

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE CIVIL**

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

**“VALIDACIÓN DE LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD IN-
SITU, DE UN TRAMO DEL PROYECTO “COLLAS-TABABELA”,
UTILIZANDO UN DENSÍMETRO ELÉCTRICO Y COMPARANDO
LOS RESULTADOS CON EL DENSÍMETRO NUCLEAR Y EL CONO
Y ARENA.”**

NOMBRE:

JUAN MARTÍN FLORES CANO

DIRECTOR:

ING. JUAN CARLOS MONTERO

QUITO 2014

DEDICATORIA

Esta disertación está dedicada a mi familia especialmente a mis padres y abuelos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al cuerpo docente de la Facultad de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador especialmente al director de mi disertación Juan Carlos Montero y a los revisores Ricardo Salvador y Gustavo Yáñez. Otro agradecimiento al Laboratorio de Materiales de Construcción por la ayuda prestada.

Un agradecimiento especial a todos mis compañeros durante el transcurso de la carrera.

Resumen

La siguiente investigación pretende demostrar la relación que existe entre los datos de densidad seca y contenido de humedad obtenidos con el densímetro eléctrico y compararlos con los mismos datos obtenidos con el cono y arena y el densímetro nuclear. Los tres métodos utilizados durante la investigación son un método tradicional el cual es el cono y arena, un método muy utilizado en el medio de la construcción y estudio de suelo que es el densímetro nuclear y un último método es un método novedoso y no muy ocupado ni reconocido en el medio que es el densímetro eléctrico el cual se pretende determinar su validación con respecto a los otros dos métodos.

El densímetro eléctrico necesita de una previa calibración en el suelo donde se van a realizar las mediciones, esta calibración fue realizada en el laboratorio utilizando el suelo del tramo de la carretera Collas-Tababela y un cajón de madera para simular los distintos grados de compactación y contenido de humedad que pueden generarse en el suelo.

La investigación se llevó a cabo en un tramo de la carretera Collas-Tababela en donde se seleccionaron 25 puntos aleatoriamente y en cada uno de los puntos se obtuvo la densidad seca y el contenido de humedad con cada uno de los métodos (cono y arena, densímetro nuclear y densímetro eléctrico). Con cada uno de los datos obtenidos tanto de densidad seca como de contenido de humedad se realizó una correlación y un análisis de varianza entre el densímetro eléctrico y el cono y arena y de la misma manera entre el densímetro eléctrico y el densímetro nuclear. Con motivos únicamente comparativos se realizó el mismo análisis entre el cono y arena y el densímetro nuclear.

TABLA DE CONTENIDOS

Resumen	iv
Índice de Gráficos.....	x
Índice de Tablas.....	xii
Índice de Ecuaciones	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
ALCANCE.....	2
OBJETIVO GENERAL.....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
HIPÓTESIS.....	2
PROCEDIMIENTO TÉCNICO.....	3
CAPITULO 1: CLASIFICACIÓN DE SUELOS.....	7
1.1. Clasificación SUCS.....	7
1.1.1. Tamaño de Partículas	8
1.1.2. Graduación.....	8
1.1.3. Forma	9
1.1.4. Humedad del Suelo.....	10
1.1.4.1 Dilatancia.....	11
1.1.4.2 Resistencia al Estado Seco.....	11
1.1.4.3 Tenacidad.....	12
1.1.5. Características del Suelo	12
1.1.5.1 Gravas y Arenas.....	12
1.1.5.2 Limos y Arcillas.....	13
1.1.5.3 Materia Orgánica.....	14
1.1.6. Clasificación de Suelos.....	14
1.1.6.1 Clasificación en el Campo.....	15
1.1.6.2 Clasificación en Laboratorio.....	16
1.2 Clasificación AASHTO.....	20
CAPÍTULO 2: MAQUINARIA DE COMPACTACIÓN.....	22
2.1 Motoniveladora.....	22
2.1.1 Chasis.....	22
2.1.2 Cuchilla.....	23
2.1.3 Ejes.....	23

2.1.4	Ruedas.....	23
2.1.5	Accesorios.....	24
2.2	Máquinas Utilizadas para la Compactación de Suelos.....	24
2.2.1	Maquinaria de Carga Estática.....	24
2.2.1.1	Rodillo de Llantas Lisas:.....	25
2.2.1.2	Rodillo de Cilindro con Salientes.....	27
2.2.1.2.1	Rodillo Pata de Cabra.....	27
2.2.1.2.2	Rodillo de Rejilla.....	28
2.2.1.2.3	Rodillo de Segmentos.....	28
2.2.1.3	Rodillo Neumático.....	28
2.2.2	Maquinaria de Carga Dinámica.....	29
2.2.2.1	Por Impacto.....	29
2.2.2.1.1	Pisón de Explosión.....	29
2.2.2.1.2	Pisón por Caída Libre.....	30
2.2.2.2	Por Vibración.....	30
2.2.2.2.1	Rodillo Vibrante Remolcado.....	32
2.2.2.2.2	Rodillo Vibrante Autopulsado.....	32
2.2.2.2.3	Rodillo Vibrante Manual (Dúplex).....	34
2.2.2.2.4	Bandeja Vibrante.....	35
2.2.2.3	Por Oscilación.....	36
2.3	Tabla para la Selección de la Maquinaria.....	36
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE COMPACTACIÓN.....		37
3.1.	Compactación del Suelo en Laboratorio Utilizando un Esfuerzo Estándar de 12400ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³) o Próctor Estándar.....	37
3.1.1	Alcance:.....	37
3.1.2	Terminología.....	38
3.1.3	Significancia y Uso.....	39
3.1.4	Equipos.....	39
3.1.5	Espécimen de Ensayo.....	41
3.1.6	Preparación del Equipo.....	41
3.1.7	Procedimiento.....	42
3.1.7.1	Suelo.....	42
3.1.7.1.1	Método de Preparación Húmedo.....	42
3.1.8	Compactación.....	44
3.1.9	Cálculos:.....	46
3.1.9.1	Curva de compactación.....	47

3.2	Compactación del Suelo en Laboratorio Utilizando un Esfuerzo Modificado de 56000 ft-lbf/ft³ (2700 KN-m/m³) o Próctor Modificado.....	49
3.2.1	Alcance.....	49
3.2.2	Terminología.....	51
3.2.3	Significancia y Uso.....	52
3.2.4	Equipos.....	52
3.2.5	Espécimen de Ensayo.....	54
3.2.6	Preparación del Equipo.....	55
3.2.7	Procedimiento.....	55
3.2.7.1	Suelo.....	55
3.2.7.1.1	Método de Preparación Húmedo.....	55
3.2.7.1.2	Método de Preparación Seco.....	56
3.2.8	Compactación.....	57
3.2.9	Cálculos.....	59
3.2.9.1	Curva de compactación:.....	60
CAPÍTULO 4: EQUIPO PARA CONTROL DE COMPACTACIÓN IN-SITU.....		63
4.1.	Cálculo de la Densidad y Contenido de Humedad In-Situ por el Método Cono y Arena.63	
4.1.1	Alcance.....	63
4.1.2	Equipos.....	64
4.1.3	Procedimiento.....	65
4.1.4	Cálculos.....	68
4.2	Determinación de la Densidad y Contenido de Humedad In-Situ a través del Densímetro Nuclear.....	70
4.2.1	Alcance.....	70
4.2.2	Equipo.....	71
4.2.3	Terminología.....	71
4.2.4	Significancia y Uso.....	71
4.2.5	Limitantes.....	72
4.2.6	Procedimiento.....	73
4.2.6.1	Método por Transmisión Directa.....	73
4.3	Determinación de la Densidad y Contenido de Humedad In-Situ a través del Densímetro Eléctrico.-.....	75
4.3.1	Alcance.....	75
4.3.2	Equipos.....	76
4.3.3	Terminología.....	76

4.3.4	Significancia y Uso.	77
4.3.5	Interferencias.....	77
4.3.6	Calibración.	78
4.3.7	Datos de la Calibración del Modelo de Suelo del Densímetro Eléctrico HUMBOLDT H-4114SD.3F.....	82
4.3.7.1	Datos de la Caracterización del Material.	82
4.3.7.2	Datos del Ensayo de Compactación del Suelo en Laboratorio Utilizando un Esfuerzo Modificado (Próctor Modificado) ASTM 1557	84
4.3.7.3	Datos obtenidos con el Densímetro Nuclear y Humedad que se Ingresaron al Densímetro Eléctrico para Generar el Modelo de Suelo.	85
4.3.8	Procedimiento.....	87
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS		91
5.1.	Resultados de los Ensayos con Cono y Arena.....	91
5.2	Resultados de los Ensayos con Densímetro Nuclear.	92
5.3	Resultados de los Ensayos con Densímetro Eléctrico.....	93
5.4	Correlación de Datos.....	94
5.4.1	Definición de Correlación Lineal.	94
5.4.2	Correlación de Densidad Seca Cono y Arena vs Densímetro Eléctrico.....	95
5.4.3	Correlación de Densidad Seca Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico.....	95
5.4.4	Correlación de Humedad Cono y Arena vs Densímetro Eléctrico.....	96
5.4.5	Correlación de Humedad Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico.....	96
5.4.6.	Correlación de Densidad Seca Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico.....	97
5.4.7.	Correlación de Densidad Seca Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico.....	97
5.5	Análisis de Varianza.....	98
5.5.1	Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Densidad Seca a través del Cono y Arena y Densímetro Eléctrico.....	98
5.5.2	Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Densidad Seca a través del Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico.....	99
5.5.3	Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Humedad a través del Cono y Arena y Densímetro Eléctrico.....	100
5.5.4	Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Humedad a través del Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico.	100
5.5.5	Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Densidad Seca a través del Cono y Arena y Densímetro Nuclear.....	101
5.5.6	Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Humedad a través del Cono y Arena y Densímetro Nuclear.....	102

5.6. Tabla Comparativa de Densidad Seca y Humedad Obtenida con Cada Método...	103
CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS.	105
6.1 CONCLUSIONES:.....	105
6.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DENSÍMETRO ELÉCTRICO.....	106
6.3 RECOMENDACIONES.....	106
BIBLIOGRAFÍA.	108
ANEXOS	111

Índice de Gráficos

Gráfico I.1 - Área de ensayos.....	3
Gráfico I.2 - Huella Densímetro Eléctrico.	4
Gráfico I.3 - Huella Densímetro Nuclear.	4
Gráfico I.4 - Huella Cono y Arena.....	4
Gráfico I.5 Ubicación de la Carretera Collas-Tababela	6
Gráfico 1.1- Granulometría.....	9
Gráfico 1.2 Formas de Partículas.....	9
Gráfico 1.3 - Carta de Plasticidad	18
Gráfico 2.1 Motoniveladora	24
Gráfico 2.2 - Tándem o Rodillo Liso de 2 Tambores	26
Gráfico 2.3 - Rodillo Liso de un Tambor.....	26
Gráfico 2.4 - Rodillo Pata de Cabra	27
Gráfico 2.5 - Rodillo Neumático.....	29
Gráfico 2.6 – Pisón de Explosión.....	30
Gráfico 2.7 – Rodillo Vibrante Remolcado.....	32
Gráfico 2.8 – Rodillo Vibrante Autopropulsado de Un Tambor.....	33
Gráfico 2.9 – Rodillo Vibrante Autopropulsado Tándem.....	34
Gráfico 2.10 – Rodillo Vibrante Manual (Dúplex)	35
Gráfico 2.11 – Bandeja Vibrante.....	35
Gráfico 3.1- Molde 4in.....	39
Gráfico 3.2 - Molde 6 in.....	40
Gráfico 3.3 - Curva de Compactación.....	49
Gráfico 3.4 - Molde 4 in.....	52
Gráfico 3.5 - Molde 6 in.....	53
Gráfico 3.3 - Curva de Compactación.....	62
Gráfico 4.1 - Dimensiones Cono.....	65
Gráfico 4.2 – Placa y Agujero del Ensayo Cono y Arena.....	66
Gráfico 4.3 - Masa de suelo húmedo.....	67
Gráfico 4.4 - Masa del frasco antes del ensayo.....	67
Gráfico 4.5 - Frasco y cono virados.	68
Gráfico 4.6 - Varilla de perforación siendo clavada.	74
Gráfico 4.7 - Vástago insertado.....	74
Gráfico 4.8 - Muestreo en campo.....	79
Gráfico 4.9 - Cajón de madera.	80
Gráfico 4.10 - Compactación del suelo con Pisón.	80

