



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

**INCIDENCIA DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR POR LA INFLUENCIA DE CLIMA,
HUMEDAD, EQUIPO Y SUPERFICIE DE BASE DE COMPACTACIÓN DURANTE SU
DESARROLLO**

Fernando José Carlos Revolorio González

Asesorado por el Ing. Omar Enrique Medrano Méndez

Guatemala, octubre de 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**INCIDENCIA DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR POR LA INFLUENCIA DE CLIMA,
HUMEDAD, EQUIPO Y SUPERFICIE DE BASE DE COMPACTACIÓN DURANTE SU
DESARROLLO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FERNANDO JOSÉ CARLOS REVOLORIO GONZÁLEZ
ASESORADO POR EL ING. OMAR ENRIQUE MEDRANO MÉNDEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2013

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy OlympoPaiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia 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 OlympoPaiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García
EXAMINADOR	Ing. Juan Carlos Linares Cruz
EXAMINADOR	Ing. Daniel Alfredo Cruz Pineda
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

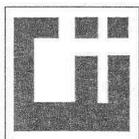
En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**INCIDENCIA DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR POR LA INFLUENCIA DE CLIMA,
HUMEDAD, EQUIPO Y SUPERFICIE DE BASE DE COMPACTACIÓN DURANTE SU
DESARROLLO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 8 de noviembre de 2012.



Fernando José Carlos Revolorio González



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



Guatemala, 22 de agosto de 2013

Ingeniero Guillermo Francisco Melini Salguero
Coordinador de Área de Materiales de Construcción y Obras Civiles
Escuela de Ingeniería Civil
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Melini Salguero.

Por medio de la presente hago constar que he asesorado el trabajo de graduación del estudiante Fernando José Carlos Revolorio González, titulado **“INCIDENCIA DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR POR LA INFLUENCIA DE CLIMA, HUMEDAD, EQUIPO Y SUPERFICIE DE BASE DE COMPACTACIÓN DURANTE SU DESARROLLO”**.

Después de haber revisado y corregido dicho trabajo de graduación, considero que el mismo cumple con los requisitos exigidos para la Escuela de Ingeniería Civil, por lo que dejo constancia de mi aprobación para su autorización.

Atentamente,




Ing. Omar Enrique Medrano Méndez
Colegiado No. 6842



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

Guatemala,
19 de septiembre 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 **INCIDENCIA DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR POR LA INFLUENCIA DE CLIMA, HUMEDAD, EQUIPO Y SUPERFICIE DE BASE DE COMPACTACIÓN DURANTE SU DESARROLLO**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil Fernando José Carlos Revolorio González, 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

Guillermo Melini

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.
Mas de 134 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 Omar Enrique Medrano Méndez y del Coordinador del Área de Materiales de Construcción y Obras Civiles, Ing. Guillermo Francisco Melini Salguero, al trabajo de graduación del estudiante Fernando José Carlos Revolorio González, titulado **INCIDENCIA DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR POR LA INFLUENCIA DE CLIMA, HUMEDAD, EQUIPO Y SUPERFICIE DE BASE DE COMPACTACIÓN DURANTE SU DESARROLLO**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



Guatemala, octubre de 2013.

/bbdeb.

Mas de 134 años de Trabajo Académico y Mejora Continua





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: **INCIDENCIA DE RESULTADOS DEL ENSAYO PROCTOR POR LA INFLUENCIA DE CLIMA, HUMEDAD, EQUIPO Y SUPERFICIE DE BASE DE COMPACTACIÓN DURANTE SU DESARROLLO**, presentado por el estudiante universitario: **Fernando José Carlos Revolorio González**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olympto Paiz Reinos
Decano



Guatemala, octubre de 2013

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por permitirme llegar a ser un profesional y las bendiciones de cada día.
Guatemala	Mi eterna motivación, para que mi esfuerzo impulse el progreso en este país.
Mis padres	Carlos Revolorio y Lucrecia González. Por su apoyo incondicional en mi carrera y en la vida.
Mis hermanas	Cintia Revolorio y Noelia Revolorio. Por ser fuente de inspiración y ejemplo de lucha.
Mis abuelos	María Panjop, José Revolorio, José González y Brígida Esquite. Por sus consejos, confianza y apoyo.
Mi madrina	Licda. María Imelda González Esquite. Por su apoyo y amor incondicional.
Mi primo	Ing. Álvaro Cruz González. Por su apoyo y por ser hermano.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Alma máter y casa de estudiantes, que me acogió para poder cumplir mis metas.
La Facultad de Ingeniería	Por otorgarme el conocimiento necesario que me permite ser un profesional competente.
Mi asesor	Ing. Omar Enrique Medrano Méndez. Por su amistad, cátedras, seguimiento y supervisión de este trabajo de graduación.
Mis amigos	Por hacer de la universidad la mejor experiencia de todas.
Laboratorio de Mecánica de Suelos	Por los consejos en el desarrollo de mi carrera y en este trabajo de graduación, y amistad sincera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SIMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN.....	XV
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Clasificación del suelo	1
1.1.1. Clasificación visual	1
1.1.2. Clasificación SUCS y AASHTO	1
1.1.3. Resumen de la clasificación del suelo a ensayar	2
2. COMPACTACIÓN DE SUELOS.....	3
2.1. Introducción	3
2.2. Definición de la compactación de suelos.....	4
2.2.1. Teorías de la compactación.....	4
2.2.2. Contenido de humedad, densidad y grado de compactación.....	7
2.2.3. Curva de compactación	9
2.2.4. Factores que influyen en la compactación.....	11
2.2.4.1. Efecto del contenido de humedad	12
2.2.4.2. Efecto de la energía de compactación	14

2.2.4.3.	Efecto del tipo de suelo a compactar	16
2.2.4.4.	Efecto del método de compactación	17
2.2.4.5.	Efecto de la preparación de la muestra	18
2.2.5.	Propiedades de los suelos compactados	18
2.2.5.1.	Permeabilidad	19
2.2.5.2.	Compresibilidad	19
2.2.5.3.	Resistencia al corte	21
2.2.6.	Comportamiento de los suelos compactados.....	23
2.3.	Métodos de compactación en el laboratorio.....	27
3.	CONTROL DE COMPACTACIÓN.....	33
3.1.	Métodos de control de compactación del ensayo Proctor Modificado.....	33
3.1.1.	Resumen del ensayo.....	33
3.1.2.	Equipo	34
3.1.3.	Preparación de la muestra	34
3.1.4.	Procedimiento del ensayo	35
3.1.5.	Cálculos.....	36
4.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	37
4.1.	Resultados obtenidos.....	37
4.2.	Análisis estadístico.....	40
4.2.1.	Resultados estadísticos.....	41
4.2.1.1.	Peso específico seco máximo (PUS) con incidencia de clima y humedad del ambiente (% Ham).....	42

4.2.1.2.	Peso específico seco máximo (PUS) con incidencia del equipo utilizado	43
4.2.1.3.	Peso específico seco máximo (PUS) con incidencia de base de compactación	43
4.2.1.4.	Contenido de humedad óptima (% Ho) con incidencia de clima y humedad del ambiente (% Ham)	44
4.2.1.5.	Contenido de humedad óptima (% Ho) con incidencia de equipo utilizado	45
4.2.1.6.	Contenido de humedad óptima (% Ho) con incidencia de base de compactación	45
4.2.2.	Resumen de resultados estadísticos	46
4.3.	Comparación de resultados obtenidos	47
4.3.1.	Peso específico seco máximo (PUS).....	47
4.3.2.	Porcentaje de humedad óptima (% Ho)	48
CONCLUSIONES		49
RECOMENDACIONES.....		51
BIBLIOGRAFÍA.....		53
ANEXOS		55

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Fases de la curva de compactación según Hogentogler.....	5
2.	Menisco formado entre granos de suelo	7
3.	Curva de compactación.....	10
4.	Curva de compactación y curvas de saturación	12
5.	Contenido de humedad vs grado de saturación	13
6.	Curvas de compactación Proctor Estándar y Modificado	15
7.	Curvas de compactación para cinco suelos diferentes	16
8.	Relación entre esfuerzo normal y corte sobre el plano de la falla	21
9.	Relación de la resistencia a compresión sin confinar ni drenar.....	22
10.	Estructura de los suelos finos	23
11.	Resistencia a la compresión simple	24
12.	Resistencia a corte del suelo	25
13.	Asentamiento del suelo	26
14.	Vista en planta del molde utilizado en el ensayo Proctor Estándar y Modificado (ASTM D 698-00)	27
15.	Dimensiones en milímetros del molde utilizado para el ensayo Proctor Estándar y Modificado (ASTM D 698-00)	28
16.	Martillo usado para el ensayo Proctor	29
17.	Medición del diámetro del pisón	38
18.	Medición de altura de compactación	39
19.	Medición de peso del martillo	39
20.	Ensayo de dureza en la base de compactación	40

TABLAS

I.	Compresión de un limo a varios contenidos de humedad y cargas	20
II.	Especificaciones del ensayo Proctor Estándar (ASTM D 698-00)	31
III.	Especificaciones del ensayo Proctor Modificado (ASTM D1557-91) ...	32
IV.	Resultado de PUS y %Ho con incidencia de temperatura (T) y porcentaje de humedad en el ambiente (% Ham).....	37
V.	Resultado de PUS y %Ho con incidencia del equipo utilizado.....	38
VI.	Resultado de PUS y %Ho con incidencia de base de compactación...	40
VII.	Resumen de resultados estadísticos para PUS.....	46
VIII.	Resumen de resultados estadísticos para %Ho	47

LISTA DE SIMBOLOS

Símbolo	Significado
h	Altura de caída del pisón
w	Contenido de humedad
$\gamma_{d\text{campo}}$	Densidad seca en campo
$\gamma_{d\text{MAXlab}}$	Densidad seca máxima obtenida en laboratorio
E	Energía de compactación
Gs	Gravedad específica
KN	Kilonewton
lbf	Libras fuerza
m	Metro
W	Peso
Ws	Peso de sólidos

Ww

Peso del agua

Y

Peso específico o densidad

ft

Pies

V

Volumen

GLOSARIO

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials, por sus siglas en inglés.
Adherencia	Resistencia que oponen las partículas al deslizamiento entre si.
Asentamiento	Reacomodamiento de la estructura granular del suelo debido a las fuerzas aplicadas sobre él.
ASTM	American Society for Testing and Materials, por sus siglas en inglés.
Densidad	Relación entre el peso de un suelo por la unidad de volumen.
Peso específico	Relación entre la unidad de peso por la unidad de volumen del suelo.
Plasticidad	Propiedad mecánica de un suelo para deformarse y mantenerse deformado por la aplicación de esfuerzos.

Saturación	Máxima cantidad de agua que el suelo puede retener contra la fuerza de la gravedad.
SUCS	Swansea University Computer Society, por sus siglas en inglés.
Suelo	Parte superficial de la corteza terrestre que resiste los esfuerzos aplicados por las estructuras.

RESUMEN

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

El ensayo Proctor puede ser de dos tipos, dependiendo de la energía aplicada para la compactación del suelo, puede ser Proctor Estándar, que usa un pistón de compactación de 5 Kg y Proctor Modificado, que usa un pistón de compactación de 10Kg. Estos dos tipos de ensayos están normados por ASTM (American Society for Testing and Materials) para el ensayo Proctor Estándar, la norma ASTM D-698 y para el Proctor Modificado, ASTM D-1557.

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

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

Es por ello que se realiza este trabajo de graduación para determinar el grado de influencia que pudieran tener estos factores, en el resultado obtenido del ensayo Proctor Modificado y proponer las condiciones óptimas para su desarrollo.

OBJETIVOS

General

Determinar y cuantificar la incidencia en los resultados del ensayo de compactación de suelos por la influencia de factores climáticos, equipo utilizado y base de compactación.

Específicos

1. Establecer las mejores condiciones para el desarrollo del ensayo Proctor Modificado en el laboratorio.
2. Determinar qué factores tienen más incidencia en la obtención de los resultados.
3. Proponer las condiciones óptimas para disminuir el efecto negativo de los factores de incidencia en el ensayo Proctor Modificado.
4. Cuantificar el factor de cada una de las incertidumbres en los resultados que producen las variables, durante el desarrollo del ensayo.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de graduación consistió en cuantificar el factor de incidencia que producen las variables de clima y humedad en el ambiente, estado del equipo a utilizar y la base de compactación durante el desarrollo del ensayo Proctor Modificado, estableciendo las mejores condiciones, en las que el ensayo de compactación debe ser desarrollado.

El primer capítulo presenta los aspectos teóricos, que se deben conocer para la forma de clasificación de un suelo, los tipos de clasificación, así como los códigos que los rigen.

En el segundo capítulo se da a conocer la teoría general de la mecánica de suelos, que contiene definiciones como: compactación de suelos, representaciones gráficas, factores de influencia, propiedades de los suelos y métodos de compactación.

El conocer todos los aspectos del material que se experimenta en el laboratorio, brinda una mejor visualización sobre el resultado esperado, su tendencia y comportamiento durante el desarrollo del ensayo.

