de Hule lo hace un factor importante a considerar en regiones donde no se cuente inmediatamente con el mismo y además presenta una difícil aplicación en obras donde se requieran números ensayos.

7. Las alternativas de los Métodos del Cono de Arena y el Globo de Hule se presentan como las más económicas en la mano de obra, ya que no necesitan licencia de ejecución (como en el caso del Densímetro Nuclear). No hay diferencia en el costo de estos métodos.

RECOMENDACIONES

1. Para determinar el método que se utilizará es necesario tener en mente las limitaciones de cada uno, así como el tamaño de la obra y el tiempo que se requiere en la programación para que este paso se realice.
2. Es aconsejable la utilización del Método del Globo de Hule en suelos arenosos y que no contengan gravas angulosas que puedan perforar el globo de látex que se utiliza y por lo tanto cause que se estropee el ensayo. En el caso solo se disponga del aparato del Cono de Arena es importante que cuando se retire la arena Ottawa del agujero, ésta se pase por el tamiz No. 16 para sustraer partículas que alteren sus propiedades.
3. Antes de realizar la determinación de la densidad en campo por cualquiera de los tres métodos principales o los métodos alternativos descritos, es necesario revisar el equipo, que se encuentren todos sus accesorios así como verificar que se encuentre bien calibrado para evitar falsos datos, los cuales puedan afectar gravemente un proyecto, incluyendo deslizamientos y/o asentamientos por un suelo mal compactado.
4. Es importante que se tenga una fuente de agua que sea transportable y los suficientes repuestos de globos cuando se utilice el método del Globo de Hule para evitar contratiempos. Como se estableció el agua que se utilice debe estar lo más limpia posible de impurezas.

5. La disponibilidad de un equipo de emergencias así como normas estrictas de utilización del equipo del Densímetro Nuclear, son indispensables para mitigar cualquier tipo de situación adversa y poder salvaguardar la vida humana por sobre cualquier cosa. Es de suma importancia que el operador del equipo cuente con licencia y experiencia para evitar el más mínimo error.

6. Para cualquier método, siempre es recomendable tener una superficie plana y libre de partículas que estropeen las lecturas, así como evitar las vibraciones cercanas al punto de ensayo causadas por el paso de personas o maquinaria de construcción, lo que evita lecturas erróneas principalmente en los ensayos del cono de arena y el Densímetro Nuclear.

BIBLIOGRAFÍA

1. BOWLES, Joseph E. *Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil*. México: McGraw-Hill Latinoamericana, 1981. 213 p.
2. BRAJA, M. Das. *Principios de ingeniería de cimentaciones*. México: Thomson, 2001. 862 p.
3. CHANG CHANG, Luis. *Densidad de campo*. [en línea] <http://www.cismid.uni.edu.pe/descargas/a_labgeo/labgeo34_p.pdf> [Consulta: 12 de febrero de 2012].
4. CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México: Limusa, 2005. 650 p.
5. DE LEÓN MONROY, Eddy José Estuardo. *Ventajas y desventajas de la utilización del método de la arena y el densímetro nuclear en la determinación de la densidad de campo*. Trabajo de graduación Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 170 p.
6. ELE International. *Soil data equipment*. [en línea] <<http://ele.com/usa/pdfs/soil-v3.pdf>> [Consulta: 17 de marzo de 2012].
7. HERNÁNDEZ CANALES, Juan Carlos. *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición*.

Trabajo de graduación Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 466 p.

8. HUMBOLDT Mfg. *Guía del usuario del Densímetro Nuclear HS-5001EZ: medidores de control de compactación*. Illinois. Estados Unidos de Norte América: Humboldt, 2005. 62 p.
9. _____. *Manual del usuario del Voluvessel H-4166 y H-4167*. Illinois. Estados Unidos de Norte América: Humboldt 2010. 8 p.
10. AGUIRRE PADILLA, Alberto Javier, et al. *Programa de seguridad para el transporte y manejo del densímetro nuclear en el Instituto Mexicano del cemento y del concreto, a.c.* [en línea]. Instituto Politécnico Nacional, unidad profesional interdisciplinaria de ingeniería y ciencias sociales y administrativas. <<http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/5952/1/I7.1872.pdf>> [Consulta: 12 de abril de 2012].
11. INSUMA. *Procedimiento métodos para la densidad del suelo y agregados de suelo en su lugar apropiado por densímetro nuclear*. [en línea] Ingeniería, suelos y materiales [ref. 7 de mayo de 2010]. Disponible en web: <<http://www.lafabrica.co.cr/Labora/P43%20Metodo%20de%20ensayo%20densimetro.pdf>> [Consulta: 12 de abril de 2012].
12. JUÁREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. *Mecánica de suelos, fundamentos de la mecánica de suelos*. II Tomos. 3a ed. México: Limusa, 2005. 2 Tomos.

13. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. *Compactación de suelos*. [en línea] <http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/07_compactacion.pdf> [Consulta: 18 de mayo de 2012].
14. SOLÍS CHÁVEZ, Cristian. *Teoría densidad en terreno Cono de Arena*. [en línea] [ref. 1 de enero de 2004]. Disponible en Web: <http://biblioteca.duoc.cl/bdigital/esco/lng_construccion/40017.pdf>.
15. Troxler International. *Principios de operación para los densímetros nucleares Troxler 3430 y 3440*. [en línea] <http://www.troxlerlabs.com/downloads/pdfs/3430-40/3430-40_brochure_span.pdf>. [Consulta: 27 de abril de 2012].

ANEXOS

Cotización equipo de densidades



COTIZACION 641-2012
Guatemala 17 de Octubre del 2012

Señor:
Axel Guzman
Presente

Estimado Señor:
En atención a su solicitud, tenemos el agrado de enviarle la siguiente cotización:

ITEM	CANT	DESCRIPCION	PRE. UNI	PRE. TOTAL
1	1	Set equipo para Densidades de Campo	38,000.00	38,000.00
2	1	Densímetro Nuclear	108,000.00	108,000.00
3	1	Valuvoseel	8,000.00	8,000.00
PRECIO EN QUETZALES				

FORMA DE PAGO: 50% anticipo, 50% contra entrega
TIEMPO DE ENTREGA: a confirmar

Sin otro particular y en espera de poder servirle,

Atentamente,

Willian Guzmán Tello

14 AV 18-32 VILLAS LA JOYA MARISCAL ZONA 11
PBX: 2495-9696
TEL: 5308-9090 E-mail: beta@itelgua.com

Fuente: Cotización representaciones Beta, octubre 2012.



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



INFORME No. 017 S. S. O.T.: 30,697

Interesado: Axel Antonio Guzmán Abril
Proyecto: Trabajo de Graduación: "Maneal Operativo del Aparato de Globo de Hule ASTM D 2167,
Análisis Comparativo y Descriptivo con el Método del Cono de Arena"
Asunto: ENSAYO DE LIMITES DE ATTERBERG
Norma: AASHTO T-89 Y T-90

Ubicación: Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala

FECHA: jueves, 17 de enero de 2013

RESULTADOS:

ENSAYO No.	MUESTRA No.	L.L. (%)	I.P. (%)	C.S.U. *	DESCRIPCION DEL SUELO
1	1	0	0	SM	Arena pomez limosa color beige

(*) C.S.U. = CLASIFICACION SISTEMA UNIFICADO

Observaciones:

Muestra tomada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos





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

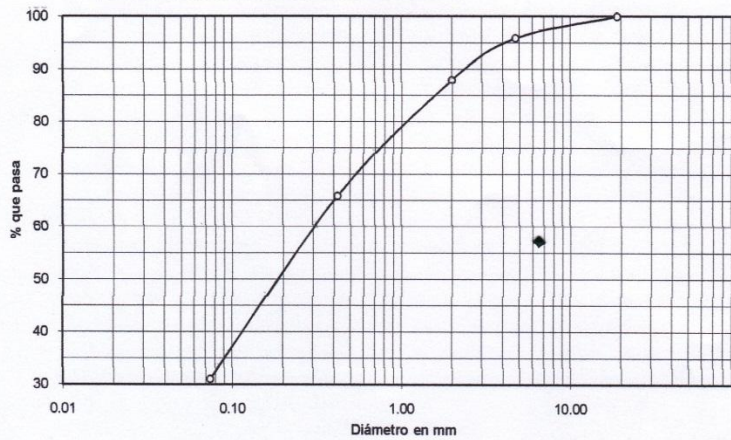


INFORME No.: 019 S.S. O.T.: 30,697

Interesado: Axel Antonio Guzmán Abril
 Tipo de Ensayo: Análisis Granulométrico, con tamices.
 Norma: A.A.S.H.T.O. T-27,
 Proyecto: Trabajo de Graduación: "Manual Operativo del Aparato de Globo de Hule ASTM D 2167, Analisis Comparativo y Descriptivo con el Método del Cono de Arena"
 Fecha: jueves, 17 de enero de 2013