Gráfico 11 - Medición con Densímetro Eléctrico.	81
Gráfico 12 - Medición con Densímetro Nuclear.	81
Gráfico 4.13 - Encendido del equipo.	87
Gráfico 4.14 - Plantilla y Dardos.	88
Gráfico 4.15 - Conexión de sensor de suelo.	88
Gráfico 4.16 - Conexión cables del sensor de suelo.	89
Gráfico 4.17 - Posición AA y BB para ensayo del Densímetro Eléctrico.	89
Gráfico 4.18 - Conexión de sonda de temperatura.	90
Gráfico 4.19 - Densímetro Eléctrico listo para el ensayo.	90
Gráfico 5.1 – Densidad Seca Cono y Arena vs Densímetro Eléctrico	95
Gráfico 5.2 – Densidad Seca Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico	95
Gráfico 5.3 – Humedad Cono y Arena vs Densímetro Eléctrico	96
Gráfico 5.4 - Humedad Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico	96
Gráfico 5.5 – Densidad Seca Cono y Arena vs Densímetro Nuclear	97
Gráfico 5.6 – Humedad Cono y Arena vs Densímetro Nuclear	97
Gráfico 5.7 – Gráfico comparativo de densidad seca y humedad obtenido con cada método y su respectiva línea de tendencia.	104

Índice de Tablas

Tabla 1.1 - Clasificación de Suelos SUCS	19
Tabla 1.2 - Clasificación de Suelos AASHTO.....	21
Tabla 2.1 – Compactación de Suelos Firmes	36
Tabla 3.1 – Tiempo de Secado Próctor Estándar	43
Tabla 4.1 – Volumen mínimo del hoyo basado en el tamaño máximo de partícula del suelo.	66
Tabla 4.2 - Valores Ingresados en el Densímetro Eléctrico para su Calibración	86
Tabla 5.1 - Resultados de los Ensayos con Cono y Arena	91
Tabla 5.2 - Resultados de Ensayos con el Densímetro Nuclear	92
Tabla 5.3 - Resultados de Ensayos con el Densímetro Eléctrico	93
Tabla 5.4 - Análisis de Varianza de Densidad Seca de Cono y Arena y Densímetro Eléctrico.....	99
Tabla 5.5 - Análisis de Varianza de Densidad Seca de Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico	99
Tabla 5.6 - Análisis de Varianza de Humedad de Cono y Arena y Densímetro Eléctrico.....	100
Tabla 5.7 - Análisis de Varianza de Humedad de Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico...	101
Tabla 5.8 - Análisis de Varianza de Humedad de Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico...	102
Tabla 5.9 - Análisis de Varianza de Humedad de Cono y Arena y Densímetro Nuclear.....	102
Tabla 5.8: Tabla comparativa de resultados de densidad seca y humedad obtenida con cada método	103

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1.1.....	10
Ecuación 1.2.....	10
Ecuación 1.3.....	17
Ecuación 1.4.....	17
Ecuación 1.5.....	20
Ecuación 3.1.....	46
Ecuación 3.2.....	46
Ecuación 3.3.....	47
Ecuación 3.4.....	48
Ecuación 3.1.....	59
Ecuación 3.2.....	60
Ecuación 3.3.....	60
Ecuación 3.4.....	61
Ecuación 4.1.....	68
Ecuación 4.2.....	69
Ecuación 4.3.....	69
Ecuación 4.4.....	69
Ecuación 4.5.....	81
Ecuación 4.6.....	82

INTRODUCCIÓN

Para la determinación de la densidad in-situ existen varios métodos y ensayos, entre los más utilizados están el Densímetros Nuclear y el ensayo de Cono y Arena. Otra alternativa, es la utilización del Densímetro Eléctrico cuya validación se pretende determinar.

El Densímetro Nuclear es el método que más se utiliza para la determinación de la densidad y la humedad de materiales clasificados y calificados debido a la rapidez de los resultados obtenidos a diferencia del Cono y Arena, el cual lleva más tiempo en procesar los resultados. Por otra parte, su uso está asociado a riesgos para la salud por la exposición a fuentes radiactivas y además, implica una serie de requisitos administrativos y permisos gubernamentales para su operación, en el caso de Ecuador el permiso lo otorga el Ministerio de Energías Renovables. Esto suma una serie de costos por adquisición del equipo, entrenamiento especializado, obtención de licencias e implementación de medidas de protección y aislamiento de los equipos.

El Cono y Arena es el método más seguro y confiable, pero se necesitan de 12 a 24 horas para obtener resultados, estas horas influyen en la programación de obra ya que no se podría continuar con la compactación sin los resultados del ensayo.

Como alternativa, estos últimos años se encuentra en el mercado el Densímetro Eléctrico, este equipo está libre de riesgos de emisiones radioactivas y los resultados obtenidos son inmediatos, aunque su uso no está muy extendido en el país. Al momento no existen estudios sobre el desempeño de estos equipos en materiales locales para la validación de estos métodos de ensayo, lo cual genera resistencia en los usuarios para su consideración como una alternativa válida de uso.

Esta investigación pretende validar los datos obtenidos del Densímetro Eléctrico con una medida patrón y un método tradicional, como son el Cono y Arena y el Densímetro Nuclear respectivamente, para el control de compactación de suelos. Además de constituirse en un punto de referencia para la toma de decisiones sobre adoptar este tipo de tecnologías, proporcionando al usuario argumentos técnicos para adoptar este método.

ALCANCE.

Los resultados de esta investigación fueron obtenidos con una calibración del modelo de suelo del Densímetro Eléctrico realizada únicamente en laboratorio.

OBJETIVO GENERAL.

Comparar los resultados de las medidas en campo utilizando un densímetro eléctrico, un densímetro nuclear y un aparato de cono y arena para validar el método del densímetro eléctrico.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Realizar una evaluación estadística de la significancia de la variación de métodos indirectos de densidad contra un método asumido como patrón.

Obtención de correlaciones entre los datos obtenidos del densímetro eléctrico, densímetro nuclear y cono y arena.

Plantear ventajas y desventajas de la utilización de un Densímetro Eléctrico en la práctica en campo.

HIPÓTESIS.

En el medio ecuatoriano no existe ningún tipo de investigación relacionada con la utilización del Densímetro Eléctrico y la veracidad de sus datos en suelos locales comparándolos con los datos obtenidos por métodos tradicionales como son el Cono y Arena y el Densímetro Nuclear.

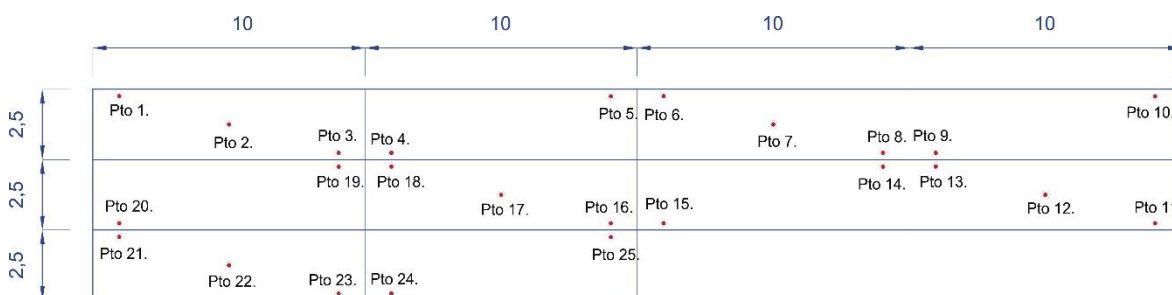
PROCEDIMIENTO TÉCNICO.

La investigación se realizó en la vía Collas-Aeropuerto en un tramo de 250 m² en la abscisa 2+800, el proyecto está siendo realizado por la Constructora Herdoiza Crespo Construcciones S.A.

Inicialmente, se eligió un área de prueba apta para tomar densidades y humedades con los tres métodos; esta área, es un tramo de la carretera ya compactada del proyecto Collas-Aeropuerto.

Al área de trabajo de 250 m² se la dividió en 10 grillas iguales de 10 m. * 2.5 m. cada una. Para la investigación se determinaron 25 puntos representativos de toda el área de investigación. En una grilla se eligieron tres puntos de ensayo y en la siguiente grilla dos puntos de ensayo; de esta manera se iban alternando en las 10 grillas como se detalla en el Gráfico 1.

Gráfico I.1 - Área de ensayos.



En cada uno de los 25 puntos se realizaron 3 ensayos de densidad y humedad utilizando el Densímetro Eléctrico, el Densímetro Nuclear y el Cono y Arena, llevando un registro con la ubicación geográfica de cada punto para su posterior análisis estadístico. Los 3 ensayos se hicieron precisamente en el mismo punto para que no exista una alteración en los datos al momento de realizar las mediciones con cada equipo es decir para tomar las densidades y humedades exactamente del mismo suelo como se observa en los Gráficos 1.1, 1.2 y 1.3.

Gráfico I.1 - Huella Densímetro Eléctrico.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Gráfico I.2 - Huella Densímetro Nuclear.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Gráfico I.4 - Huella Cono y Arena.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Se realizó un muestreo del material del área elegida para hacer una caracterización del mismo a través de ensayos de clasificación y compactación en el laboratorio. A su vez, este material se utilizó para realizar un modelo de suelo en el laboratorio el cual sirve para

obtener medidas estimadas de densidad y humedad con el Densímetro Eléctrico, todo el proceso para realizar el modelo de suelo y su utilización serán explicados posteriormente en la metodología de uso del Densímetro Eléctrico.

Al tener 25 puntos de medición de densidades y humedades y 3 distintos métodos de medición en total se realizaron 75 ensayos.

En el laboratorio se ensayó el material obtenido del sitio de trabajo para obtener su respectiva clasificación.

Elaboración de un análisis estadístico de las densidades y humedades obtenidas a través de un análisis de regresión y un análisis de varianza.

DATOS DEL LUGAR DE INVESTIGACIÓN

La vía Collas-Aeropuerto es la encargada de conectar a la vía Panamericana Norte con el Nuevo Aeropuerto de Quito. Esta vía inicia en la zona de Oyacoto, sector Collas, en el kilómetro 7.5 de la Panamericana Norte y finaliza en el Nuevo Aeropuerto Internacional de Quito en la meseta de Tababela.