El tercer capítulo contiene la teoría de los códigos que rigen el ensayo Proctor Modificado, la correcta utilización del equipo de compactación, forma de preparación de la muestra y los cálculos que se deben realizar; en general, indica todo el procedimiento del ensayo de compactación, Proctor Modificado.

El cuarto capítulo contiene los resultados obtenidos de los ensayos realizados, así como el análisis de estos resultados y su forma de interpretación para cada una de las variables a las que se somete el ensayo de compactación.

Con el fin de presentar un resultado confiable en los valores obtenidos del ensayo de compactación, se presenta este trabajo, que también forma parte de la documentación en el proceso de acreditación del ensayo Proctor Modificado del laboratorio de Mecánica de Suelos, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

1. GENERALIDADES

1.1. Clasificación del suelo

De la clasificación de un suelo se pueden observar sus propiedades físicas como el color, olor, consistencia, etc; también sus propiedades mecánicas, de una clasificación teórica, usando códigos de sistemas de clasificación.

1.1.1. Clasificación visual

Esta clasificación de los suelos es realizada únicamente en el campo mediante observación y manipulación manual del suelo. Este procedimiento incluye la identificación de varias características del suelo a ser clasificado como el color, la plasticidad, la humedad, etc. Los criterios y procedimientos para definir cada una de las características de los suelos se encuentran descritos a detalle en las normas ASTM D2488.

1.1.2. Clasificación SUCS y AASHTO

El sistema de clasificación de suelos SUCS, los divide en dos grandes grupos: suelos de grano grueso, tipo grava y arena con menos del 50% pasando por el tamiz No. 200 y suelos de grano fino con 50 % o más, pasando por el tamiz No. 200. Este sistema está especificado en la norma ASTM D 2487.

Por otro lado, el sistema de AASHTO clasifica a los suelos en grupos (A-1 al A-7). Los grupos A-1 abarcan los materiales granulares en los que el 35 % o menos pasan por el tamiz No.200 y los grupos A-4 hasta A-7, abarcan a los suelos de tipo limo-arcilla, parando más del 35 % por la malla No.200. Esta clasificación se basa en el tamaño de los granos y la plasticidad. El ensayo de clasificación de suelos AASHTO se detalla en la prueba M 145 de la misma norma.

1.1.3. Resumen de la clasificación del suelo a ensayar

A partir de la clasificación visual se propone un suelo tipo limo arcilloso color café oscuro, sin presencia de material orgánico.

Con base en el sistema SUCS, se clasifica el suelo como un grano fino, donde más del 50% del material pasa por el tamiz No. 200, limo (M) de baja compresibilidad.

Por el sistema de clasificación AASHTO, se tiene un suelo tipo A-4, de límite líquido máximo de 40 y con índice de plasticidad máximo de 10, un suelo limoso con característica de regular a mala para una subrasante.

2. COMPACTACIÓN DE SUELOS

2.1. Introducción

La compactación, como medio para mejorar las propiedades del suelo suelto, es conocida desde la antigüedad. Al menos así lo demuestran las edificaciones realizadas por las antiguas civilizaciones como: las ciudades prehistóricas hechas con muros de tierra, los bordos construidos en China antes de Cristo y los construidos en América, por los Mayas en el siglo XV d.C.

Tomando en cuenta que muchas de estas antiguas edificaciones perduran hasta la actualidad, se puede presumir que tales conocimientos acerca de la compactación tenían ya una base racional, aunque muy lejana a la de la actualidad.

Esta racionalización llegó en la tercera década del siglo XX, específicamente en 1933, con las experiencias de Ralph Proctor en los Estados Unidos de América. Dichas experiencias llevaron a establecer métodos para especificar y controlar la calidad de los trabajos de campo, mediante el empleo de patrones de compactación en laboratorio.

A partir de estas investigaciones, otros estudiosos de los suelos, han propuesto otras teorías y métodos acerca de la compactación.

2.2. Definición de la compactación de suelos

Existen varias definiciones para la compactación de los suelos: para Juárez Badillo (1990) la “compactación de los suelos es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos”.

Das (1963) define a la compactación como la “densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica”; mientras que Winterkoma y Ynag,(1959) afirman que la compactación es “el proceso en el cual el volumen de una masa de suelo formado por partículas sólidas, aire y agua, es reducida por la aplicación momentánea de cargas aplicadas con rodillos, golpes o vibración”.

En resumen, se puede definir a la compactación de los suelos como el proceso en el cual se mejoran las propiedades mecánicas y el funcionamiento del suelo por medio de la aplicación de una energía a través de medios mecánicos, induciéndose así a una disminución en el volumen de masa de suelo, con lo que se reducen los vacíos existentes por la presencia de aire, obteniendo como resultado final un paquete de tierra más denso y resistente.

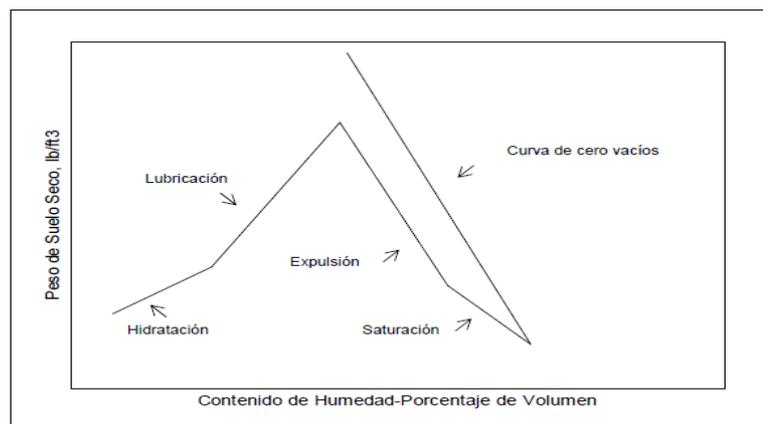
2.2.1. Teorías de la compactación

Varios han sido los estudiosos de los suelos y los efectos que tiene la compactación en ellos, así como varias son las teorías existentes que tratan de explicar lo que sucede en este proceso, en el cual la distribución de las partículas del suelo cambia, así como sus propiedades y comportamiento.

Proctor(1933), dio una explicación sobre lo que pasaba al compactar un suelo y agregarle agua; creía que la humedad en un suelo relativamente seco crea efectos de capilaridad que une a las partículas, creándose una mayor fricción que se opone a las fuerzas de compactación. Según él, al compactar un suelo con una mayor cantidad de agua, se refuerza a una mayor lubricación entre sus partículas, provocando que estas se reordenen con mayor facilidad y el suelo sea más denso.

El proceso de compactación termina, cuando el contenido de humedad del suelo combinado con el aire que no ha sido expulsado, llenan todos los vacíos. En este punto se puede decir que el suelo alcanza su mayor densidad. Con un mayor contenido de humedad, la compactación se limita a un punto en el que dichos vacíos igualan al volumen de aire y agua, aumentando los vacíos, disminuyendo la densidad e incrementando la plasticidad.

Figura 1. **Fases de la curva de compactación según Hogentogler**



Fuente: LAMBRE William; WHITMAN Robert. Mecánica de suelos. p. 247.

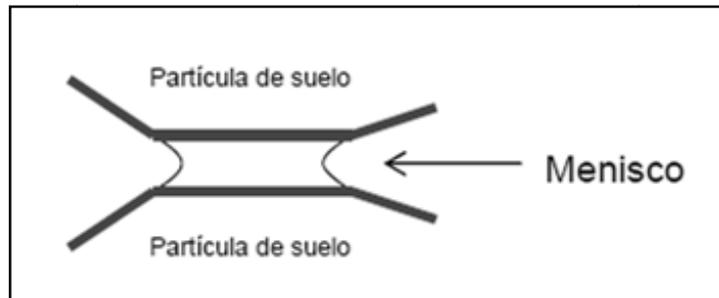
Hogentogler(1936), propuso la teoría de que “en el proceso de mojado de una muestra de suelo, al ser compactado intervienen cuatro etapas: hidratación, lubricación, expulsión y saturación”. Estas etapas se pueden ver en la figura 1. La hidratación es la etapa en la que el agua entra en las partículas de suelo y se crea una película alrededor de ellas. En la etapa de lubricación se produce el reacomodamiento de las partículas, debido a que el agua adherida a ellas como una película facilita este proceso.

Al terminar la etapa de lubricación, causada por el exceso de agua, se inicia la etapa de expulsión. En esta se expulsa el agua, debido a que la cantidad de aire retenida en el suelo no cambia desde el final de la lubricación y solamente se remueven partículas de suelo. Durante la saturación, teóricamente los vacíos de aire son ocupados completamente por el agua y se llega a obtener la curva de ceros vacíos.

Hilf(1956), usó la teoría de la presión de agua en los poros en suelos no saturados, para dar una idea sobre el proceso de compactación. Según Hilf, los suelos secos son difíciles de compactar debido a la apreciable fuerza de fricción que causa la gran curvatura de los meniscos formados por el agua que cubre los granos en la parte de contacto de los mismos.

Al compactar el suelo a un mayor contenido de agua, los meniscos entre las partículas de suelo se aplanan o destruyen, resistiendo menos al esfuerzo de compactación e incrementándose la densidad del suelo, de ahí en adelante hasta alcanzar su máximo(figura 2).

Figura 2. **Menisco formado entre granos de suelo**



Fuente: JUÁREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRÍGUEZ Alfonso. Mecánica de suelos. p. 146.

2.2.2. Contenido de humedad, densidad y grado de compactación

El contenido de humedad, densidad y grado de compactación, son los factores más importantes en la compactación de suelos. A continuación se presentan sus definiciones:

- Contenido de humedad: en una muestra de suelo, es la relación del peso del agua entre el peso de sólidos en volumen dado de suelo. Se representa con w .

$$w = W_w / W_s$$

Donde:

w = contenido de humedad en porcentaje

W_w = peso del agua

W_s = peso de sólidos

- Peso específico o densidad: el peso específico “ γ ” es el peso del suelo por volumen unitario.

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

Donde:

γ = peso específico o densidad

W= peso del suelo

V= volumen unitario

A este peso específico, dado por la ecuación anterior se lo denomina peso específico húmedo y se expresa también en términos del peso de sólidos, contenido de humedad y volumen total con la ecuación:

$$\gamma = \frac{W_s(1 + w)}{V}$$

En el estudio de la compactación de suelos, es necesario conocer el denominado peso específico seco o densidad seca γ_d , que es el peso por volumen unitario pero de suelo seco, es decir excluyéndose el agua de la misma. Si el contenido de humedad y el peso específico húmedo de una muestra de suelo son conocidos, se puede obtener el valor del peso específico seco con la ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$$

- Grado de compactación: el grado de compactación de un suelo, está dado por la siguiente ecuación:

$$GC\% = \frac{\gamma_{dcampo}}{\gamma_{dMAXlab}}$$

Donde:

γ_{dcampo} = densidad seca obtenida en campo, luego de compactar el suelo.

$\gamma_{dMAXlab}$ = densidad seca máxima obtenida en el laboratorio.

2.2.3. Curva de compactación

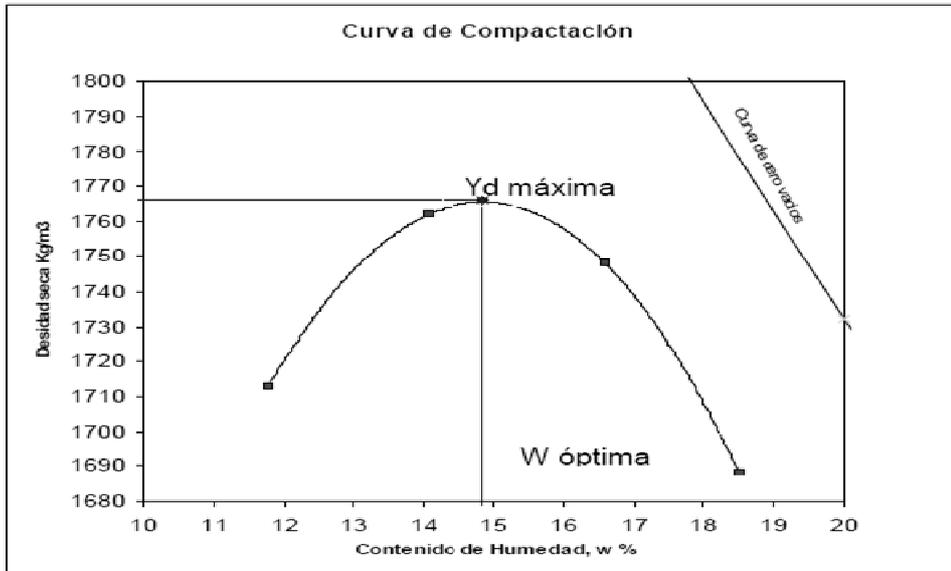
De los ensayos de compactación en el laboratorio se obtienen las curvas de compactación; las mismas que serán distintivas de cada tipo de suelo estudiado.

Estas curvas de compactación son el resultado de graficar, en el eje de las abscisas el contenido de humedad del suelo en porcentaje y, en el eje de las ordenadas, la densidad seca, obtenida en los ensayos de compactación.