Análisis con Tamices:		
Tamiz	Abertura (mm)	% que pasa
3/4"	19.00	100.00
4	4.76	95.89
10	2.00	87.95
40	0.42	65.88
200	0.074	31.06

% de Grava: 4.10
 % de Arena: 64.83
 % de Finos: 31.07



Descripción del suelo: Arena limosa con pomez
 Clasificación: S.C.U.: SM P.R.A.: A-2-4
 Observaciones: Muestra tomada por el interesado.

Vo. Bo.:
 Atentamente,
 Inga. Telma Maricela Cano Morales
 DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
 Jefe Sección Mecánica de Suelos



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
 Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
 Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
 Página web: <http://cii.usac.edu.gt>



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



INFORME No. 0020 S.S

O.T. No. 30,697

Interesado: Axel Antonio Guzmán Abril

Proyecto: Trabajo de Graduación: "Manual Operativo del Aparato de Globo de Hule ASTM D 2167, Analisis Comparativo y Descriptivo con el Método del Cono de Arena"

Asunto: DENSIDAD DE CAMPO

Norma: AASHTO T-191 , ASTM D-1556.

Ubicación: Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala

FECHA: jueves, 17 de enero de 2013

RESULTADOS:

Estación: No.	Fecha de chequeo	Capa No:	H_{Lab} (%)	H_{campo} (%)	γ_{Lab} (lb/pie ³)	γ_{campo} (lb/pie ³)	C (%)	DESCRIPCION DEL SUELO:
1	28/11/2012	sub-base	18.2	21.7	83.2	80.6	96.8	Arena pomez limosa color beige
2	28/11/2012	sub-base	18.2	22.7	83.2	81.8	98.3	
3	28/11/2012	sub-base	18.2	22.7	83.2	81.8	98.3	

Atentamente,

Vo. Bo.

Inga. Telma Maricela Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC



Ing. Omar Enrique Méndez Méndez
Jefe Sección Mecánica de Suelos



FACULTAD DE INGENIERÍA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Informe No.: 0020 S.S. Centro de investigaciones de ingeniería, USAC.



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



INFORME No. 0018 S.S.

O.T. No.: 30,697

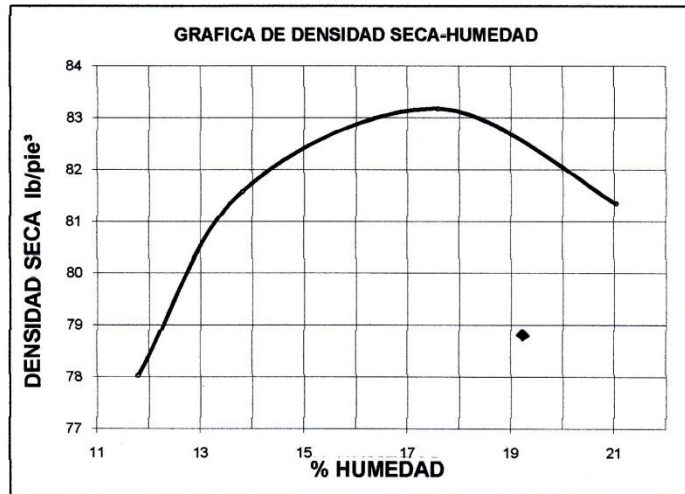
Interesado: Axel Antonio Guzmán Abril
Asunto: ENSAYO DE COMPACTACIÓN.

Proctor Estándar: () Norma:
Proctor Modificado: (X) Norma: A.A.S.T.H.O. T-180

Proyecto: Trabajo de Graduación: "Manual Operativo del Aparato de Globo de Hule ASTM D 2167, Analisis Comparativo y Descriptivo con el Método del Cono de Arena"

Ubicación: Ciudad de Guatemala, del Municipio de Guatemala, Guatemala

Fecha: jueves, 17 de enero de 2013



Descripción del suelo: Arena pomez limosa color beige
Densidad seca máxima γ_d : 1,333 Kg/m³ 83.2 lb/ft³
Humedad óptima Hop.: 18.2 %
Observaciones: Muestra proporcionada por el interesado.