Tiene una longitud aproximada de 12km. y cuenta con un puente de 150m. de longitud. La vía es de 4 carriles, 2 en cada sentido, con un ancho de carril de 3.65m. cada uno, división de 1m., espaldón de 2 metros a cada lado, cunetas de 1 metro y berma de 2m.

Cuenta con iluminación subterránea, tachas reflectivas, postes de SOS cada 2km. y señalización vertical y horizontal.

El tráfico que se espera que circule por la vía es de 8000 automotores diariamente.

Gráfico I.3 Ubicación de la Carretera Collas-Tababela



Fuente: <http://www.ecuashoping.com/noticias/ecuador/quito/8206-La-Collas-Aeropuerto-avanza-con-la-estabilizacion-de-taludes.html>

CAPITULO 1: CLASIFICACIÓN DE SUELOS

En la ingeniería civil, la clasificación del suelo es sumamente importante ya que éste es el encargado de resistir el peso y la acción de todas las estructuras, por lo tanto, conocer las características físicas es indispensable para así realizar un correcto diseño estructural acorde con el tipo de suelo o en su defecto realizar un mejoramiento de suelo apto para soportar la nuevas cargas que van a ser transmitidas. La clasificación de suelos consiste en dar a un tipo de suelo que reúne ciertas características un nombre o una categoría para poder comprender cuál va a ser su comportamiento frente a la acción a la que se le va a someter. Al saber con qué tipo de suelo se cuenta, permite a los ingenieros realizar un análisis técnico e incluso económico para realizar un proyecto específico y si este necesita de investigaciones adicionales.

1.1. Clasificación SUCS

Existen algunas clasificaciones de suelos para distintos campos profesionales como es en la agricultura, geología, geotecnia, ingeniería, etc. La importancia de manejar la misma clasificación de suelos radica en que todos los profesionales inmersos en un mismo proyecto partan de las mismas bases con las que fue categorizado el suelo y así entenderse entre ellos e intercambiar información útil para un correcto manejo de dicho proyecto. Sabiendo esto, en 1952 se creó un sistema de clasificación, propuesto por el profesor A. Casagrande de la Universidad de Harvard como parte del Bureau of Reclamation y el Corps of Engineers, llamado el “Sistema Unificado de Clasificación de Suelos” (SUCS) ¹ este sistema debido a su utilidad fue adoptado por el “American Society of Testing Materials” (ASTM) y actualmente forma parte de su norma². El SUCS permite realizar una clasificación manual y visual sin necesidad de ensayos de laboratorio ya que su clasificación se basa en el tamaño de las partículas, granulometría y en las características de los finos.

¹ U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. *Manual de Tierras*. Madrid, Editorial Técnica Bellisco, 2da edición, 1974. Páginas 1-2

² Blázquez Bañón Luis. *Clasificación de Suelos*. Internet. http://sirio.ua.es/proyectos/manual_%20carreteras/02010103.pdf. Acceso: 03 de diciembre de 2013

1.1.1. Tamaño de Partículas

Toda partícula de tamaño superior a 7.62 cm. o 3 pulg será excluida de esta clasificación. El presente sistema de clasificación se divide en dos grupos: granos gruesos y granos finos. Los granos gruesos igualmente se subdividen en gravas y arenas, mientras que los granos finos se subdividen en limos y arcillas. Los granos gruesos son aquellos que sus partículas se encuentran entre los 7.62 cm. (3 pulg) y el tamiz No 200 (0.074mm). Las gravas son representadas por la letra G y son todas aquellas partículas menores a 7.62 cm. (3 pulg) y mayores al tamiz No 4 (3/16 pulg o 4.75 mm). La arena es representada por la letra S y son todas aquellas partículas menores al tamiz No 4 (3/16 pulg o 4.75 mm) y mayores al tamiz No 200 (0.074mm). Los granos finos, por otra parte, son aquellos cuyas partículas son menores al tamiz No 200 (0.074mm). Los limos son representados por la letra M y se propone que sean aquellas partículas cuyo tamaño sea menor al tamiz 200 (0.074mm) y mayor a las 5 micras (0.005mm.); mientras que las arcillas, representadas por la letra C, sean aquellas partículas menores a las 5 micras (0.005mm.); pero lo que en realidad toma en cuenta el SUCS, más que el tamaño de la partícula, es el comportamiento de las partículas para así darles una categorización.

Otro componente del suelo es la materia orgánica representada por la letra O, esta materia no se determina por tamaños máximos o mínimos sino por su composición.

1.1.2 Graduación.

Los granos, pueden ser de 2 formas:

Bien graduados, representados por la letra W, lo que quiere decir que tiene una buena porción de cada tamaño de partícula en su espécimen.

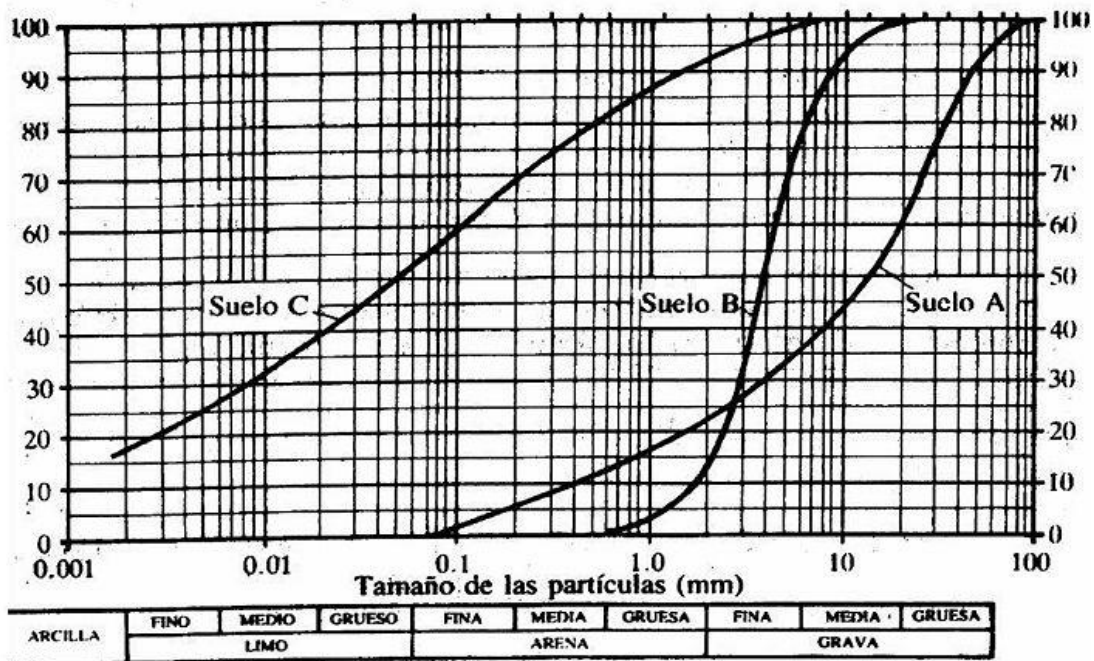
Mal graduados, representado por la letra P, lo que quiere decir el espécimen posee en su mayoría el mismo tamaño de partícula, no posee algunos tamaños de partícula o existe discontinuidad de los mismos.

Para conocer estos valores, se realiza una granulometría la cual se obtiene mediante un tamizado, en el caso de los granos gruesos, con el fin de separar a la muestra de acuerdo a

su tamaño de partículas; por otra parte, el material que pasa el tamiz No 200 vendrían a ser limos y arcillas, se separan por sedimentación o análisis hidrométrico. Todo este proceso se realiza con el fin de obtener una curva en un gráfico con los valores acumulados.

Fuente: <http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Granulometr%C3%ADa>

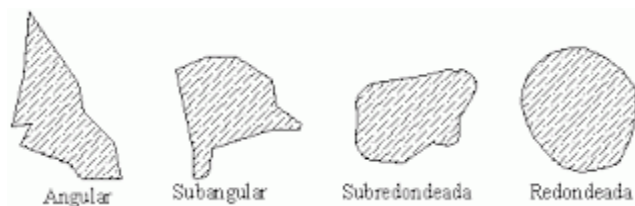
Gráfico 1.1- Granulometría



1.1.3 Forma

La forma de las partículas influye en las propiedades físicas del suelo y pueden ser angulares, subangulares, subredondeadas y redondeadas.

Gráfico 1.2 Formas de Partículas



Fuente: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/forma-y-textura-de-las-particulas-del.html>

Como se puede apreciar en el gráfico, las partículas angulares son opuestas a las redondeadas y es posible darle un valor la esfericidad de cada partícula a través de la siguiente ecuación:

Ecuación 1.1

$$Es = \frac{D_e}{L}$$

Donde:

Es = Esfericidad

L = Longitud de la partícula.

D_e = Diámetro equivalente de la partícula. Para:

Ecuación 1.2

$$D_e = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}}$$

V = Volumen de la partícula.

1.1.4 Humedad del Suelo.

La humedad del suelo tiene una influencia particular en los granos finos ya que afecta las propiedades del suelo. Existen tres estados en los que el suelo puede estar: estado líquido, estado plástico y estado sólido.

En el estado líquido el comportamiento del suelo es similar a la de un fluido viscoso, en el estado plástico el suelo se vuelve fácilmente moldeable sin regresar a su posición inicial y en el estado sólido el suelo tiende a agrietarse o tras sufrir una deformación se recupera por sus propiedades elásticas, a este estado se lo divide en semisólido y sólido.

Aquí intervienen los “límites de Atterberg”, estos límites consisten en marcar la frontera en la cual el suelo pasa de un estado a otro con un contenido de humedad específico en relación a la masa seca del suelo. El contenido de humedad cuando el suelo pasa de estado líquido a estado plástico es conocido como el Limite Líquido (LL). El contenido de humedad cuando el suelo pasa de estado plástico a estado semisólido es conocido como Limite Plástico (LP). Estas fronteras permiten al ingeniero conocer a que humedades puede mantener al suelo en estado plástico y la diferencia entre los límites plástico y líquido es conocido como Índice de Plasticidad (IP), a mayor IP más plástico es un suelo y viceversa

a menor IP menos plástico es el suelo.³ Las arcillas tienen un IP alto mientras que los limos tienen un IP muy bajo, conociendo esto el ingeniero ya puede categorizar al suelo que está siendo ensayado. Valga recalcar que para estos ensayos se toma en cuenta únicamente la porción del suelo que pasa por el Tamiz No 40 es decir las arenas, limos y arcillas.

Pero en campo el procedimiento es distinto, para diferenciar a los granos finos entre limos y arcillas se realizan tres ensayos manuales que son: dilatancia, resistencia seca y tenacidad.