En la figura 3 se muestra la curva de compactación; en esta gráfica se puede observar que mientras aumenta el contenido de humedad, aumenta también el peso específico seco, hasta un punto en que empieza a decrecer. En este punto, el peso específico seco es el máximo (γ_{dmax}) que se puede obtener en el ensayo de compactación. La abscisa correspondiente a este máximo, representa el contenido óptimo de humedad (w_{op}).

Contenidos de humedad mayores al óptimo, arrojan valores menores de peso específico seco.

Figura 3. Curva de compactación



Fuente: LAMBRE William; WHITMAN Robert. Mecánica de suelos. p. 263.

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

En la figura 3 se muestra también la curva de cero vacíos. En teoría el peso específico seco máximo se obtiene cuando el suelo no tiene vacíos.

Teóricamente las curvas de compactación obtenidas de los ensayos, en el punto de peso específico seco máximo y humedad óptima, deberían alcanzar la curva de cero vacíos correspondiente a la gravedad específica G_s del suelo ensayado y seguir esta curva, para humedades mayores.

Sin embargo, esto no ocurre en la realidad debido a que no es posible expulsar todo el aire contenido en el suelo.

Para determinar la curva de cero vacíos se debe proceder de la siguiente manera:

- Determinar la densidad del suelo o gravedad específica de sólidos G_s .
- Determinar el peso específico del agua γ_w .
- Suponer varios valores de porcentaje de humedad w .
- Calcular el peso específico con cero vacíos γ_d para los diferentes valores de humedad, con la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{G_s * \gamma_w}{1 + \frac{w * G_s}{S}}$$

Para la curva de cero vacíos ($S = 100 \%$) para una determinada densidad de sólidos, el grado de saturación S , en porcentaje, que se debe reemplazar en la ecuación anterior, es uno. Para calcular otras curvas de saturación, S cambia, por ejemplo para calcular la curva de vacíos $S = 80 \%$; se utilizará un valor 0,80 en la ecuación y así para todas las curvas de saturación.

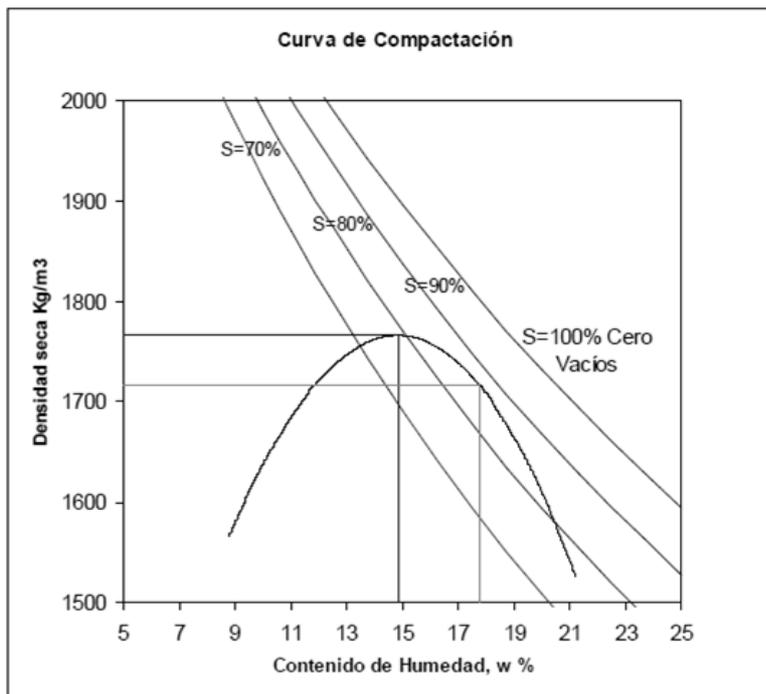
2.2.4. Factores que influyen en la compactación

De todos los factores que influyen e intervienen en la compactación de los suelos, los más importantes son el contenido de humedad y la energía de compactación aplicada en los ensayos. Hay también otros factores distintos; a continuación se describe cómo afectan estos en la compactación del suelo.

2.2.4.1. Efecto del contenido de humedad

El contenido de humedad influye directamente en el peso específico seco, obtenido en el proceso de compactación. Como se puede ver en la figura 4, mientras que el contenido de humedad aumenta, mayor es el peso específico seco obtenido, hasta llegar al pico de la curva, que es donde el contenido de humedad óptimo proporciona el máximo valor de peso específico del ensayo. Después de este contenido de humedad óptimo, los pesos específicos disminuyen.

Figura 4. Curva de compactación y curvas de saturación

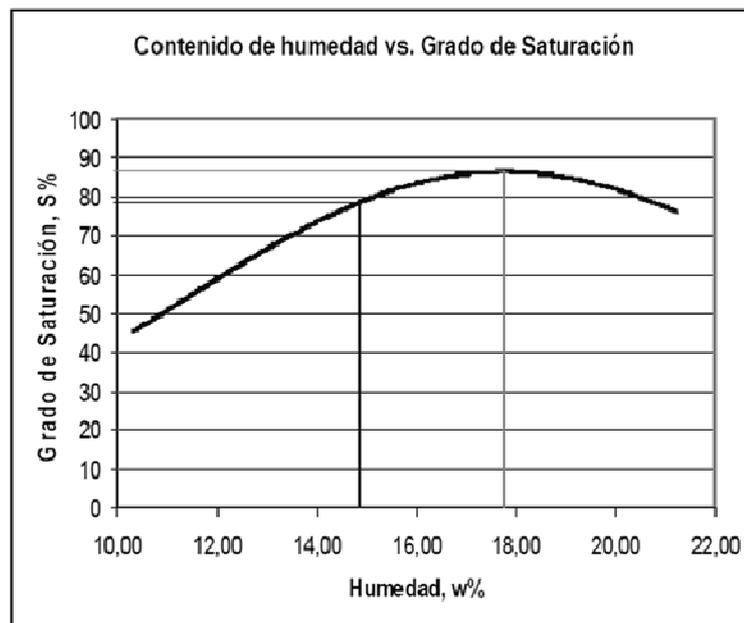


Fuente: LAMBRE William; WHITMAN Robert. Mecánica de suelos. p. 269.

En la figura 4 se puede ver que el grado de saturación aumenta con el aumento de la humedad. En esta gráfica, para la densidad de sólidos del suelo, y al ser este compactado, alcanza un grado de saturación del 80 % en el punto de peso específico seco máximo y humedad óptima (línea horizontal superior). A partir de este punto, el grado de saturación sigue en aumento con la adición de agua, hasta que llega a su mayor grado de saturación aproximadamente del 90 % (línea horizontal inferior). A partir de este punto, el grado de saturación decrece, permaneciendo más o menos constante.

La figura 5 muestra también lo explicado en el párrafo anterior; puede verse en la línea horizontal inferior la humedad óptima y en la línea horizontal superior la humedad de máxima saturación.

Figura 5. **Contenido de humedad vs grado de saturación**



Fuente: JUÁREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRÍGUEZ Alfonso. Mecánica de suelos. p. 115.

El contenido de agua, además afecta a la estructura del suelo que está siendo compactado. Cuando hay poco agua en el suelo, este ejerce una fuerza de resistencia al esfuerzo de compactación, debido a la alta concentración de iones en el agua, a los esfuerzos efectivos producidos por la tensión capilar y a la poca repulsión entre las partículas.

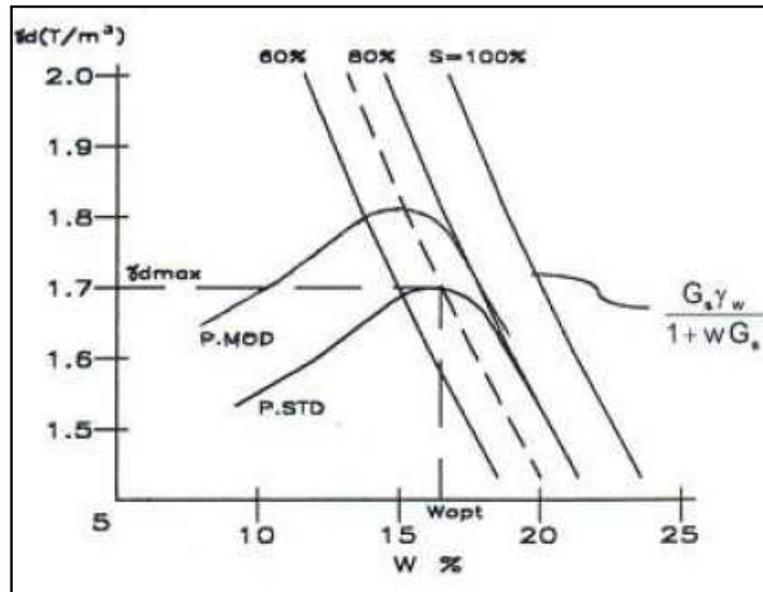
Cuando aumenta el contenido de agua, estas condiciones cambian; la resistencia a la deformación disminuye, provocando que las partículas del suelo tomen un mayor grado de orientación.

2.2.4.2. Efecto de la energía de compactación

La energía con que se compacta el suelo afecta considerablemente a los pesos específicos secos obtenidos en los ensayos. Como se puede observar en la figura 6, si se compacta el suelo con una energía de compactación baja, se obtienen pesos específicos más bajos. Por el contrario, si la energía de compactación es alta, las curvas de compactación se recorren hacia arriba y a la izquierda, siguiendo la parte descendente de las mismas más o menos paralelas a la curva de cero vacíos, obteniéndose así pesos específicos secos máximos mayores. En esta figura se puede apreciar también que cuando aumenta la energía de compactación, disminuye el contenido de humedad óptimo.

Cabe mencionar que para valores mayores al contenido óptimo de humedad, la energía de compactación solamente deforma angularmente al suelo y no disminuye su volumen. Esto se debe a que un suelo que contiene más agua, es más deformable pero menos compresible por su bajo contenido de aire.

Figura 6. Curvas de compactación Proctor Estándar y Modificado



Fuente: BOWLES, Joseph. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil. p. 108.

La energía de compactación aplicada afecta a la estructura de los suelos, ya que por sus medios se logra reducir el volumen y ocasionar deformaciones angulares. A mayor energía de compactación, acompañada también por un aumento del contenido de humedad, mayor es la remoción de vacíos de aire (disminución de volumen) y mayores son también, las deformaciones angulares. Esto se logra exceptuando valores de contenido de agua superiores al óptimo.

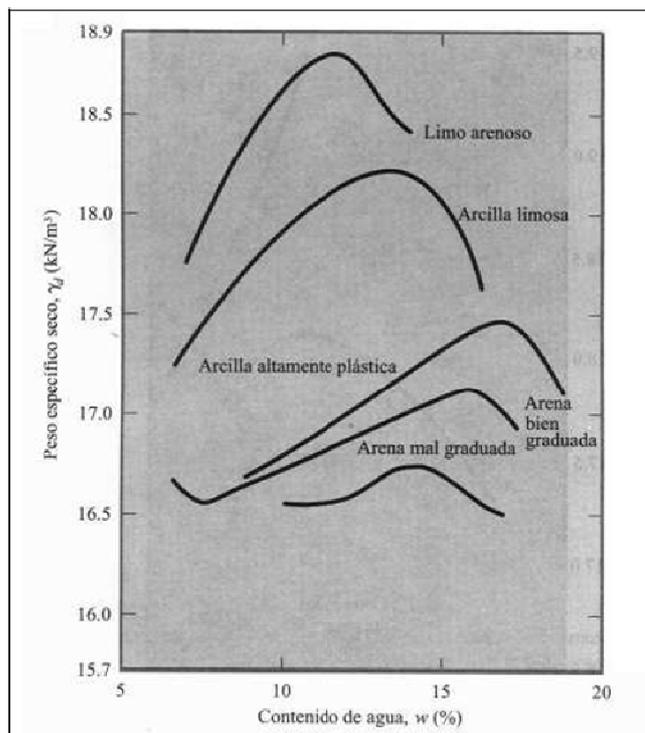
Acerca de los efectos que tiene la fuerza de compactación sobre la saturación de las muestras compactadas, se puede decir que mientras mayor sea la energía, más eficaz será la remoción de vacíos, permitiendo que el agua ocupe estos espacios, llegando a un grado mayor de saturación. Este aumento de energía logra este aumento en la saturación del suelo solamente en valores de humedad menores o iguales al óptimo, después es ineficiente.

2.2.4.3. Efecto del tipo de suelo a compactar

El tipo de suelo, su granulometría, la forma de sus partículas, la densidad de sólidos y la cantidad y tipo de finos presentes, influyen en el peso específico seco y humedad óptima del suelo al ser compactado.

En la figura 7 se muestran las curvas de compactación de cinco diferentes tipos de suelos. Se puede ver que los suelos finos como el limo arenoso y la arcilla limosa, tienen mayores pesos específicos secos que las arenas.

Figura 7. Curvas de compactación para cinco suelos diferentes



Fuente: JUÁREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRÍGUEZ Alfonso. Mecánica de suelos. p.159.

Aquí se puede mencionar dentro del tipo de suelo, el efecto que tiene la fracción gruesa de un material sobre la densidad seca. El incremento del porcentaje de material grueso en una mezcla de arcilla, arena y grava bien graduada, por ejemplo, aumenta el peso específico seco hasta cierto punto y después decrece.