Atentamente,

Vo. Bo.:

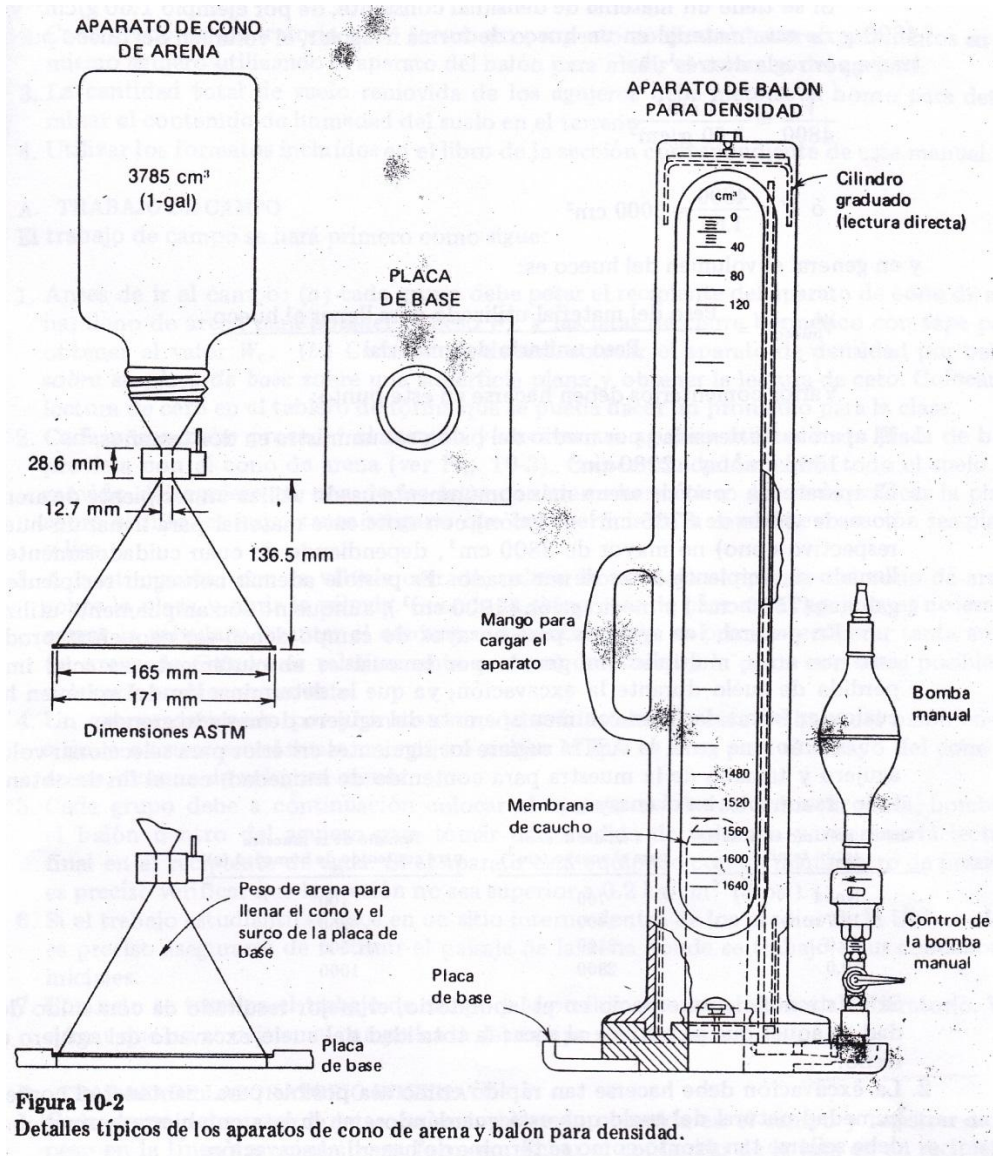
Inga. Telma Matricula Cano Morales
DIRECTORA CII/USAC

Ing. Omar Enrique Medrano Mendez
Jefe Sección Mecánica de Suelos

FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-5, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-9115, Planta: 2418-8000 Exts. 86209 y 86221 Fax: 2418-9121
Página web: <http://cii.usac.edu.gt>

Fuente: Informe No.: 0018 S.S. Centro de investigaciones de ingeniería, USAC.

Otros diagramas del equipo cono de arena y *voluvel*.



Fuente: Bowles, Joseph, Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Página 91.