1.1.4.1 Dilatancia.

Para este ensayo, se toman en cuenta únicamente las partículas que pasan por el tamiz No 40. Con el suelo humedecido se realiza una pastilla de aproximadamente 10 cm³, el contenido de agua del suelo debe ser tal como para dejar al suelo suave mas no pegajoso. Tomar la pastilla y arrojar horizontalmente entre las dos manos repetidas veces hasta lograr que aparezca agua en la superficie de la pastilla cambiando a un aspecto brillante. Apretar con los dedos la pastilla y fijarse como desaparece el brillo y el agua hasta lograr que el suelo llegue a estar tieso provocando un agrietamiento o desmoronamiento del mismo. Ahora, dependiendo de la rapidez con que apareció el agua cuando se arrojó la pastilla horizontalmente y la rapidez con que desapareció el agua al apretarla con los dedos, se tiene una idea de las características de los finos con los que se está trabajando. En el caso de las arenas limpias reaccionan de una manera rápida y notoria. Las arcillas no tienen reacción en ninguno de los dos casos. Por último, los limos inorgánicos tienen una reacción rápida pero moderada.⁴

1.1.4.2 Resistencia al Estado Seco.

Para este ensayo, se toman en cuenta únicamente las partículas que pasan por el tamiz No 40. Con el suelo realizar una pastilla humedeciéndola hasta lograr algo similar a la masilla. Dejar secar al horno, sol o al ambiente. Cuando ya esté seca, romper la pastilla con los dedos y fijarse en la resistencia que pone dicha pastilla a la fractura, tomar en cuenta que el

³⁻⁴ U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. *Manual de Tierras*. Madrid, Editorial Técnica Bellisco, 2da edición, 1974. Página 10-12

espécimen seco aumenta en resistencia mientras más alta sea su plasticidad. Por lo tanto, las arcillas altamente plásticas tienen mucha resistencia para romperse. Los limos inorgánicos y las arenas finas ponen poca resistencia, pero para diferenciar una de la otra se desmoronan o desintegran las pastilla con el fin de sentir la textura de las partículas; las arenas tienen una textura granular mientras que los limos son más suaves con una textura similar a la de la harina.⁵

1.1.4.3 Tenacidad.

Para este ensayo, se toman en cuenta únicamente las partículas que pasan por el tamiz No 40. Realizar un espécimen con un volumen aproximado de 10cm.³, dicho espécimen no debe estar ni muy seco ni muy pegajoso, en el caso de que esté seco humedecerlo un poco y en el caso de que este pegajoso extenderlo con el fin de que pierda agua por evaporación. Ya realizado el espécimen, en una superficie lisa o con las palmas de las manos enrollar la muestra hasta que llegue a un diámetro aproximado de 3mm., repetir el proceso varias veces para que vaya perdiendo humedad hasta que el mismo se pone tieso y finalmente se desmorona dando a entender que ha llegado a su límite plástico. Los trozos restantes, debido al desmoronamiento del espécimen, deben juntarse nuevamente y amasarse hasta que se desmoronen nuevamente. Las arcillas son fáciles de moldear y tardan en agrietarse es decir tienen una alta tenacidad, los limos se agrietan y desmoronan rápidamente ya que tienen una baja tenacidad y las arenas prácticamente no hay como hacerlas rollo.⁶

1.1.5 Características del Suelo

1.1.5.1 Gravas y Arenas.

La diferencia entre gravas y arena se encuentra en que de una manera arbitraria se las separó la una de la otra a partir del tamiz No 4 pero sus propiedades ingenieriles son las mismas. Tanto las gravas como las arenas son de fácil compactación, permeables, no son sensibles ante la humedad ni ante las heladas. Si cuentan con la presencia de finos las

⁵⁻⁶ U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. *Manual de Tierras*. Madrid, Editorial Técnica Bellisco, 2da edición, 1974. Página 12.

propiedades técnicas cambian ya que si comparamos a gravas y arenas con una misma cantidad de finos, las gravas son más permeables, más estables y menos sensibles a la humedad y a heladas que las arenas.

Usualmente, mientras más pequeño es el grano de la arena suele confundirse con el limo debido a que ciertas características son similares ya que disminuye tanto la permeabilidad como la estabilidad frente a la presencia de agua. Pero lo que los diferencia es que la arena en estado seco no tiene cohesión y al tacto es áspera mientras que el limo tiene una ligera cohesión y su consistencia es suave similar a la harina.

1.1.5.2 Limos y Arcillas.

La presencia de limos y arcillas en cualquier suelo es muy importante. Si se encuentra material fino en una grava o en una arena, inclusive en cantidades pequeñas como un 10%, pueden hacer de este suelo una grava virtualmente impermeable o una arena virtualmente impermeable y su efecto sería mayor si se cuenta con gruesos bien graduados. Por otra parte, los gruesos con presencia de material fino pueden verse seriamente afectados frente a una helada sin importar que tan pequeña es la cantidad de finos. En el caso de la arcilla, puede influir positivamente en materiales de grano grueso ya que al momento de compactar el suelo puede actuar como ligante entre las partículas de grava o arena.

Por otra parte, al contar con un suelo fino ya sea limo o arcilla trae una serie de problemas desde el punto de vista ingenieril debido a que el limo y la arcilla sufren cambios físicos notables dependiendo de la cantidad de agua que posean. En el caso de la arcilla en estado seco es capaz de soportar grandes cargas pero al momento de entrar en contacto con el agua su estado cambia tanto que podría convertirse el terreno en un lodazal. El mayor inconveniente en montar estructuras en este tipo de suelo es que el limo y la arcilla tienden a contraerse al secarse y expandirse al estar en contacto con el agua pudiendo afectar a la cimentación de cualquier estructura.

La diferenciación entre limos y arcillas es muy importante ya que los dos suelos finos en estado seco son muy similares y si se llegaron a confundir se podrían cometer graves errores durante una construcción. Para diferenciarlos correctamente es necesario realizar

los 3 ensayos explicados anteriormente de dilatancia, resistencia en estado seco y tenacidad.

Pero entre limos también existe una diferenciación ya que al determinar el límite líquido de un limo se puede también determinar qué tan compresible es, por lo tanto a mayor límite líquido mayor va a ser su compresibilidad (H) y viceversa a menor límite líquido menor va a ser compresibilidad (L).

Al igual que los limos las arcillas también se diferencian por su compresibilidad a través del límite líquido los cuales son directamente proporcionales, por lo tanto el SUCS especifica que las arcillas pueden tener alta compresibilidad o alto límite líquido (H) y baja compresibilidad o bajo límite líquido (L).

1.1.5.3 Materia Orgánica.

Estos suelos se caracterizan por su color negro u oscuro y un olor a putrefacción. Desde el punto de vista ingenieril este tipo de suelos no son convenientes debido a que se suelen crear huecos o vacíos en el suelo debido a la putrefacción de la materia orgánica por lo tanto cambia las características físicas del mismo, las turbas, por ejemplo, son suelos que están compuestas por materia orgánica en proceso de descomposición. Por la presencia de materia orgánica se puede llegar a cambiar la clasificación de limos y arcillas a limos de baja plasticidad o arcillas de media y alta plasticidad debido a que la materia orgánica influye en la plasticidad de los finos. El límite líquido puede también verse afectado por la presencia de materia orgánica ya que este tiende a incrementarse al igual que el límite plástico pero no influye en el índice de plasticidad. En el caso de las arcillas con materia orgánica se diferencian de las arcillas inorgánicas debido a su textura, la cual es esponjosa.

1.1.6 Clasificación de Suelos.

Normalmente los suelos en estado natural suelen encontrarse mezclados es decir que raras veces alguien se va a topar solo con una grava, una arena, un limo o una arcilla por separado, es por eso que el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos caracteriza y categoriza a los suelos dependiendo de su tamaño de grano, granulometría, plasticidad y

compresibilidad. Las divisiones son: granos gruesos, granos finos y suelo orgánico. Los granos gruesos se identifican a través de un ensayo visual mientras que los granos finos se identifican a través de pruebas manuales. Los suelos orgánicos se identifican por su olor, color y textura.

1.1.6.1 Clasificación en el Campo.

En primer lugar segregarse las partículas mayores a 3". Observar el material y apreciar si el 50% de las partículas o más pueden ser diferenciadas a simple vista si es así se clasificará como grano grueso de lo contrario será grano fino.

En el caso de que el suelo sea un grano grueso hay que proceder a clasificarlo entre grava o arena; si el 50% de los granos o más es superior al tamiz No 4 entonces será grava de lo contrario se clasificará como arena.

Si se tiene una grava, esta se subdivide en grava "limpia" es decir que carece o no tiene finos o grava "sucias" la cual tiene una cantidad de finos apreciable. Las gravas "limpias" pueden ser bien graduadas (GW) o mal graduadas (GP) dependiendo de la granulometría como se explicó anteriormente en *Graduación*. Las gravas "sucias" debido a su contenido de finos pueden ser de dos tipos dependiendo del fino que posean; si se cuenta con un finos no plásticos será una grava limosa (GM) si se cuenta con finos plásticos será una grava arcillosa (GC).

Si el suelo es una arena, el proceso es el mismo que el utilizado para las gravas; es decir que se puede contar con arenas "limpias" bien graduadas (SW) o mal graduadas (SP) y en el caso de las arenas "sucias" dependiendo si tienen finos plásticos arenas arcillosas (SC) o si tienen finos no plásticos arenas limosas (SM).

En el caso de que el material sea un grano fino se lo clasifica entre limo, arcilla u orgánico a través de los ensayos de tenacidad (reacción al agitado), resistencia en estado seco (características de rompimiento) y tenacidad (consistencia cerca del límite plástico)⁷ los

⁷ U.S. Department of the Interior. Bureau of Reclamation. *Manual de Tierras*. Madrid, Editorial Técnica Bellisco, 2da edición, 1974. Página 12

cuales ya fueron explicados en *Humedad del suelo*. Básicamente, se puede clasificar a los finos en limos de alta plasticidad (MH), limos de baja plasticidad (ML), arcillas de alta plasticidad (CH), arcillas de baja plasticidad (CL), suelos orgánicos de alta plasticidad (OH) y suelos orgánicos de baja plasticidad (OL).

En ocasiones, el suelo pertenece a dos grupos de clasificación tanto por su granulometría como por sus características de plasticidad, en estos casos se clasifica al suelo con los dos grupos separándolos con un guion por ejemplo: GW-GM. Así mismo, pueden existir varias combinaciones en el caso de que el suelo de grano grueso esté cercano al límite de grano fino, en este caso se lo clasifica primero como grueso y luego como fino. Por ejemplo: SC-CH.

En el caso de los granos finos, estos pueden estar en la frontera entre alto límite líquido y bajo límite líquido y a su vez entre limos y arcillas, en el caso de que se encuentre entre limos y arcillas el límite líquido va a ser el mismo siempre. Por ejemplo: ML-MH si se encuentra en la frontera de alto límite líquido y bajo límite líquido o MH-CH si se encuentra en la frontera entre limo y arcilla. También pueden existir mezcla de finos con suelo orgánico, por ejemplo: CH-OH.

1.1.6.2 Clasificación en Laboratorio.

Además de la clasificación manual-visual el SUCS propone realizar una serie de ensayos en laboratorio para que la clasificación del suelo sea más exacta. Los ensayos a realizarse son los de granulometría y límites Atterberg. Por otra parte, ensayos que permitan determinar la resistencia al esfuerzo cortante, la compresibilidad y la permeabilidad. Con todos estos valores ya es posible clasificar al suelo.

Al realizar la granulometría del material, en el caso de que este sea de grano grueso, ya se puede diferenciar si la grava o la arena son “limpias” o “sucias” al determinar el porcentaje de material que pasa por el tamiz 200. Si el porcentaje de finos es menor al 5% se puede considerar a la grava o arena como limpia, si el porcentaje de finos es del 12% o mayor será considerada la grava o arena como “sucia”. A través de la granulometría también se pueden determinar los coeficientes de uniformidad y de curvatura con el fin de definir si la

grava o arena está bien graduada o mal graduada. El coeficiente de uniformidad (C_u) es la relación que existe entre el tamaño o diámetro por el cual pasa el 60% del material y el tamaño o diámetro por el cual pasa el 10% del material por lo tanto:

Ecuación 1.3

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

Dónde:

C_u = Coeficiente de uniformidad.