El incremento en la densidad seca se da, mientras que la fracción fina del suelo constituya una matriz para las partículas gruesas y estas no entren en contacto y formen cadenas continuas, ocurriendo lo contrario cuando estas cadenas continuas de material grueso se forman.

2.2.4.4. Efecto del método de compactación

La diferencia entre un método de compactación y otro se puede decir que radica en la magnitud de las deformaciones angulares que cada uno de ellos provoque.

La compactación por amasado es la aplicación de una presión dada, un cierto número de veces y simula la estructura obtenida en suelos finos con compactadores de pata de cabra.

En la compactación estática se aplica una presión hasta obtener una densidad especificada, produce una compactación o compresión unidimensional y crea en suelos finos una estructura con partículas orientadas (estructura dispersa).

2.2.4.5. Efecto de la preparación de las muestras

Al momento de preparar una muestra para llevar a cabo un ensayo de compactación, el procedimiento utilizado influye en los resultados. Se puede partir de un suelo relativamente seco e ir agregando la cantidad necesaria de agua para obtener las muestras necesarias para el ensayo, o se puede proceder al revés, partiendo de un suelo húmedo que se va secando.

Utilizando el primer método, se obtienen pesos específicos secos más elevados. Esto se debe a que cuando se agrega agua, se crea un exceso que hace que la tensión capilar entre los grumos sea menor que la de los grumos de un suelo en el que se ha hecho evaporar el agua. Por lo mismo, la energía de compactación es más eficiente en el primer caso. Para disminuir esta diferencia de resultados entre los dos procedimientos, para el caso de empezar con una muestra seca, se debe dejar pasar algún tiempo después de agregada el agua, para que el suelo iguale en condiciones de tensión capilar al suelo húmedo.

Por otro lado, el uso repetido de las muestras no es conveniente, debido a que estas dejarían de ser representativas de las condiciones de los suelos compactados en el campo, ya que estos no son recompactados.

2.2.5. Propiedades de los suelos compactados

El suelo, al ser compactado, cambia y mejora en sus propiedades físicas y mecánicas, lo que es deseable puesto que la tierra suelta o los suelos sin compactar no son adecuados para soportar cargas y resistir otras condiciones requeridas por la obra. A continuación se explican algunas de ellas.

2.2.5.1. Permeabilidad

La propiedad de un suelo al no presentar resistencia al paso de agua se llama permeabilidad. La permeabilidad se representa con la letra k , que es un coeficiente que se obtiene experimentalmente. Mientras los valores de k son menores, mayor es la impermeabilidad del suelo. La permeabilidad depende de la relación de vacíos, la estructura del suelo y el grado de saturación S .

Cuando disminuye la relación de vacíos disminuye también la permeabilidad de un suelo, debido a que con la eliminación de vacíos se cierran los canales por donde pasa el agua. Sin embargo, la permeabilidad aumenta mientras aumenta el grado de saturación del suelo; esto a cualquier contenido de humedad.

El factor que más afecta la permeabilidad de un suelo es la estructura que este ha adquirido, después de haber sido sometido al proceso de compactación. Por lo tanto, las condiciones bajo las cuales ha sido compactado el suelo influyen en la permeabilidad. Cuanto mayor es la orientación que han adquiridos las partículas, debido a contenidos de humedad y la alta distorsión lograda por el método de compactación, menor es la permeabilidad del suelo.

2.2.5.2. Compresibilidad

La compresibilidad del suelo es la relación que existe entre la carga de compresión aplicada al mismo y la deformación o cambio de volumen. La deformación por acción de una carga depende de la magnitud de esta, de la relación de vacíos y el contenido de humedad. La compresión o consolidación de un suelo puede continuar por varios años, bajo la acción de una carga constante aplicada, como por ejemplo lo que sucede en un relleno pesado.

El contenido de humedad parece tener un efecto remarcado en la compresibilidad de un suelo que ha sido compactado. En la tabla I aparecen los resultados de cambio de volumen, obtenidos a partir de ensayos de consolidación unidimensional, realizados a diferentes cargas y contenidos de humedad. En esta tabla se puede observar que mientras menor es el contenido de humedad en las muestras ensayadas, el cambio de volumen en porcentaje es menor que el cambio que se produce a mayores contenidos de agua.

Tabla I. **Compresión de un limo a varios contenidos de humedad y cargas**

Cambio de volumen en porcentaje bajo diferentes cargas (psi)								
Humedad	γ_d	w	S%	37.5psi	75psi	150psi	300psi	300psi Sat
4% seco	105.5	13.0	59.6	1.2	1.7	2.6	5.5	8.0
2% seco	108.3	15.2	74.8	1.4	2.1	3.4	5.6	5.6
w óptimo	109.7	17.4	88.4	3.6	4.5	5.9	7.9	7.9
2% húmedo	107.4	19.4	93.4	3.8	5.0	6.5	8.5	8.6

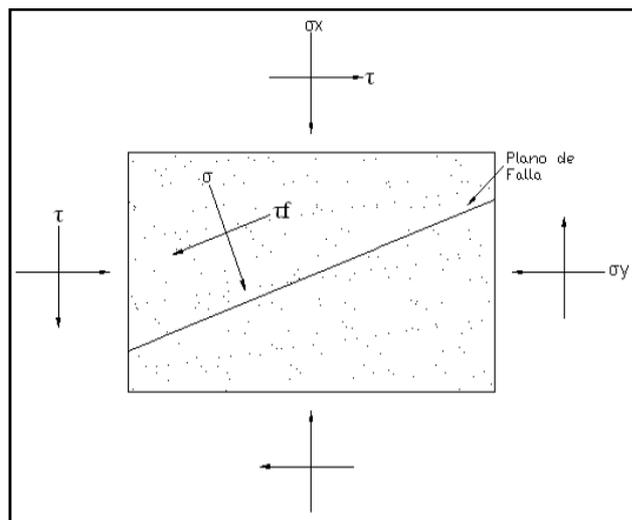
Fuente: JUÁREZ BADILLO, Eulalio;RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de suelos. p. 165.

De esta tabla se puede ver que, cuando un suelo es compactado con humedades bajas y lejanas a la óptima, al momento de saturarlo y aplicarle una carga, este colapsa y se crean grandes cambios de volumen y la compresibilidad aumenta, como en el estado de carga 300 saturado de la tabla I.

2.2.5.3. Resistencia al corte

La resistencia al corte de una masa de suelo, es la resistencia interna por área unitaria que ofrece esta para resistir la falla y el desplazamiento a lo largo de cualquier plano de ella. Por lo general, la resistencia de un suelo aumenta al ser compactado. Mohr (1900), presentó su teoría sobre la ruptura de los materiales, en la cual sostenía que un suelo falla debido a una combinación crítica de esfuerzo normal y esfuerzo cortante.

Figura 8. **Relación entre el esfuerzo normal y cortante sobre el plano de la falla**

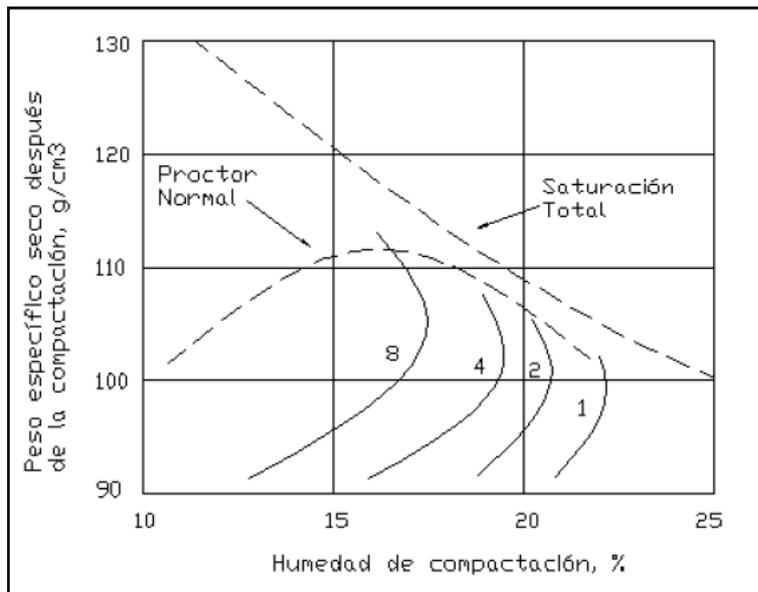


Fuente: JUÁREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de suelos. p. 166.

En la figura 8, τ_f representa el esfuerzo cortante en el plano de falla y σ_f es el esfuerzo normal en el plano de falla, los mismos que se combinan para producir la falla por corte en una muestra de suelo.

La resistencia al corte de un suelo, depende de la densidad y el contenido de humedad al momento del corte. La figura 9 muestra la resistencia a esfuerzo constante sin drenaje de un suelo cohesivo compactado. Se puede apreciar que la resistencia al corte (líneas continuas en kilogramos sobre centímetros cuadrados), para un peso específico constante disminuye cuando aumenta la humedad.

Figura 9. **Relación de la resistencia a compresión sin confinar ni drenar**



Fuente: SOWERS, George B;George F. Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones.
p. 270.

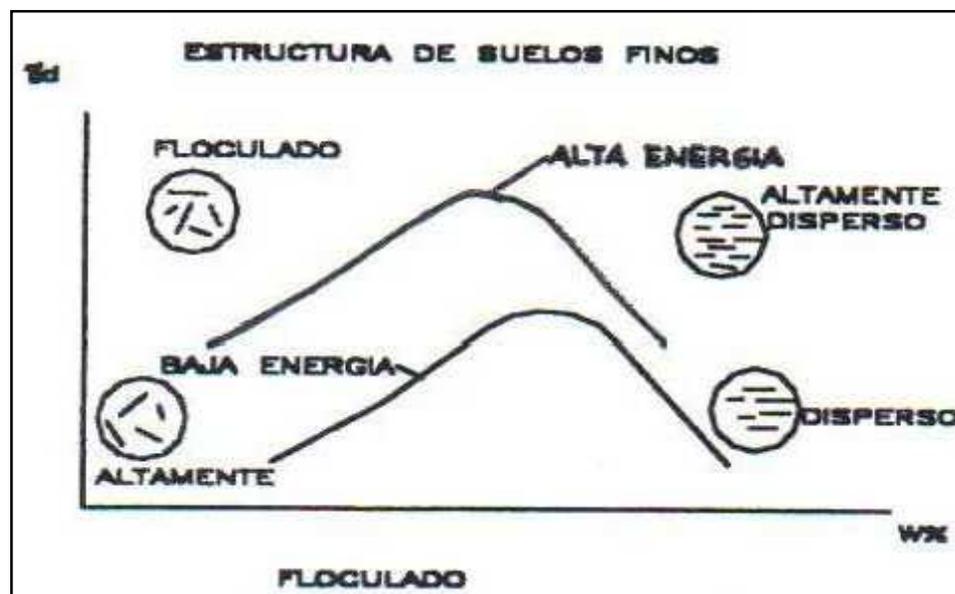
Para una humedad constante, la resistencia al corte aumenta con el incremento de peso específico, exceptuando cuando se acerca a la curva de cero vacíos, cuando esta decrece.

La resistencia de un suelo tiene que ver también con la presión de agua en los poros al momento del corte. Mientras menor sea el contenido de humedad, mayor es la presión del agua en los poros (presión capilar), dando esto mayor resistencia al suelo. Con el incremento de agua, esta presión disminuye, bajando la resistencia.

2.2.6. Comportamiento de los suelos compactados

El comportamiento de los suelos compactados se puede resumir en las siguientes figuras:

Figura 10. Estructura de los suelos finos

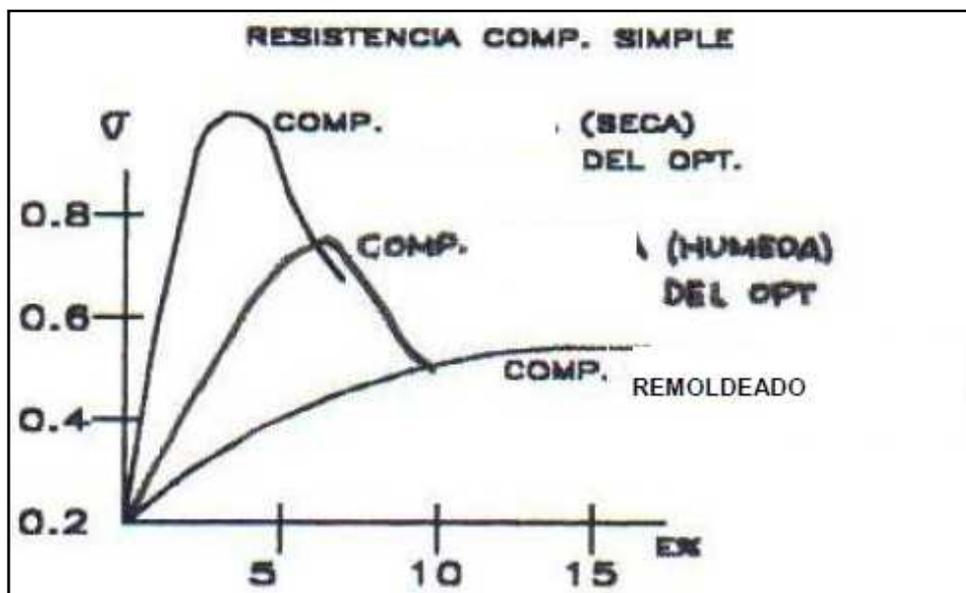


Fuente: BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. p. 114.

En la figura 10 se puede ver que la estructura de los suelos finos, al ser compactados con una energía baja, pasa de ser una estructura altamente floculada a una estructura dispersa y más densa. Si se compacta el suelo con una energía mayor, se pasa de tener un suelo floculado a un suelo con estructura altamente disperso, con mayores densidades secas. Por lo tanto mientras mayor sea la energía de compactación, mayor será la orientación de las partículas.

El aumento del contenido de agua junto con la aplicación de una energía de compactación, ayuda a que el suelo pase de una conformación poco densa, a una estructura dispersa más densa.

Figura 11. Resistencia a la compresión simple

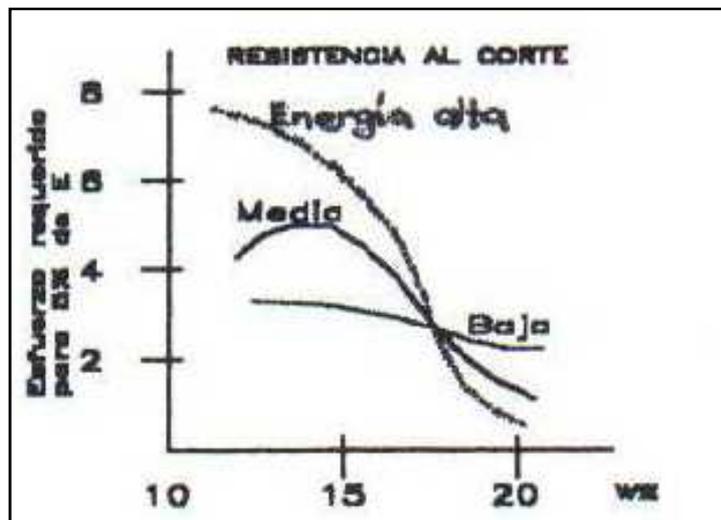


Fuente: BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. p. 118.

La resistencia máxima a la compresión simple, q_u (figura 11) de un suelo que ha sido compactado en la rama seca del óptimo, es mayor que la que alcanza un suelo que ha sido compactado en el lado húmedo del óptimo. Estas dos curvas son proporcionales y trazan una línea recta hasta antes de llegar a su punto de falla, lo que dice que mientras mayores son los esfuerzos aplicados, mayores son las deformaciones.

Cuando algunos suelos son remodelados, sin aumentar en contenido de humedad, la resistencia a la compresión simple se reduce considerablemente. Esto se observa en la curva más aplanada de la figura; se producen mayores deformaciones con menos resistencia.

Figura 12. Resistencia a corte del suelo



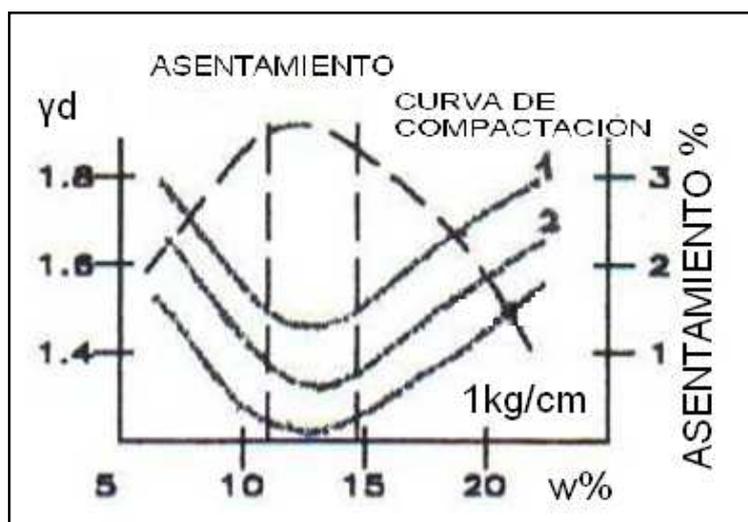
Fuente: BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. p. 193.

De esta gráfica (figura 12), cuando aumenta el agua, disminuye la resistencia. Para una energía de compactación alta, el esfuerzo necesario para deformar al suelo es mayor que para una energía de compactación baja, cuya curva no parece ser tan sensible al aumento de humedad; sin embargo, su resistencia al corte disminuye con su aumento.

Para una energía de compactación media, la resistencia al corte aumenta primero con la adición de agua, alcanzando un máximo, bajando bruscamente después de este punto.

En la figura 13, se muestra que los asentamientos de un suelo compactado son menores cuando la humedad se encuentra en el rango óptimo, y son mayores cuando la humedad está por debajo y por encima de la humedad óptima.

Figura 13. **Asentamiento del suelo**



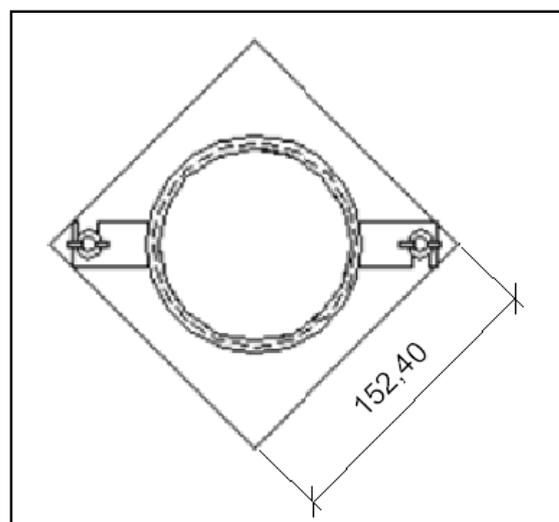
Fuente: BOWLES, Joseph E. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. p. 191.

2.3. Métodos de compactación en el laboratorio

El primer método de esta naturaleza fue establecido por Ralph Proctor. Este método es conocido como el ensayo Proctor Estándar. El mismo que fue modificado posteriormente, para recrear con más fidelidad las condiciones de compactación del campo, dando lugar al ensayo Proctor Modificado. Estos son los ensayos de compactación de laboratorio más utilizados, para obtener los pesos específicos secos máximos y contenidos de humedad óptimos del suelo.

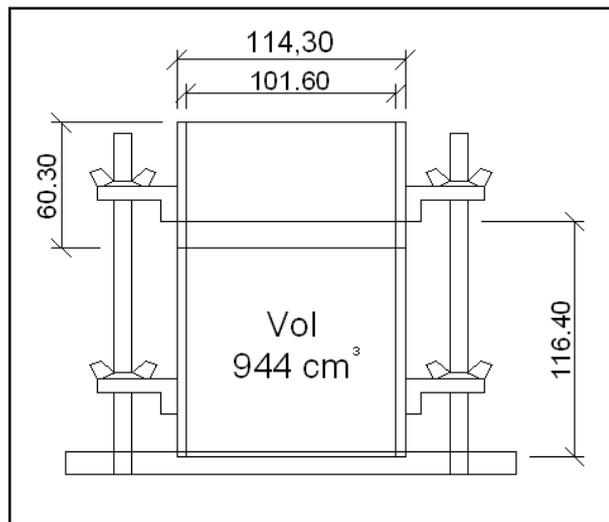
El ensayo Proctor Estándar, es realizado en un molde cuyas dimensiones en milímetros se muestran en la figuras 14 y 15.

Figura 14. **Vista en planta del molde utilizado en el ensayo Proctor Estándar y Modificado (ASTM D 698-00)**



Fuente: elaboración propia.

Figura 15. Dimensiones en milímetros del molde utilizado para el ensayo Proctor Estándar y Modificado (ASTM D 698-00)

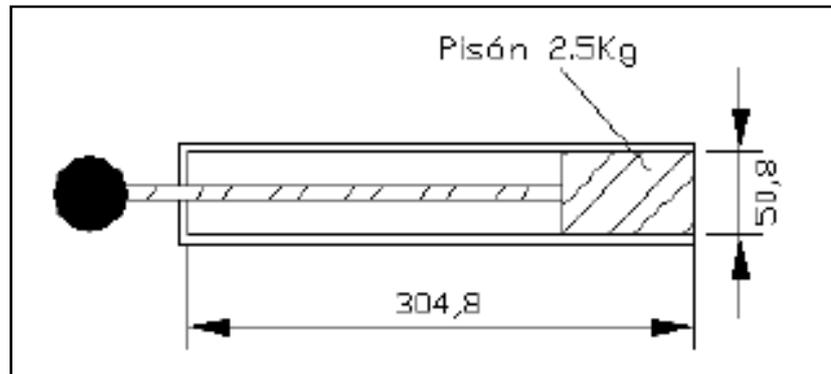


Fuente: elaboración propia.

Este molde tiene diámetro interno de 101,6 milímetros (4 pulgadas), unido a una base cuadrada de 152,4 milímetros por lado, un volumen de 944 centímetros cúbicos y una altura de 116,4 milímetros. Además, consta de una extensión acoplable al molde de por lo menos 50,8 milímetros de alto. El suelo se compacta mediante golpes, usando tres capas de material, cada una golpeada 25 veces, dejando caer el martillo (figura 16) desde una altura de 304,8 milímetros sobre la muestra contenida en el molde. El diámetro del pisón es de 50,8 milímetros y pesa 2,5 kilogramos o 24,4 Newtons (ASTM D698-00).

Se deben preparar cuatro o cinco muestras con diferentes contenidos de humedad para ser compactados y así obtener los puntos de la curva de densidad seca y humedad contenida.

Figura 16. **Martillo usado para el ensayo Proctor**



Fuente: elaboración propia.

La energía de compactación aplicada en este ensayo es de 12400 pies por libras sobre pies al cuboo 600 kilonewtons por metro sobre metro al cuboy está dada por la siguiente ecuación:

$$E = \frac{NnWh}{V}$$

Donde:

E = energía de compactación específica

N = número de golpes por capa

n = número de capas

W = peso del martillo

h = altura de caída del pisón

V = volumen de suelo compactado

Debido a que el ensayo Proctor Estándar y su energía de compactación dejaron de reproducir las condiciones de compactación de campo, se le modificó para alcanzar los niveles de compactación mayores, obtenidos con el avance de la maquinaria.

El ensayo Proctor Modificado utiliza el mismo molde que el ensayo Proctor Estándar (figuras 14 y 15), pero difiere en el número de capas a ser compactadas que ahora es de 5, la altura de caída del martillo es de 457,2 milímetros, diámetro del área de contacto de 50,80 milímetros y un peso de 4,54 kilogramos o 44,5 newtons (ASTM D1557-91).

Al cambiar estas condiciones, el ensayo aplica una mayor energía de compactación al suelo, como se puede comprobar usando la ecuación de energía nuevamente:

$$E = \frac{25 * 5 * 44,5N * 0,4572m}{944E - 06m^3} = 2\ 694\ kN \cdot \frac{m}{m^3} \text{ ó } 5\ 6000\ ft. \ lbf/ft^3$$

Para estos dos ensayos, existe un molde alternativo que difiere al de las figuras 14 y 15, en que tiene una base cuadrada de 203,3 milímetros por lado y el radio interno del molde cilíndrico de 152,24 milímetros (6 pulgadas) y uno externo de 156,1 milímetros y un volumen de 2124 centímetros cúbicos (ASTM D698-00). Sin embargo, para alcanzar la misma energía de compactación específica, en los dos ensayos (Proctor Estándar y Modificado), es necesario elevar el número de golpes a 56, manteniendo los demás parámetros constantes para cada ensayo respectivamente.

Los ensayos Proctor Estándar y Modificado, tienen tres procedimientos a seguir, dependiendo del material retenido en diferentes tamices.

El procedimiento A, utiliza el material que pasa por el tamiz No.4, y el procedimiento B, el material que pasa por el tamiz de tres cuartos de pulgada. En los procedimientos A y B, el molde a usar es el de 101,6milímetros (4 pulgadas) mostrado en las figuras 14 y 15; mientras que el procedimiento C utiliza el molde de 152,24milímetros (6 pulgadas) ASTM D698-00.

Un resumen de los ensayos de compactación expuestos en este punto, con sus criterios y procedimientos respectivos, se presenta en las tablas II y III.

Tabla II. **Especificaciones del ensayo Proctor Estándar (ASTM D698-00)**

Ensayo Proctor Estándar ASTM D698-00			
Concepto	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C
Molde	101,60 mm (4 in)	101,60 mm (4 in)	152,40 mm (6 in)
Volumen del molde	944 cm ³ (1/30 ft ³)	944 cm ³ (1/30 ft ³)	2124 cm ³ (0,075 ft ³)
Peso del martillo	2,50 kg (5,50 lb)	2,50 kg (5,50 lb)	2,50 kg (5,50 lb)
Altura de caída del martillo	304,80 mm (12 in)	304,80 mm (12 in)	304,80 mm (12 in)
Número de golpes	25	25	56
Número de capas	3	3	3
Energía de compactación	591 kNm/m ³ (12400 ft-lbf/ft ³)	591 kNm/m ³ (12400 ft-lbf/ft ³)	591 kNm/m ³ (12400 ft-lbf/ft ³)
Material a ser usado	Porción que pasa por el tamiz No.4, se usa si el 20% o menos por peso es retenido en el tamiz No.4.	Porción que pasa por el tamiz 3/8, se usa si el suelo retenido en el tamiz No.4 es más del 20% y 20% o menos por peso es retenido en el tamiz 3/8.	Porción que pasa por el tamiz 3/4, se usa si más de 20% por peso del material es retenido en el tamiz 3/8, y menos del 30% por peso es retenido en el tamiz 3/4.