D_{60} = Tamaño o diámetro por el cual pasa el 60% del material.

D_{10} = Tamaño o diámetro por el cual pasa el 10% del material.

El coeficiente de curvatura (C_c) es el resultado del cuadrado del tamaño o diámetro por el cual pasa el 30% del material dividido por el producto del tamaño o diámetro por el cual pasa el 60% del material y el tamaño o diámetro por el cual pasa el 10% del material. Por lo tanto:

Ecuación 1.4

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

Dónde:

C_c = Coeficiente de curvatura.

C_{30} = Tamaño o diámetro por el cual pasa el 30% del material.

D_{60} = Tamaño o diámetro por el cual pasa el 60% del material.

D_{10} = Tamaño o diámetro por el cual pasa el 10% del material.

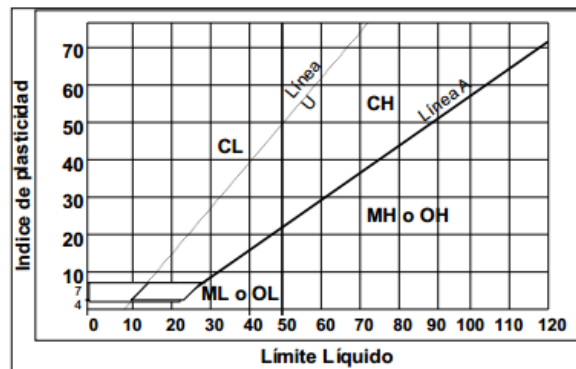
En el caso de las gravas, si el coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor a 4 y el coeficiente de curvatura (C_c) se encuentra entre 1 y 3 entonces se considera a la grava bien graduada es decir GW caso contrario será una grava mal graduada GP. Para las arenas, si el coeficiente de uniformidad (C_u) es mayor a 6 y el coeficiente de curvatura (C_c) se encuentra entre 1 y 3 entonces se considera a la arena bien graduada es decir SW caso contrario será una arena mal graduada SP.

Para las gravas o arenas que contienen un porcentaje de finos mayor al 12% o “sucias” es necesario determinar si estas son limosas o arcillosas, lo cual hay como determinar a través de los ensayos de límites Atterberg en laboratorio. Si el IP del fino es menor a 4 y está bajo

la línea “A” del gráfico 1-3 se puede clasificar a la grava o arena como limosa. Si el IP del fino es mayor a 7 y está por encima de línea “A” se puede clasificar a la grava o arena como arcillosa.

Gráfico 1.3 - Carta de Plasticidad

**LIMITES DE ATTERBERG
Carta de Plasticidad**



Línea A = $0,73 (LL - 20)$
Línea U = $0,90 (LL - 8)$

Fuente: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf

Existen dos casos de límites con los que se puede encontrar un suelo, el primero es que su IP se encuentre entre 4 y 7 por lo tanto se podría contar con un GM-GC o SM-SC. El segundo caso podría darse cuando el suelo tiene un porcentaje de finos entre 5% y 12% en este caso podría haber un suelo GW, GP, SW, o SP y a su vez GM, GC, SM o SC.

En el caso de los suelos de grano fino, puede encontrarse MH, CH, OH, ML, CL y OL después de haber realizado los ensayos de límites Atterberg. Con los datos obtenidos de los límites al colocarlos en el gráfico 1-3 se observa que los suelos de grano fino sin contenido orgánico con un índice plástico (IP) mayor a 7 y que se sitúen por debajo de la línea “A” serán clasificados como CL si su límite líquido es menor al 50% o CH si su límite líquido es mayor al 50%. Los suelos de grano fino sin contenido orgánico con un índice de plasticidad (IP) menor a 4 y que se encuentren por encima de la línea “A” serán clasificados como ML si su límite líquido es menor al 50% o MH si su límite líquido es mayor al 50%. Los suelos de grano fino que contengan un índice de plasticidad comprendido entre 4 y 7 serán clasificados como ML-CL. En el caso de los suelos orgánicos, se encuentran por debajo de línea “A” y si su límite líquido es menor al 50% serán OL y si su límite líquido es mayor al 50% serán OH.

Tabla 1.1 - Clasificación de Suelos SUCS

DIVISION MAYOR		SIMBOLO	NOMBRES TIPOOS	CRITERIO DE CLASIFICACION EN EL LABORATORIO	
SUELOS DE PARTICULAS GRUESAS Más de la mitad del material es retenido en la malla número 200 ©	GRAVAS Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por la malla No. 4	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos	DETERMINESE LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA DE LAS CURVA GRANULOMETRICA, DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (fracción que pasa por la malla No. 200) LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE: Menos de 5%: GW, GP, SW, SP; más de 12%: GM, GC, SM, SC. Entre 5% y 12%: Casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles **	
		GP	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos		
		GM	d		Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo
			u		Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla
		GC	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla		
		ARENAS Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por la malla No. 4 PARA CLASIFICACION VISUAL PUEDE USARSE 1/8 cm COMO EQUIVALENTE A LA ABERTURA DE LA MALLA No. 4	SW		Areñas bien graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Cu: mayor de 4. COEFICIENTE DE CURVATURA Cc: entre 1 y 3. $Cu = D_{60}/D_{10}$ $Cc = (D_{30})^2 / (D_{10})(D_{60})$ NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADUACION PARA GW. LIMITES DE ATTERBERG DEBAJO DE LA "LINEA A" O I.P. MENOR QUE 4. LIMITES DE ATTERBERG ARRIBA DE LA "LINEA A" CON I.P. MAYOR QUE 7. Ambos de la "línea A" y con I.P. entre 4 y 7 son casos de frontera que requieren el uso de símbolos dobles
	SP		Areñas mal graduadas, arena con gravas, con poca o nada de finos.		
	SM		d	Areñas limosas, mezclas de arena y limo	
			u	Areñas arcillosas, mezclas de arena y arcilla	
	SC		Areñas arcillosas, mezclas de arena y arcilla		
	SUELOS DE PARTICULAS FINAS Más de la mitad del material pasa por la malla número 200 © Las partículas de 0.074 mm de diámetro (la malla No. 200) son, aproximadamente, las más pequeñas visibles a simple vista.		LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido Menor de 50	ML	Limos inorgánicos, polvo de roca, limos arenosos o arcillosos ligeramente plásticos		g-Grava, S-Arena, O-Suelo Orgánico, P-Turba, M-Limo, C-Arcilla, W-Bien Graduado, P-Mal Graduado, L-Baja Compresibilidad, H-Alta Compresibilidad CARTA DE PLASTICIDAD (S.U.C.S.)
		CL		Arcillas inorgánicas de baja o media plasticidad, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas pobres	
OL		Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
LIMOS Y ARCILLAS Limite Líquido Mayor de 50		MH	Limos inorgánicos, limos micáceos o diatomáceos, más elásticos		
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas francas.		
		OH	Arcillas orgánicas de media o alta plasticidad, limos orgánicos o de media plasticidad.		
SUELOS ALTAMENTE ORGANICOS		P	Turbas y otros suelos altamente orgánicos.		

Fuente: http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5184475&fecha=01/04/2011

1.2 Clasificación AASHTO.

El sistema AASHTO fue propuesto por el Highway Research Board's Committee para la clasificación de materiales subrasantes y caminos de tipo granular en 1945⁸ y es una clasificación utilizada generalmente para carreteras. Este sistema puede clasificar al suelo dentro de 8 grupos que van desde el A-1 hasta el A-8 donde los suelos de grano grueso se encuentran en el A-1, A-2 y A-3 mientras que los suelos de grano fino están en el A-4, A-5, A,6 y A-7. En el grupo A-8 se encuentran los lodos, turbas y los suelos con un contenido orgánico alto, los cuales por clasificación visual son asignados a este grupo. Otro factor para evaluar a que grupo pertenecen es el "índice de grupo" el cual se obtiene a partir de la siguiente fórmula:

Ecuación 1.5

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde:

IG = Índice de grupo

F = Porcentaje que pasa por el tamiz No 200 expresado en números enteros.

LL = Límite líquido.

IP = Índice de plasticidad.

El IG debe ser en números enteros y en el caso de que sea negativo será igual a 0. El objetivo del "índice de grupo" IG es proporcionar una calidad relativa al suelo que se va a utilizar y se lo coloca entre paréntesis después del grupo al que pertenece. Por ejemplo: A-1 (5)

Para colocar al suelo en uno de estos grupos, se deben obtener previamente los datos de granulometría, límite líquido e índice de plasticidad. Cuando el porcentaje del suelo que pasa por el tamiz No 200 es menor o igual al 35% de la masa total será considerado un suelo granular (A-1, A-2 y A-3) y si más del 35% de la masa total del suelo pasa por el tamiz No 200 será considerado un suelo fino (A-4, A-5, A,6 y A-7). Los suelos granulares se dividen en gravas y arenas, por lo tanto gravas serán aquellas que pasen el tamiz de 3" y

⁸ Braja M. Das. *Principios de Ingeniería de Cimentaciones*. Sacramento, International Thompson Editores, Edición No 4, 2001, Pg 35.

son retenidas en el tamiz No 10 mientras que las arenas son aquellas que pasan por el tamiz No 10 y son retenidas por el tamiz No 200. Como ya fue mencionado anteriormente los finos son todos aquellos que pasan por el tamiz No 200.

Como se puede apreciar en la tabla 1-3 en el grupo 7 existen 2 grupos, el A-7-5^a y el A-7-6^b. Un suelo será A-7-5^a cuando su Índice de Plasticidad sea menor o igual a la resta del Límite Líquido menos 30, es decir: $IP \leq LL - 30$, y será un A-7-6^b cuando su Índice de Plasticidad sea mayor a la resta del Límite Líquido menos 30, es decir: $IP > LL - 30$.

Para clasificar a un suelo utilizando la tabla 1-3 se debe ir de izquierda a derecha y será por descarte.

Tabla 1.2 - Clasificación de Suelos AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasan por la malla no. 200)						
	A-1			A-2			
Clasificación del grupo	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-12-6	A-2-7
Análisis por cribas (%)							
Malla no. 10	50 máx						
Malla no. 40	30 máx	50 máx	51 mín				
Malla no. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx
Para la fracción que pasa la malla no. 40							
Límite líquido (LL)				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad (PI)	6 máx		No plástico	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipo usual de material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Calificación de la capa	Excelente a buena						
Clasificación general	Materiales de lodo y arcilla (Más del 35% de la muestra total pasa por la malla no. 200)						
Clasificación del grupo	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 ^a A-7-6 ^b			
Análisis por cribas (%)							
Malla no. 10							
Malla no. 40							
Malla no. 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín			
Para la fracción que pasa la malla no. 40							
Límite líquido (LL)	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín			
Índice de plasticidad (PI)	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín			
Tipo usual de material	Principalmente suelos limosos		Principalmente suelos arcillosos				
Calificación de la capa	Regular a pobre						
* Si $PI \leq LL - 30$, es un A-7-5.							
* Si $PI > LL - 30$, es un A-7-6.							

Fuente: <http://ingenieriaviltips.blogspot.com/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos.html>

CAPÍTULO 2: MAQUINARIA DE COMPACTACIÓN

Para definir la maquinaria que se ocupa para compactar el suelo es necesario definir qué es la compactación. La compactación se refiere al proceso mecánico en el cual se provoca una mayor compacidad de las partículas del suelo reduciendo el número de vacíos con el fin de mejorar sus propiedades geomecánicas. La importancia de la compactación radica en que para fines constructivos es necesario mejorar la resistencia del suelo para que este pueda soportar las cargas a las que va a ser sometido en un futuro, reduciendo así su capacidad de deformación, como también el esponjamiento, la contracción y la permeabilidad.

2.1 Motoniveladora.

La motoniveladora es la máquina más utilizada en el medio para realizar el extendido del material y su nivelación para la posterior compactación. El movimiento de tierras capaz de realizar es de corta distancia pero de grandes cantidades. A pesar de que en esta investigación se pone énfasis en la compactación esta máquina puede realizar más funciones aparte de la de preparar el terreno para la compactación como es: desbroce de terrenos, apertura de cunetas que incluye acarreo del material extraído, regulaciones y refino de taludes, mezcla de materiales, entre otros⁹. Debido a sus múltiples funciones el operador debe estar sumamente capacitado para trabajar con una motoniveladora. La máquina está compuesta principalmente por chasis, cuchilla, ejes, ruedas y accesorios que podrían complementar el trabajo.

2.1.1 Chasis.

Durante el trabajo del extendido del material el chasis está sometido a esfuerzos bastante importantes por lo tanto este debe ser lo suficientemente resistente. Está conformado de una o un par de vigas en “U” o en forma de cajón.³

⁹ Pedro Barber Lloret. *Maquinaria de Obras Públicas II: máquinas y equipos*. España. Editorial Club Universitario. 4ta Edición, 2009, pg. 212.

2.1.2 Cuchilla.

La cuchilla es hecha de acero, su forma es curva y diseñada de tal manera para que el material que está siendo acarreado no se desborde por la parte superior de la cuchilla. El objetivo es que al momento de realizar el tendido del material éste se desborde por los lados de la cuchilla y dependiendo de para qué lado con respecto al eje esté girada la cuchilla, el material se desbordará por la derecha o por la izquierda. La posición de la cuchilla puede ser vertical inclinada o inclusive completamente horizontal con respecto al eje de la máquina esta posición depende de las necesidades que se tengan durante el trabajo. Se ubica en el centro de la máquina con el objetivo de que las llantas delanteras sean las que libren los obstáculos del terreno para evitar dejar el terreno con desniveles. Un anillo móvil dotado con una corona dentada es el sistema encargado de soportar y dar movimiento a la cuchilla otorgándole así un giro de hasta 360 grados ya que las llantas delanteras y traseras están lo suficientemente separadas como para permitir este movimiento. Para subir o bajar la cuchilla se cuenta con unos brazos hidráulicos de elevación.

2.1.3 Ejes.

El eje delantero tiene una forma curva para dejar un espacio mayor entre el eje y el suelo. El suelo con el que normalmente trabaja la motoniveladora es suelo suelto por lo tanto se trata de evita que el eje tope con el suelo cuando estos están hecho montículos.

2.1.4 Ruedas.

La máquina puede contar con 6 o 4 ruedas, 2 delanteras y 2 traseras o 2 delanteras y 4 traseras. Las llantas delanteras tienen una peculiaridad y es que pueden inclinarse para brindar un mayor apoyo cuando se está realizando un trabajo en una ladera por ejemplo ya que en este caso la cuchilla se encuentra salida totalmente a un lado de la motoniveladora y el empuje que se genera es bastante fuerte por lo tanto para controlar este esfuerzo de la máquina se inclinan la llantas.

2.1.5 Accesorios.

Para complementar cualquier tipo de trabajo pueden incluirse accesorios tales como: escarificador, ripper corta taludes, limpiador a de nieves, hoja de empuje, etc.

Gráfico 2.1 Motoniveladora



Fuente: <http://www.dconstruccion.cl/?p=12109.11-03-2014>

2.2 Máquinas Utilizadas para la Compactación de Suelos.

La maquinaria que se va a ocupar exclusivamente para la compactación del suelo va a depender del tipo de suelo y sus propiedades. Existen varios tipos de máquinas compactadoras en el mercado para realizar esta labor, para que la compactación sea correctamente realizada en ocasiones se combinan las acciones de dos o más equipos para conseguir un correcto resultado. A la maquinaria se la divide dependiendo de la acción que esta produzca en el suelo; pueden compactar por carga Estática o por carga Dinámica, esta última se subdivide en carga dinámica por impacto, por vibración o dinámica con oscilación.

2.2.1 Maquinaria de Carga Estática.

Esta maquinaria consigue llegar a la compactación a través de una carga continua por parte del equipo en el área de contacto con el suelo ejerciendo así una presión constante provocando un agrupamiento de las partículas; a este efecto se le suma el número de

pasadas que da el equipo generando una carga y descarga. Asimismo, en estos equipos se pueden encontrar algunos tipos como son:

Rodillos de llanatas lisas	Rodillos de cilindros con salientes	Rodillos de Neumáticos
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Un Tambor		
<input type="checkbox"/> Doble Tambor		

2.2.1.1 Rodillo de Llantas Lisas:

Pueden ser un tambor o dos tambores, los rodillos lisos de dos tambores son más conocidos como tándem, también pueden ser remolcados o autopropulsados. El peso de cada equipo en nuestro medio, según las especificaciones MOP – 001 – F – 2002, es:

- Rodillos remolcados entre 14 y 20 ton.
- Rodillos lisos de tres ruedas o de un tambor entre 10 y 12 ton.
- Tándem o rodillos de 2 tambores entre 8 y 10 ton.

El material o el suelo en el cual pueden trabajar este tipo de maquinaria es en suelos granulares. El problema de esta maquinaria radica en que consigue una compactación más superficial que profunda es por eso que al pasar de los años fue remplazado por los equipos vibratorios.

Gráfico 2.2 - Tándem o Rodillo Liso de 2 Tambores



Fuente:

http://lastloopstudio.com/nemjoomla/index2.php?page=shop.browse&category_id=21&option=com_virtuemart&Itemid=56&pop=1&tmpl=component

Gráfico 2.3 - Rodillo Liso de un Tambor



Fuente: <http://www.atlascopco.com.pe/pees/products/product.aspx?id=3522630>

2.2.1.2 Rodillo de Cilindro con Salientes.

2.2.1.2.1 Rodillo Pata de Cabra.

Este tipo de rodillos puede ser remolcado o autopropulsado, en general los rodillos autopropulsados tienen más movilidad en campo que los remolcados. El cilindro posee unas salientes denominadas “patas de cabra” y está constituido por un chasis en el cual va dicho cilindro que está situado en la parte frontal de la máquina o por dos cilindros los cuales van uno en la parte delantera y otro en la parte trasera. Se puede encontrar cilindros con un diámetro entre 1 y 1.80 m. y una longitud entre 1.20 y 2 m. El espesor máximo de la capa a compactar que puede compactar este equipo es de 20 cm. y es necesario darle un mínimo de 6 a 8 pasadas para lograr una correcta compactación. Los suelos en los cuales puede trabajar este equipo son en suelos cohesivos mas no es muy recomendable en suelos granulares como gravas o arenas. Una característica especial de este equipo es que une perfectamente la capa que se va a compactar con la ya compactada ya que los 6 últimos centímetros que dan a la superficie quedan irregulares permitiendo una buena adherencia con la siguiente capa. Al igual que en los rodillos lisos, este equipo está siendo reemplazado por equipos con idénticas características pero vibratorios.

Gráfico 2.4 - Rodillo Pata de Cabra



Fuente: <http://www.agroads.com.ar/detalle.asp?clasi=226633>

2.2.1.2.2 Rodillo de Rejilla.

Puede considerarse como una variante del rodillo pata de cabra pero en lugar de los salientes se cuenta con huecos formando un cilindro con una especie de malla. Este rodillo se suele utilizar en aquellos suelos que necesitan una disgregación como pueden ser arcillas homogéneas o mezclas de arenas, limos y arcillas.

2.2.1.2.3 Rodillo de Segmentos.

Otra variante del rodillo pata de cabra solo que en lugar de pequeñas salientes posee rectángulos alargados. Su trabajo es el intermedio entre un rodillo pata de cabra y un rodillo liso. La principal característica de este rodillo es que posee un dispositivo que permite girar los rectángulos alargados de tal forma que trabajen como una pata o como un segmento. De igual manera, pueden recogerse las patas alargadas permitiendo trabajar a este rodillo como un rodillo liso. Los suelos que son recomendables para trabajar con este equipo son aquellos que requieran de una disgregación pero su uso se ha extendido también a limos y arcillas no muy plásticas.

2.2.1.3 Rodillo Neumático.

El trabajo de este equipo radica en la elevada presión que produce cada neumático por unidad de área generando una deformación plástica del suelo. El rodillo neumático está conformado por 3, 4 o 5 neumáticos alineados en la parte delantera y 4, 5 o 6 neumáticos alineados en la parte trasera, cada neumático es de caucho y posee un movimiento independiente hacia arriba o hacia abajo. La posición de los neumáticos traseros cubre cada espacio libre dejado por los neumáticos delanteros solapándose de 20 a 40 mm. Los rodillos neumáticos son recomendables para trabajar en la compactación de mezclas bituminosas y su utilización en suelos queda reducida únicamente para realizar una mejora a la calidad superficial ya que es una maquinaria buena para realizar compactación superficial y a medida que aumenta la profundidad de la tongada disminuye la calidad de la compactación.

Gráfico 2.5 - Rodillo Neumático



Fuente: <http://almafuertheconstrucciones.blogspot.com/>

2.2.2 Maquinaria de Carga Dinámica.

2.2.2.1 *Por Impacto.*

Éste tipo de compactación se origina al dejar caer un peso desde una determinada altura produciendo un impacto en el suelo con el objetivo de generar un agrupamiento de partículas a través de ondas de presión en la masa del suelo.

Un ejemplo de la compactación por impacto es el pisón de explosión y el pisón por caída libre.

2.2.2.1.1 *Pisón de Explosión.*

Estos equipos funcionan a través de una explosión que produce el motor generando un impacto de la máquina contra el mismo suelo a través del cual se logra una elevación del equipo de hasta 20 cm. y genera un segundo impacto en la caída. La presión que ejerce va a depender del peso de la máquina y la altura que alcance. Debido a su tamaño no se pueden cubrir grandes áreas de trabajo como con los rodillos vibro-compactadores ya que llevaría mucho tiempo, pero son muy eficaces para zonas de difícil acceso como zanjas, bordes de terraplenes, cimientos de edificios, entre otros.

Gráfico 4 – Pisón de Explosión



Fuente: <http://1701.ar.all.biz/pisones-y-vibrocompactadores-tremix-y-macromaq-g7002>

2.2.2.1.2 Pisón por Caída Libre.

Este método consiste en dejar caer una masa a una determinada altura. La masa es una placa que cuyo peso puede variar entre las 2 y las 3 toneladas. La superficie de contacto con el suelo es de aproximadamente 0.5 m². Ésta masa, se eleva a través de cables a una altura de 1.50 o 2 m. con respecto al suelo y son ayudados por algún otro tipo de maquinaria como puede ser una grúa, excavadora, etc. Debido al procedimiento de este equipo se obtienen frecuencia bajas que oscilan entre 5 y 20 golpes por minuto. El pisón de caída libre no puede ser utilizado en zonas de difícil acceso, es recomendable usarlo para la compactación de suelos rocosos debido a la fuerza que produce su caída.