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. Especificaciones del ensayo Proctor Modificado (ASTM D1557-91)

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557-91			
Concepto	Procedimiento A	Procedimiento B	Procedimiento C
Molde	101,60 mm (4 in)	101,60 mm (4 in)	152,40 mm (6 in)
Volumen del molde	944 cm ³ (1/30 ft ³)	944 cm ³ (1/30 ft ³)	2124 cm ³ (0,075 ft ³)
Peso del martillo	4,54 kg (10 lb)	2,50 kg (5,50 lb)	2,50 kg (5,50 lb)
Altura de caída del martillo	457,20 mm (18 in)	457,20 mm (18 in)	457,20 mm (18 in)
Número de golpes	25	25	56
Número de capas	5	5	5
Energía de compactación	2700 kNm/m ³ (56000 ft-lbf/ft ³)	2700 kNm/m ³ (56000 ft-lbf/ft ³)	2700 kNm/m ³ (56000 ft-lbf/ft ³)
Material a ser usado	Porción que pasa por el tamiz No.4, se usa si 20% o menos por peso es retenido en el tamiz No.4	Porción que pasa por el tamiz 3/8, se usa si el suelo retenido en el tamiz No.4 es más del 20% y 20% o menos por peso es retenido en el tamiz 3/8	Porción que pasa por el tamiz 3/4, se usa si más de 20% por peso del material es retenido en el tamiz 3/8, y menos del 30% por peso es retenido en el tamiz 3/4

Fuente: elaboración propia.

3. CONTROL DE COMPACTACIÓN

El control de compactación de una muestra de suelo en general, tiene como objetivo verificar que las especificaciones dadas para la misma se cumplan. En otras palabras, es el control de calidad del producto final; en este caso el suelo compactado. Este control de compactación se hace examinando los resultados obtenidos después de la compactación, midiendo las propiedades físicas y mecánicas del suelo; y controlando el material y la manera en que es tratado previo a ser compactado.

3.1. Métodos de control de compactación del ensayo Proctor Modificado

A continuación se presentan los métodos de control de compactación: equipo, procedimientos y cálculos para el ensayo Proctor Modificado. Ensayo que proporciona más energía, en la compactación de suelos en comparación con el ensayo Proctor Estándar, el cual no presenta los resultados que se obtienen en una compactación de campo, los valores del Proctor Modificado son utilizados para el mejoramiento del terreno, aumento en la resistencia al corte y para disminuir asentamientos.

3.1.1. Resumen del ensayo

Una muestra representativa de suelo, con cierto contenido de humedad es colocada en un molde, cada capa (5 capas en total) se compacta mediante 25 golpes, usando un martillo que cae desde una altura determinada.

Esta operación se repite con 4 o 5 muestras, con diferentes contenidos de humedad (bajo y sobre el óptimo), para poder determinar la curva de compactación de la muestra (γ_d vs w).

3.1.2. Equipo

El equipo a utilizar en la práctica del ensayo se compone de:

- 1 molde de $4 \pm 0,016$ pulgadas ($101,6 \pm 0,406$ milímetros) (figuras 14 y 15) con su respectiva extensión
- 1 martillo de 10 libras (4,54 kilogramos)
- 1 balanza de 410 gramos
- 1 balanza de 20 kilogramos
- 1 horno con regulador (110 ± 5 grados centígrados)
- Tamices $\frac{3}{4}$ in, $\frac{3}{8}$ in y No. 4
- Otros: brocha, cuchara, recipientes, bandejas y espátulas

3.1.3. Preparación de la muestra

Se deben preparar las muestras a ensayar de la siguiente manera:

- Obtener aproximadamente 15 kilogramos de material para el ensayo.
- Pasar el suelo por el tamiz correspondiente al método escogido (A: No.4, B: $\frac{3}{8}$ de pulgada C: $\frac{3}{4}$ de pulgada).
- Separar de cuatro a cinco muestras de 3000 gramos cada una.

- Preparar la primera muestra con contenido de humedad cercano al óptimo, agregando agua al tanteo.
- A continuación se deben preparar al menos, dos muestras con contenido de humedad mayor al óptimo y dos muestras con contenido de humedad menor al óptimo.

3.1.4. Procedimiento del ensayo

Una vez preparadas las muestras, haber determinado el volumen del molde y las condiciones que este trabajo pretende evaluar durante el ensayo (clima y humedad en el ambiente; estas dos obtenidas con base en la consulta electrónica de los boletines del INSIVUMEH, base de compactación o estado del equipo a utilizar), el ensayo continúa con los siguientes pasos:

- Pesar el molde a utilizar con su base pero sin la extensión;
- Asegurar la extensión o collar al molde;
- Colocar la primera muestra a compactar en el molde, en una porción, aproximadamente a la quinta parte de la altura del molde;
- Con el martillo acomodar suavemente el suelo dentro del molde, antes de compactar para que este no quede suelto;
- Compactar el suelo dando 25 golpes, manteniendo firmemente el martillo y dejando caer libremente el pisón, moviéndolo en círculos sobre la superficie de la muestra;
- Se repite este procedimiento para las cinco capas;
- Una vez compactadas las cinco capas, retirar la extensión;
- Cortar el suelo compactado que sobresalga del molde;
- Pesar el molde con base y suelo;

- Remover el suelo del molde y separar dos muestras representativas para determinar el contenido de humedad.

3.1.5. Cálculos

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

- Obtener la masa del suelo compactado restando la masa del molde + base, al de la masa del molde + base + suelo compactado.
- Dividir esta masa entre el volumen del molde para obtener la densidad húmeda del suelo (γ). Repetir estos dos puntos para cada muestra compactada.
- Una vez que los contenidos de humedad hayan sido determinados para cada muestra compactada, calcular la densidad seca correspondiente (γ_d) con la siguiente ecuación:

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$$

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

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se muestran en forma resumida los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio y su respectivo análisis, para determinar el valor de incidencia de cada caso.

4.1. Resultados obtenidos

Luego de realizados los ensayos de compactación para cada caso observado en este trabajo, según las especificaciones del capítulo 3.1.1.4, referente al procedimiento del ensayo, se obtienen sus respectivos valores de PUS (peso específico seco máximo) y % de Ho (porcentaje de humedad óptimo).

El detalle de los valores obtenidos se puede encontrar en los anexos.

Tabla IV. **Resultado de PUS y %Ho con incidencia de temperatura (T) y porcentaje de humedad en el ambiente (%Ham)**

T(grados centigrados)	% Ham	PUS (kg/m³)
18°	34	1442
19°	78	1440
21°	64	1443

% Ho	% H inicial	% H de trabajo
19,75	4,53	15,22
18,20	5,8	12,4
19,50	5,76	13,74

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. Resultado de PUS y %Ho con incidencia del equipo utilizado

Equipo	PUS (kg/m ³)	% Ho
Nuevo	1571	17,4
Antiguo	1543	19

Radio pisón (mm)	Altura (cm)	Peso (kg)
25,38	45,7	4,54
24,36	44,9	4,43

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Medición del diámetro del pisón



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 18. **Medición de altura de compactación**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Figura 19. **Medición de peso del martillo**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

Tabla VI. **Resultado de PUS y %Ho con incidencia de base de compactación**

Base	PUS (kg/m³)	% Ho	Dureza (kg/cm²)
Sólida	1556	20,2	394,94
Blanda	1543	18,45	350,27

Fuente: elaboración propia

Figura 20. **Ensayo de dureza en la base de compactación**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

4.2. Análisis estadístico

El análisis de los resultados obtenidos de ensayo de compactación se realiza con base en la Política sobre Incertidumbre de Medición para Laboratorios, de la Oficina de Acreditación de Guatemala.

4.2.1. Resultados estadísticos

Según la política de la Oficina de Acreditación de Guatemala, se procede al cálculo de la incertidumbre estándar ($u(xi)$) y coeficiente de sensibilidad (Ci) para los resultados obtenidos del ensayo Proctor, con las siguientes ecuaciones:

Ecuación de la evaluación tipo A, para la medición de incertidumbre:

$$u(xi) = \frac{1}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{k=1}^n (qk - \bar{q})^2}$$

La desviación estándar ($u(xi)$) es obtenida de un ecuación tipo A, según la política de la Oficina de Acreditación de Guatemala, donde:

- ($u(xi)$)= incertidumbre estándar en la medición
- n = número de mediciones independientes
- qk = valor de resultados obtenidos
- \bar{q} = valor promedio de resultados obtenidos

$$Ci = \frac{\Delta y}{\Delta xi}$$

El coeficiente de sensibilidad (Ci) describe qué tan sensible es el mesurando (valor de magnitud) respecto de las variaciones de la magnitud de entrada (contribución de diversas fuentes), donde:

- Ci = coeficiente de sensibilidad

- Δx = variación de la influencia de la magnitud de entrada
- Δy = variación del mesurando

4.2.1.1. Peso específico seco máximo (PUS) con incidencia de clima y humedad del ambiente (%Ham)

A continuación se presentan los resultados estadísticos de incertidumbre estándar y coeficiente de sensibilidad para los diversos valores de peso específico seco máximo, obtenidos del ensayo de laboratorio, según su incidencia.

Los valores de clima y humedad en el ambiente, son medidos a través de la consulta electrónica de la página oficial del Instituto Meteorológico Nacional (INSIVUMEH), así como, de la toma de lecturas dentro del laboratorio.

$$u(xi) = \frac{1}{\sqrt{3}} * \left[\sqrt{\frac{1}{3-1} * (1\ 442 - 1\ 441,67)^2} + \sqrt{\frac{1}{3-1} * (1\ 441,67 - 1\ 440)^2} + \sqrt{\frac{1}{3-1} * (1\ 443 - 1\ 441,67)^2} \right]$$

$$u(xi) = \pm 0,88 \text{ kg/m}^3$$

$$Ci(\text{clima}) = \frac{1\ 443 - 1\ 442}{21 - 18} = 0,33 \frac{\text{kg/m}^3}{^\circ\text{C}}$$

$$Ci(\%Ham) = \frac{1\ 443 - 1\ 442}{64 - 34} = 0,033 \frac{\text{kg/m}^3}{\%}$$

4.2.1.2. Peso específico seco máximo (PUS) con incidencia de equipo utilizado

Para este caso, en la práctica del ensayo de compactación se utiliza equipo antiguo, usado con más frecuencia en el laboratorio en contraste con equipo obtenido recientemente:

$$u(xi) = \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{2-1} * [(1\ 557 - 1\ 543)^2 + (1\ 571 - 1\ 557)^2]}$$
$$u(xi) = \pm 14 \text{ kg/m}^3$$

$$Ci (\text{radio pisón}) = \frac{1\ 571 - 1\ 543}{25,38 - 24,36} = 27,45 \frac{\text{kg/m}^3}{\text{mm}}$$

$$Ci (\text{altura de compactación}) = \frac{1\ 571 - 1\ 543}{45,7 - 44,9} = 35 \frac{\text{kg/m}^3}{\text{cm}}$$

$$Ci (\text{peso del martillo}) = \frac{1\ 571 - 1\ 543}{4,54 - 4,43} = 254,54 \frac{\text{kg/m}^3}{\text{kg}}$$

4.2.1.3. Peso específico seco máximo (PUS) con incidencia de base de compactación

Para este caso, se dispone hacer ensayos de compactación en superficies preparadas para simular una base sólida y otra blanda, manteniendo todas las demás condiciones iguales.

$$u(xi) = \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{2-1} * [(1\ 549,50 - 1\ 543)^2 + (1\ 556 - 1\ 549,50)^2]}$$

$$u(xi) = \pm 6,50 \text{ kg/m}^3$$

$$Ci \text{ (dureza)} = \frac{1\,556 - 1\,543}{394,94 - 350,27} = 0,29 \frac{\text{kg/m}^3}{\text{kg/cm}^2}$$

4.2.1.4. Contenido de humedad óptima (% Ho) con incidencia de clima y humedad del ambiente (% Ham)

A continuación se presentan los resultados estadísticos de incertidumbre estándar y coeficiente de sensibilidad, para los diversos valores de porcentaje de humedad óptima, obtenidos del ensayo de laboratorio, según su incidencia.