2.2.2.2 Por Vibración.

El efecto de vibración en la maquinaria es el más utilizado hoy en día para la compactación de suelos, dicho efecto conlleva una serie de fenómenos físicos producidos en el suelo que llevan al mismo a una compactación final de excelente calidad. Cuando se produce la compactación vibratoria existen una serie de teorías (Lloret, 2009) “las basadas en el fenómeno de resonancia suelo-compactador, las basadas en la presión dinámica ejercida por el suelo, las basadas en el concepto del impacto mecánico.” Durante la compactación vibratoria se puede apreciar que se producen dos movimientos distintos; el primero

consiste en un reacomodamiento de las partículas debido a la vibración las cuales quedarán asentadas permanentemente una vez que cese la vibración, el segundo es un movimiento oscilatorio de las partículas ya que estas al ser sometidas a una presión y esfuerzo su inmediata reacción es comprimirse y expandirse.

Tomando en cuenta únicamente al rodillo, este está dotado de un movimiento vibratorio y a su vez rotacional para dar lugar a un desplazamiento. El movimiento vibratorio se genera a partir de masas excéntricas que posee el rodillo en su interior que al momento de girar a gran velocidad producen este fenómeno. Al ser una vibración posee una frecuencia la cuál es calculada a partir de las masas internas del rodillo y la excentricidad de dichas masas con las cuales se puede obtener el momento excéntrico y con este último la frecuencia. Un factor que puede afectar a la frecuencia de vibración del equipo es el suelo ya que puede entrar en resonancia con la vibración y aumentar la amplitud; al aumentar la amplitud se incrementan los efectos de compactación del material. La frecuencia del equipo se mide en vibraciones por minuto y pueden estar en el orden de las 1100 a las 4500 v.p.m. dependiendo del rodillo con el que cuente el equipo. La fuerza producida por la rotación de las masas excéntricas dentro del rodillo va a producir una fuerza centrífuga, a esta fuerza también hay que tomarla en cuenta para el fenómeno de “despegue.” La velocidad recomendada de los rodillos está entre 3 y 6 km/h. Por lo tanto, los parámetros que intervienen en todo el proceso de la vibro-compactación son:

- El peso estático del equipo.
- La amplitud.
- La frecuencia.
- La fuerza centrífuga.
- Velocidad del rodillo.

El fenómeno de “despegue” se da cuando al estar trabajando con alto impacto, el tambor al momento de golpear con el suelo, el suelo no absorba toda la energía del impacto sino que devuelva parte de la misma generando una velocidad inicial ascendente para el próximo ciclo de rotación de las masas excéntricas por lo tanto ya no va a iniciar la rotación con una velocidad inicial en reposo. A esta velocidad inicial existente se le suma el impulso otorgado por la fuerza centrífuga que ya posee el rodillo provocando que el rodillo llegue a

una altura superior a la teórica, como consecuencia cuando va a empezar el próximo ciclo rodillo no alcanza a topar el suelo. A pesar de que la máquina trabaje con este fenómeno su eficiencia sigue siendo la misma solo incrementan los impactos. Hay que tener en cuenta que la amplitud va a ser mayor a la amplitud teórica por lo tanto no es recomendable para el sistema de amortiguadores del equipo.

2.2.2.2.1 Rodillo Vibrante Remolcado.

Está conformado por un marco o chasis el cual es soportado elásticamente por un rodillo vibratorio. La unión chasis-rodillo cuenta con un sistema de amortiguación diseñado para que el rodillo vibre y esta vibración no sea transmitida al chasis. Encima de dicho marco se encuentra un motor de combustión interna el cual es el encargado de proporcionar la vibración necesaria al rodillo. Al ser un equipo remolcado, necesita de un equipo extra para su operación. La maniobrabilidad del rodillo vibrante remolcado es muy reducida, su radio de giro es muy grande y al necesitar de un equipo extra con la suficiente potencia para remolcarlo el coste horario es muy elevado, es por esto que han sido reemplazados por los autopropulsados.

Gráfico 2.7 – Rodillo Vibrante Remolcado



Fuente: <http://miguelangelnoll.blogspot.com/2010/09/tractores-con-rulo-compactador.html>

2.2.2.2.2 Rodillo Vibrante Autopropulsado.

En este caso existen dos tipos el rodillo vibrante autopropulsado de un tambor o el de dos tambores (tándem).

El rodillo vibrante autopropulsado de un tambor cuenta con un cilindro vibratorio en la parte frontal y dos llantas en el eje trasero. A comparación del remolcado, su velocidad de operación y su maniobrabilidad son mayores. La tracción puede ser producida por las dos llantas traseras o si se necesita más tracción, por las dos llantas traseras y el cilindro. Este es uno de los equipos más utilizados en obra, especialmente en la compactación de suelos granulares. Las dimensiones del diámetro del cilindro oscilan entre los 0.9 y 1.5 m. y el ancho se encuentra entre los 1.2 y 2.4 m. para los rodillos de uno y dos tambores. Asimismo, la frecuencia de vibración está entre las 2000 y 3000 vibraciones por minuto dependiendo del modelo y fabricante. Cuenta con 2 chasis articulados en la parte central permitiendo diferenciar perfectamente la cabina de operación del equipo y el cilindro. El peso de esta máquina es cercano a las 10 toneladas dependiendo del equipo y el modelo el peso puede incrementarse o disminuirse.

Gráfico 2.8 – Rodillo Vibrante Autopropulsado de Un Tambor



Fuente: <http://www.interempresas.net/ObrasPublicas/FeriaVirtual/Producto-Rodillo-vibratorio-autopropulsado-Bomag-BW-213-DH-BVC-Variocontrol-39542.html>

En el caso del rodillo vibrante autopropulsado tándem, cuenta con dos cilindros, uno en la parte frontal y otro en la parte posterior siendo al menos uno de estos tractor, el cual suele ser el cilindro posterior. Actualmente se cuenta con modelos que poseen vibración y tracción en ambos cilindros aumentando el efecto de compactación. Las dimensiones y frecuencias del equipo ya fueron mencionadas anteriormente en los rodillos vibrantes

autopropulsados de un tambor, el peso del equipo actualmente puede llegar a ser superior a las 15 toneladas. El puesto del operador se sitúa entre los dos tambores.

Gráfico 2.9 – Rodillo Vibrante Autopropulsado Tándem



Fuente: <http://www.interempresas.net/ObrasPublicas/FeriaVirtual/Producto-Rodillo-vibrante-tandem-Bomag-BW-174-AD-3059.html>

2.2.2.2.3 Rodillo Vibrante Manual (Dúplex)

Este rodillo es un equipo pequeño que cuenta con dos rodillos, uno tras de otro, un asa central y dos ranuras laterales con fines de transporte; el motor se encuentra encima de los rodillos el cual brinda la vibración al equipo. La característica principal es su versatilidad en trabajos de campo como aparcamientos, tramos asfálticos pequeños o reparación de carreteras. La compactación que produce en profundidad es muy buena y con pocas pasadas pero la compactación de superficie es deficiente. Obviamente el rendimiento es menor que los rodillos vibrantes autopropulsados debido a su tamaño.

Gráfico 2.10 – Rodillo Vibrante Manual (Dúplex)



Fuente: <http://www.emopyc.com/emopyc/maquinaria/List/listing/rodillos-manuales-129/1.html>

2.2.2.2.4 Bandeja Vibrante.

Es una placa metálica generalmente rectangular unida a un elemento vibrante, dotado de dicha vibración gracias a un motor que se encuentra encima. Cuenta con un brazo guía para que el operador maniobre la máquina. La placa está dotada por un movimiento horizontal, adelante y atrás, el cual permite una progresión y por un movimiento vertical y cual permite la vibración; a este movimiento se lo conoce como movimiento sinusoidal oblicuo. Este equipo se ocupa para trabajos pequeños o para complementar trabajos realizados por maquinaria de mayor envergadura debido a su versatilidad para trabajar en lugares de difícil acceso tales como zanjas, cimentaciones, etc.

Gráfico 2.11 – Bandeja Vibrante



Fuente: <http://www.ferrovicmar.com/herramientas-electricas.asp?producto=bandeja-vibrante-610170>

2.2.2.3 Por Oscilación.

Una variante de la compactación vibratoria es la compactación por oscilación, el principio oscilatorio es el siguiente; se utilizan dos ejes gemelos con masas en posiciones opuestas y rotando sincronizadamente. De esta forma el terreno es compactado por repetidas anulaciones de las tenciones de cizallamiento (Lloret, 2009, pg. 235).

2.3 Tabla para la Selección de la Maquinaria.

Tabla 2.1 – Compactación de Suelos Firmes

TIPO DE COMPACTADOR	SUELOS DONDE SE UTILIZA	ESTADO ACTUAL DE USO
ARRASTRADO LISO VIBRANTE	Suelos granulares y algunos plásticos dependiendo de su peso	Cada día se usa menos salvo los muy pesados en pedraplenes.
ARRASTRADO PATA DE CABRA VIBRANTE	Arcillas, limos arcillosos, arcillas limosas y grava con aglutinantes arcillosos	Prácticamente en desuso.
ARRASTRADO DE PISIONES VIBRANTE	Arcillas, limos arcillosos, arcillas limosas, arcillas arenosas y grava	Se utiliza muy poco
AUTOPROPULSADO LISO VIBRANTE	Preferentemente suelos granulares y dependiendo del peso, su aplicación puede llegar a suelos plásticos	Es el más popular.
AUTOPROPULSADO DE PISIONES VIBRANTES	Suelos plásticos y granulares	Muy acto para suelos muy difiles (pueden tener tándem).
AUTOPROPULSADO VIBRANTE DE ASFALTO	Asfalto, zahorra y suelos preferentemente granulares	Cada vez es más sustituido por el tándem vibratorio.
TÁNDEM VIBRATORIO	Asfalto y suelos granulares	Es el idóneo par asfalto.
NEUMATICOS	Como cierre en capas asfálticas y en arenas saturadas de agua	Su utilización va disminuyendo debido a los tándem vibratorios
ALTA VELOCIDAD	Suelos plásticos y granulares algo plásticos	En condiciones especiales de extendido y compactación.

Fuente:

http://books.google.com.ec/books?id=5suFwN2q1GMC&pg=PA235&lpg=PA235&dq=maquinaria+de+compactacion+por+oscilacion&source=bl&ots=Te8VZHD_RB&sig=jptF0srSvvPGhOe5Fqyq1fuHpNM&hl=es&sa=X&ei=nfcxU8LsFc_KsQTp-oHIAw&ved=0CFUQ6AEwCA#v=onepage&q&f=false

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA DE COMPACTACIÓN

3.1. Compactación del Suelo en Laboratorio Utilizando un Esfuerzo Estándar de 12400ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³) o Próctor Estándar.¹⁰

3.1.1 Alcance:

El objetivo de este ensayo es determinar la relación que existe entre el contenido de agua de un suelo o un material y su peso unitario seco a través de una curva de compactación. El material será compactado en moldes con un diámetro de 4 o 6 pulgadas, dependiendo el método que se vaya a utilizar, a través de la caída libre de un pisón de 24.5 N a 305 mm de altura el cuál produce finalmente un esfuerzo de compactación de 600 KN-m/m³.