Los valores de clima y humedad en el ambiente son medidos a través de la consulta electrónica de la página oficial del Instituto Meteorológico Nacional (INSIVUMEH), así como, de la toma de lecturas dentro del laboratorio.

$$u(xi) = \frac{1}{\sqrt{3}} * \sqrt{\frac{1}{3-1} * [(19,15 - 18,2)^2 + (19,5 - 19,15)^2 + (19,75 - 19,15)^2]}$$

$$u(xi) = \pm 0,48\%$$

$$Ci \text{ (clima)} = \frac{19,75 - 19,50}{21 - 18} = 0,83 \frac{\text{kg/m}^3}{^\circ\text{C}}$$

$$Ci \text{ (%Ham)} = \frac{19,75 - 19,50}{64 - 34} = 0,0083 \frac{\text{kg/m}^3}{\%}$$

4.2.1.5. Contenido de humedad óptima (% Ho) con incidencia de equipo utilizado

Para este caso, en la práctica del ensayo de compactación, se utiliza equipo antiguo usado con más frecuencia en el laboratorio, en contraste con equipo obtenido recientemente.

$$u(xi) = \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{2-1} * [(18,20 - 17,40)^2 + (19 - 18,20)^2]}$$
$$u(xi) = \pm 0,80\%$$

$$Ci (\text{radio pisón}) = \frac{19 - 17,40}{25,38 - 24,36} = 1,57 \frac{kg/m^3}{mm}$$

$$Ci (\text{altura de compactación}) = \frac{19 - 17,40}{45,7 - 44,9} = 2 \frac{kg/m^3}{cm}$$

$$Ci (\text{peso del martillo}) = \frac{19 - 17,40}{4,54 - 4,43} = 14,55 \frac{kg/m^3}{kg}$$

4.2.1.6. Contenido de humedad óptima (% Ho) con incidencia de base de compactación

Para este caso, se dispone hacer ensayos de compactación en superficies preparadas para simular una base sólida y otra blanda, manteniendo todas las demás condiciones iguales.

$$u(xi) = \frac{1}{\sqrt{2}} * \sqrt{\frac{1}{2-1} * [(20,20 - 19,33)^2 + (19,33 - 18,45)^2]}$$

$$u(xi) = \pm 0,88\%$$

$$Ci \text{ (dureza)} = \frac{20,20 - 18,45}{394,94 - 350,27} = 0,039 \frac{kg/m^3}{kg/cm^2}$$

4.2.2. Resumen de resultados estadísticos

Una vez calculados los valores de desviación estándar y coeficiente de sensibilidad, se presentan a continuación en las tablas VII y VIII, para tener una mejor visualización de la variación en este análisis previo a su comparación.

Tabla VII. Resumen de resultados estadísticos para PUS

PUS (kg/m³)		
Incidencia	Desviación estándar u(xi)	Coefficiente de sensibilidad
Clima		
Temperatura	0,88	0,33 (kg/m³)/°C
% Hum	0,88	0,033 (kg/m³)/%
Equipo		
Radio pisón	14	27,45 (kg/m³)/mm
Altura de compactación	14	35 (kg/m³)/cm
Peso de martillo	14	254,54 (kg/m³)/kg
Base de compactación		
Dureza	6,5	0,29 (kg/m³)/(kg/cm²)
Sumatoria	21,38	317,64

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. Resumen de resultados estadísticos para %Ho

Porcentaje de humedad óptima (%Ho)		
Incidencia	Desviación estandar u(xi)	Coefficiente de sensibilidad
Clima		
Temperatura	0,48	0,83 (kg/m ³)/°c
% Ham	0,48	0,0083 (kg/m ³)/%
Equipo		
Radio pisón	0,80	1,57 (kg/m ³)/mm
Altura de compactación	0,80	2 (kg/m ³)/cm
Peso de martillo	0,80	14,55 (kg/m ³)/kg
Base de compactación		
Dureza	0,88	0,039 (kg/m ³)/(kg/cm ²)
Sumatoria	2,16	19

Fuente: elaboración propia.

4.3. Comparación de resultados obtenidos

Con base en los resultados estadísticos que se obtienen de los ensayos de compactación, sometidos a varios casos donde varían condiciones específicas para cada uno, se procede a compararlos para determinar la incidencia y exactitud de cada caso y cuál de las variaciones de estas condiciones es la que más incide en el proceso del ensayo de compactación Proctor Modificado.

4.3.1. Peso específico seco máximo (PUS)

Comparando los valores de desviación estándar de los resultados obtenidos del ensayo de compactación, se observa que la variable del estado del equipo utilizado produce mayor error (± 14 kg/m³) en la entrega del resultado final, siendo el de menor error de desviación la variable de clima durante la compactación ($\pm 0,88$ kg/m³).

La sensibilidad que se obtiene de las variables que presenta el clima, es la de temperatura la más sensible ($0,33 \text{ (kg/m}^3\text{)/}^\circ\text{C}$), en comparación con el porcentaje de humedad en el ambiente ($0,033 \text{ (kg/m}^3\text{)/}\%$).

El peso del martillo de compactación tiende a tener más sensibilidad, en el resultado del ensayo ($254,54 \text{ (kg/m}^3\text{)/kg}$), en comparación con la altura de compactación ($35 \text{ (kg/m}^3\text{)/cm}$) y el radio del pisón ($27,45 \text{ (kg/m}^3\text{)/mm}$), en la variable del estado del equipo utilizado.

La incertidumbre en el resultado, por la dureza de la base de compactación ($\pm 6,50 \text{ kg/m}^3$), resulta siendo la mitad del error de la variable de clima, y el coeficiente de sensibilidad muestra ser una de las incidencias más baja de los resultados ($0,29 \text{ (kg/m}^3\text{)/}\text{(kg/cm}^2\text{)}$).

4.3.2. Porcentaje de humedad óptima (% Ho)

Los valores de incertidumbre, en la medición de los resultados obtenidos por la desviación estándar, muestran un valor más grande en la variable de dureza de la base de compactación ($\pm 0,88 \text{ kg/m}^3$), similar al valor de la variable del estado del equipo ($\pm 0,80 \text{ kg/m}^3$), obteniendo el valor más bajo de desviación en la variable de clima ($\pm 0,48 \text{ kg/m}^3$).

Para el valor de coeficiente de sensibilidad, se observa un mayor valor en el resultado por el estado del equipo utilizado, específicamente en el peso del martillo de compactación ($14,55 \text{ (kg/m}^3\text{)/kg}$), y el valor más bajo lo muestra el resultado obtenido de porcentaje de humedad en el ambiente ($0,0083 \text{ (kg/m}^3\text{)/}\%$).

CONCLUSIONES

1. La variable que obtiene mayor error, en el resultado de peso específico seco máximo en el ensayo Proctor Modificado, es la del estado del equipo que se utiliza en su desarrollo, cuyo resultado es considerablemente más grande que el de las variables de clima, humedad en el ambiente y estado de la base de compactación. La incerteza más grande en el resultado de la humedad óptima, la muestra la variable de dureza en la base de compactación.
2. El estado del equipo de compactación, proporciona un mayor coeficiente de sensibilidad en el resultado de peso específico seco máximo y humedad óptima del ensayo Proctor Modificado.
3. Las mejores condiciones en el desarrollo del ensayo Proctor Modificado, se obtienen con un mayor control de las variables de incidencia, una temperatura y humedad ambiente que no presente valores muy lejanos a los establecidos como promedio y mantener constante este valor durante el ensayo, un equipo en buen estado, que cumpla con especificaciones de códigos, que tenga un mantenimiento y calibración constante y una base de compactación firme.
4. En el resultado de peso específico seco máximo, por el estado del equipo utilizado es el factor de peso del martillo, el que se debe controlar que esté según las normas, ya que tiende, con el uso, a desgastarse y disminuir la energía de compactación. Mientras que la variable de estado de la base de compactación, que muestra mayor holgura en la medición

del resultado de humedad óptima; es el factor de dureza que influye directamente en la cantidad de energía de compactación, que puede darse durante el desarrollo del ensayo, rebotando y perdiendo así la energía.

5. De los resultados que se cuantifican de peso específico seco máximo del ensayo de compactación, la incertidumbre mayor, se presenta en la variable del estado del equipo, por casi el doble de la incertidumbre próxima menor, que es la variable de dureza en la base de compactación, y que es mucho mayor a la que puede presentar la variable de clima.
6. La amplitud de medición obtenida por la variable de dureza en la base de compactación, es la mayor en los resultados de humedad óptima, en el ensayo Proctor Modificado, muy parecida a la incertidumbre menor próxima, obtenida de la variable del estado del equipo utilizado; en el caso de la variable de clima se muestra un error de casi la mitad respecto de las otras dos variables.

RECOMENDACIONES

1. El laboratorista o encargado de laboratorio, donde se realice el ensayo debe tomar las mediciones de clima y humedad ambiental, en el momento de su desarrollo, por medio de lecturas de temperatura y humedad relativa en el ambiente.
2. El personal del laboratorio debe verificar el estado del equipo de compactación cada vez que se utilice, y renovarlo cuando este ya no cumpla con las especificaciones de los códigos que rigen el ensayo, así como la calibración del resto del equipo, como las balanzas y hornos.
3. La dirección de laboratorio debe fijar un lugar dentro de este, donde la base de compactación sea dura y constante. Capacitación constante del personal para desarrollar el ensayo sin distracciones, sin uso teléfonos celulares, reproductores de música y sin abandonar el lugar de trabajo, mantener una velocidad constante de compactación y de la forma más ordenada posible.
4. La persona encargada o laboratorista que realice el ensayo debe respetar cada una de las especificaciones que establecen los códigos para el control en el desarrollo del ensayo, como el tiempo, altura y método de compactación con el martillo, tiempo y forma de preparación de la muestra, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

1. BERRY, Peter L.; REID David. *Mecánica de suelos*. Colombia: McGraw-Hill, 1993. 415 p.
2. BOWLES, Joseph E. *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. México: McGraw-Hill, 1981. 213 p.
3. CRESPO VILLALAZ, Carlos. *Mecánica de suelos y cimentaciones*. 5a ed. México: Limusa, 2005. 650 p.
4. INSIVUMEH. Boletín climático. [en línea] <http://www.insivumeh.gob.gt/meteorologia/boletin_climatico.html> [Consulta: abril de 2013].
5. International Standards Worldwide. *Annual book of ASTM Standards, section four, construction*. Volume 04.08 Soil and Rock (I): D 420 – D 5611. 2006. 1156 p.
6. JUÁREZ BADILLO, Eulalio; RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. *Fundamentos de la mecánica de suelos*. 3a ed. México: Limusa, 2005. 642 p. Tomo I.
7. LAMBRE, William; WHITMAN, Robert. *Mecánica de suelos*. México: Limusa, 2005. 582 p.

8. SOWERS, George B.;SOWERS George F. *Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones*.México: Limusa, 1990. 677 p.

ANEXOS

Anexo 1. Portadas OGA y CENAM



Fuente: OGA, CENAM, Guía para estimar la Incertidumbre de la medición. p. 1.

Anexo 2. Evaluación tipo A

6.1. Evaluación tipo A

La incertidumbre de una magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

Si X_i se determina por n mediciones independientes, resultando en valores q_1, q_2, \dots, q_n , el mejor estimado x_i para el valor de X_i es la media de los resultados individuales:

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{j=1}^n q_j \quad (6.1)$$

La dispersión de los resultados de la medición q_1, q_2, \dots, q_n para la magnitud de entrada X_i se expresa por su desviación estándar experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad (6.2)$$

La incertidumbre estándar $u(x_i)$ de X_i se obtiene finalmente mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de la media:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (6.3)$$

Así que resulta para la incertidumbre estándar de X_i :

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (6.4)$$

Fuente: CENAM, Guía para estimar la Incertidumbre de la medición.p. 8.

Anexo 3. Coeficiente de sensibilidad

b) Otros métodos de determinación:

Si la influencia de la magnitud de entrada X_i en el mensurando Y no está representada por una relación funcional, se determina el coeficiente de sensibilidad c_i por una estimación del impacto de una variación de X_i en Y según:

$$c_i = \frac{\Delta Y}{\Delta X_i} \quad (8.3)$$

Esto es, manteniendo constantes las demás magnitudes de entrada, se determina el cambio de Y producido por un cambio en X_i por una medición o a partir de la información disponible (como una gráfica o una tabla).

Fuente: CENAM, Guía para estimar la Incertidumbre de la medición. p. 13.

Anexo 4. Ensayo de lectura de martillo de impacto



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



ENSAYO DE LECTURA DE MARTILLO DE IMPACTO
NORMA ASTM C-805
INFORME No. S.C. - 516
HOJA 1/1

O.T. No. **31670**

INTERESADO: Fernando José Carlos Revolorio, Carne No. 200915707.
PROYECTO: Trabajo de Graduación "Incidencia de los resultados de ensayo de proctor por la incidencia del clima".
DIRECCIÓN: Laboratorio de Mecánica de Suelos del CII.
FECHA: 18 de julio de 2013.

A solicitud del interesado se realizaron pruebas con martillo esclerómetro, para determinación del esfuerzo estimado de una base de concreto para la máquina de ensayo de Proctor y un cimiento de concreto del pasillo, del laboratorio de Mecánica de Suelos del CII.

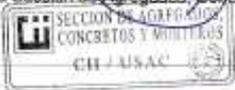
ELEMENTO ESTRUCTURAL	IDENTIFICACIÓN	ANGULO	LECTURAS							LECTURA PROMEDIO	ESFUERZO (kg/cm ²)	ESFUERZO (PSI)
			1	2	3	4	5	6	7			
Base de concreto para la máquina de ensayo de Proctor	1	B	34	34	34	32	32	32	33	33.0	334.56	4758.51
	2	B	39	36	36	40	38	38	37	37.7	416.16	5919.13
	3	B	38	36	36	37	35	33	35	35.7	379.44	5396.85
	4	B	37	36	36	38	38	38	36	37.3	408.00	5803.07
	5	B	38	40	38	39	40	38	39	38.9	436.56	6209.28
Cimiento de concreto del pasillo	1	B	33	36	33	36	32	34	34	34.0	346.80	4932.61
	2	B	33	34	34	33	33	34	32	33.3	338.64	4816.54
	3	B	32	32	38	34	34	32	32	33.4	339.66	4831.05
	4	B	37	32	33	33	34	34	34	33.9	346.80	4932.61
	5	B	36	37	34	36	36	37	34	35.7	379.44	5396.85

a) Esfuerzo kg/cm² = Esfuerzo estimado según graficas de martillo ELE International Model 35-1480 serie 2G0249.
 b) Toma de lecturas el día 10 de julio de 2013.

ATENTAMENTE,



Inga. Dilma Yaret Mejicanos Jol
Jefa Sección de Agregados, Concretos y Morteros



Vo.Bo.



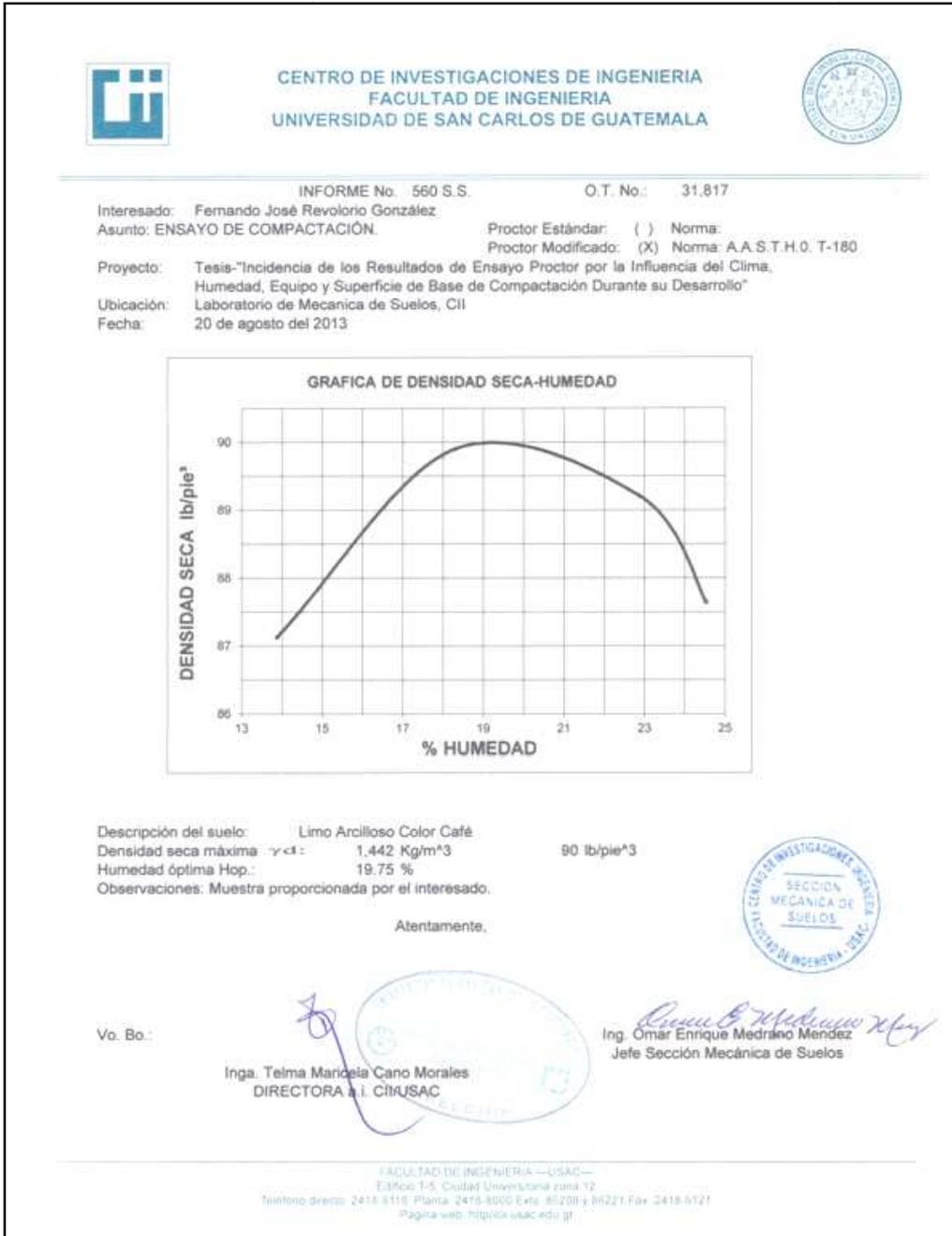
Inga. Teima Marcela Cahó Morales
Directora CII/USAC



FACULTAD DE INGENIERIA —USAC—
Edificio T-3, Ciudad Universitaria zona 12
Teléfono directo: 2418-8115, Planta: 2418-8200 Elex. 85205 y 85221 Fax: 2418-8121
Página web: <http://ci.usac.edu.gt>

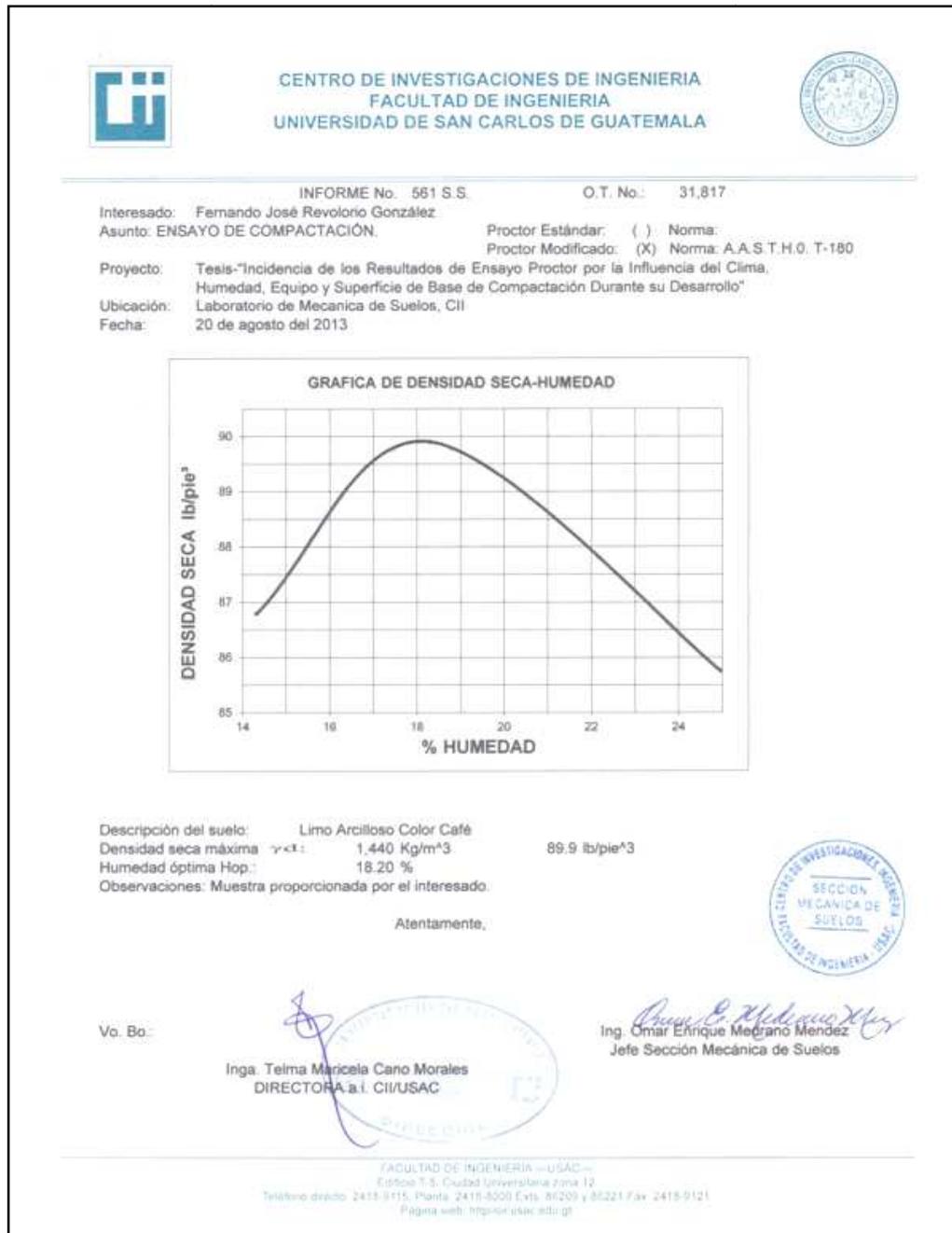
Fuente: Centro de Investigaciones de Ingeniería, USAC.

Anexo 5. Ensayo Proctor Modificado T 18° y %H 3 4



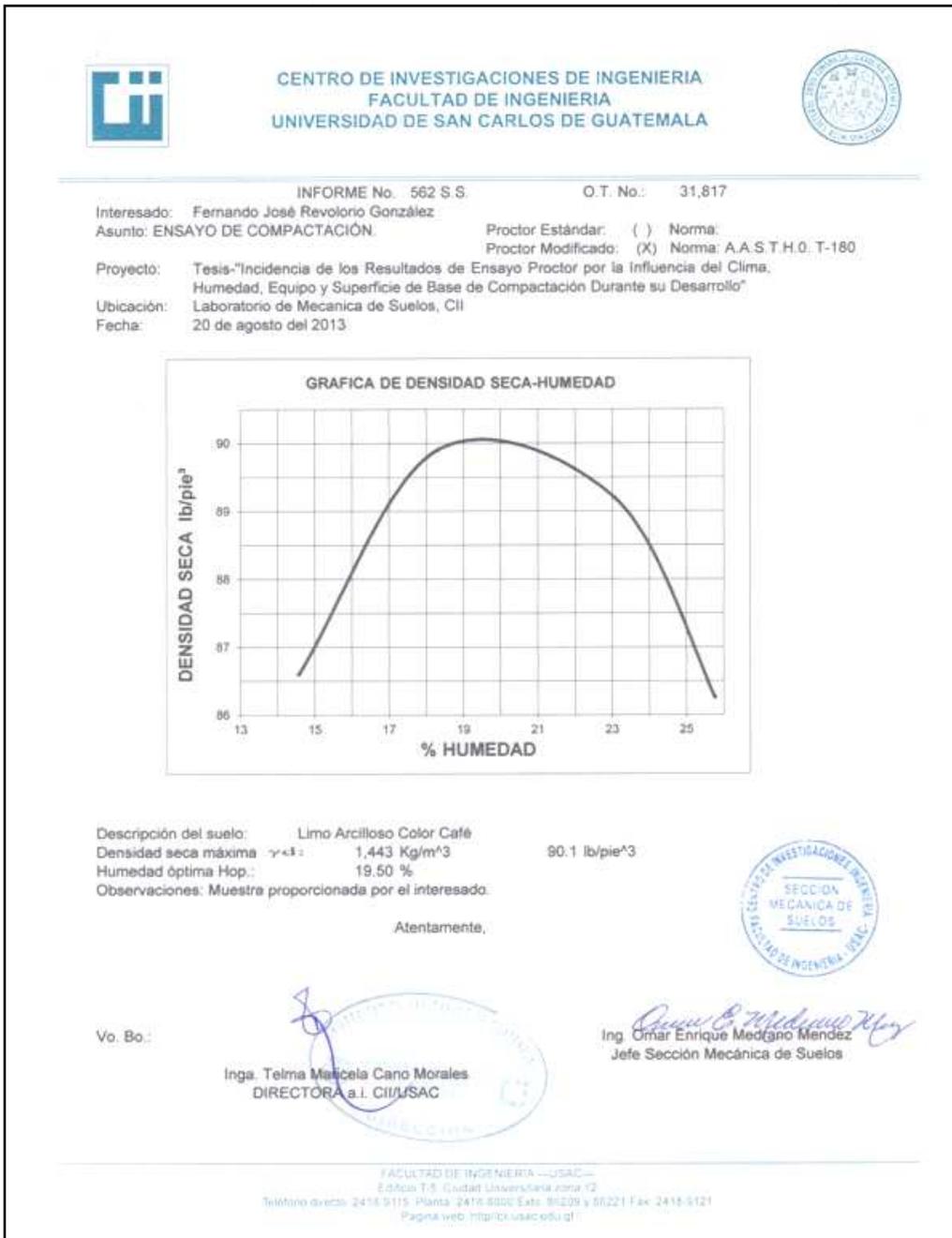
Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Ingeniería, USAC.

Anexo 6. Ensayo Proctor Modificado T 19° y %H 78



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Ingeniería, USAC.

Anexo 7. Ensayo Proctor Modificado T 21° y %H 64



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Ingeniería, USAC.