Este ensayo se aplica únicamente a suelos o materiales en los cuales su porcentaje de masa retenida en el tamiz ¾-in sea igual o menor al 30% y no han sido previamente compactados en laboratorio; por lo tanto se sobreentiende que el material no podrá ser reutilizado durante el ensayo.

Existen 3 métodos para realizar este ensayo. El método a utilizarse deberá ser indicado en el informe del ensayo.

- Método A:

Molde: 4 in. de diámetro.

Material: Pasa el tamiz No 4.

Capas: 3.

Número de golpes por capa: 25.

Uso: Este método será utilizado si el 25% de la masa del material o menos es retenida en el tamiz No 4.

Otro uso: Si el requerimiento de gradación del material no cumple con las especificaciones del método, entonces utilizar método B o C.

- Método B:

Molde: 4 in. de diámetro.

¹⁰ ASTM International, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12400ft-lbf/ft³ (600 KN-m/m³))*. West Conshohocken, 2012.

Material: Pasa el tamiz 3/8-in.

Capas: 3.

Número de golpes por capa: 25.

Uso: Este método será utilizado si el 25% de la masa del material o menos es retenida en el tamiz 3/8-in.

Otro uso: Si el requerimiento de gradación del material no cumple con las especificaciones del método, entonces utilizar método C.

- Método C:

Molde: 6 in. de diámetro.

Material: Pasa el tamiz 3/4-in.

Capas: 3.

Número de golpes por capa: 56.

Uso: Este método será utilizado si el 30% de la masa del material o menos es retenida en el tamiz 3/4-in.

El molde de 6-in. de diámetro no deberá ser utilizado en ninguno de los métodos A y B.

En el caso de que el espécimen de ensayo contenga más del 5% de su masa de fracción sobredimensionada y no va a ser incluida dicha masa en el ensayo, deberán hacerse correcciones al peso unitario y al contenido de agua del espécimen en el suelo en campo a través del Ensayo ASTM-D4718.

3.1.2 Terminología.

Esfuerzo Estándar: durante el ensayo de compactación, son los 12400 ft-lbf/ft³ (600kN-m/m³) de esfuerzo de compactación aplicados por el equipo.

Peso Unitario Máximo Estándar en lbf/ft³ (KN/m³): es el valor máximo determinado a través de la curva de compactación usando el método estándar.

Contenido de Agua Óptimo en %: el contenido de humedad para el cual el suelo compactado alcanza la densidad seca máxima.

Fracción sobredimensionada en %: la porción del total del espécimen no utilizada para la conformación del ensayo de compactación. Será la porción total retenida en el tamiz No 4 para el método A, 3/8-in en el método B y 3/4-in en el método C.

Fracción de ensayo en %: la porción del total del espécimen utilizada para la conformación del ensayo de compactación. Será la porción total que pasa el tamiz No 4 para el método A, 3/8-in en el método B y 3/4-in en el método C.

3.1.3 Significancia y Uso.

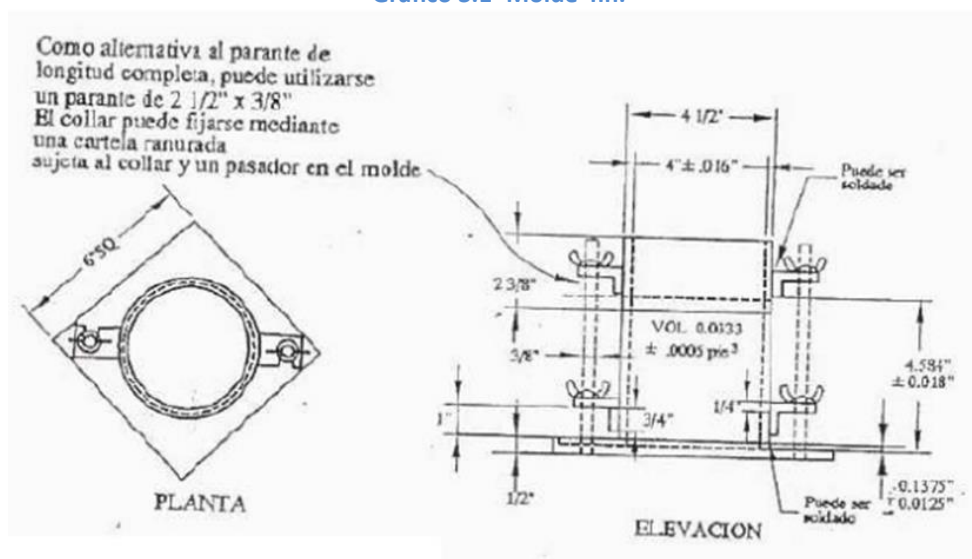
Al momento de realizar trabajos de compactación de suelo en campo ya sean rellenos, terraplenes, mejoramientos, etc. es necesario obtener porcentajes de compactación cercanos al 100% con el fin de obtener un suelo con propiedades ingenieriles satisfactorias tal como son la resistencia al corte, compresibilidad o permeabilidad. En el caso de los suelos para cimentación, suelen ser compactados para mejorar sus propiedades ingenieriles. El ensayo de Proctor Modificado determina las bases para determinar el porcentaje de compactación y el contenido de humedad necesaria para lograr conseguir dichas propiedades ingenieriles con el objetivo de controlar durante la construcción que se ha llegado a los porcentajes de compactación y contenidos de agua deseados.

3.1.4 Equipos.

El molde debe tener una forma cilíndrica y de metal rígido con la capacidad y dimensiones siguientes:

- Molde de 4-in: debe tener 4000 ± 0.016 -in. (101.6 ± 0.4 -mm.) aproximadamente de diámetro interno, una altura de 4.584 ± 0.018 -in. (116.4 ± 0.5 -mm) y un volumen de 0.0333 ± 0.0005 ft³ (943.0 ± 14 cm³).

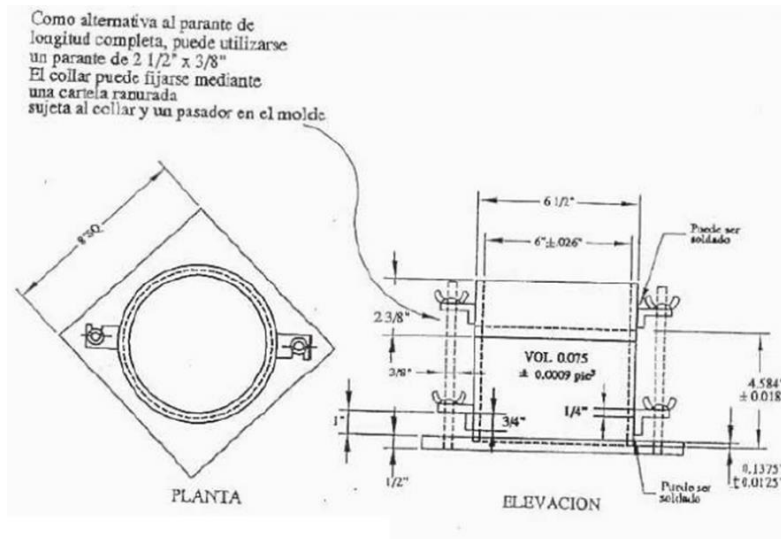
Gráfico 3.1- Molde 4in.



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/29593693/Manual-Proctor-Estándar>

- Molde de 6-in: debe tener 6000 ± 0.026 -in. (152.4 ± 0.7 -mm.) aproximadamente de diámetro interno, una altura de 4.584 ± 0.018 -in. (116.4 ± 0.5 mm) y un volumen de 0.0750 ± 0.0009 ft³ (943.0 ± 14 cm³).

Gráfico 3.2 - Molde 6 in.



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/29593693/Manual-Proctor-Estándar>

Las paredes del molde pueden ser rígidas, divididas o cónicas. Las de tipo “divididas” pueden consistir en dos secciones de medio de círculo cada una o una sección del tubo se divide a lo largo del elemento, en los dos casos las secciones serán unidas de una forma segura para así formar el cilindro y reunir los requerimientos de esta sección. Las de tipo “cónicas” deberán tener un diámetro interno cónico que sea uniforme y no mida más de 0.200in./ft (16.7 mm/m) del alto del molde. Cada molde deberá tener un plato base y un collar de extensión ensamblado que permita asegurar al molde con el plato base, ambos hechos de metal rígido y fabricados de tal forma que permitan ajustar y desajustar fácilmente al molde. El collar de extensión deberá extenderse por lo menos 2.0 in (51 mm) por encima del borde superior del molde formando una sección cilíndrica de al menos 0.75 in. (19.0 mm) por debajo de la misma.

El pisón ya sea manual o mecánico deberá tener una caída libre de 12.0 ± 0.04 in. (304.8 ± 1 mm) desde la superficie del espécimen. El peso del pisón deberá ser de 5.50 ± 0.02 lbf (24.47 ± 0.09 N, o en masa 2.495 ± 0.009 kg). La cara que golpea o tiene contacto con el espécimen a ensayar deberá ser plana y circular con un diámetro de 2.0 ± 0.005 in. (50.80 ± 0.13 mm), si por desgaste el diámetro de dicha cara excede los 2.0 ± 0.01 in. deberá ser reemplazado el pisón.

Un Extractor de Muestras es opcional y es cualquier tipo de mecanismo utilizado para extraer el espécimen del molde.

La balanza deberá contar con una precisión de 0.1-g.

El Horno de Secado deberá ser capaz de mantener una temperatura constante de $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ($110 \pm 5^{\circ}$) durante la cámara de secado. Estas especificaciones normalmente requieren de un horno de ventilación forzada.

La Regla será de metal con una longitud no menor a las 10 in. (250 mm). La longitud total de la regla deberá ajustarse a una tolerancia de ± 0.005 in. (0.1 mm). Si el borde del recorte es más grueso que 1/8 in. (3 mm) deberá ser biselado.

Tamices de $\frac{3}{4}$ in (19.0 mm), $\frac{3}{8}$ in (9.5 mm) y No 4 (4.75 mm) conforme exija la especificación.

Herramientas para Mezclar: puede ser cualquier herramienta que facilite la mezcla del material como cucharones, espátulas, sprays para rociar el agua, entre otros.

3.1.5 Espécimen de Ensayo.

La mínima cantidad de suelo o material en estado seco necesario para en método A y B es de 16 kg. en el caso del método C se requieren 29 kg. por lo tanto la masa húmeda de la muestra obtenida en campo deberá ser de por lo menos 23 kg. y 45 kg. respectivamente. En el caso de que existan partículas sobredimensionadas se necesitará una mayor cantidad de muestra.

Si todavía no se ha realizado la gradación del material, determinar el porcentaje de masa retenido en el tamiz No 4 (4.75-mm), $\frac{3}{8}$ in (9.5-mm) y $\frac{3}{4}$ in (19.0-mm) para seleccionar el método que se va a utilizar en el ensayo ya sea A, B o C respectivamente. Los porcentajes de material retenido en cada tamiz obtenerlo extrayendo una porción representativa de la muestra total.

3.1.6 Preparación del Equipo.

Seleccionar el molde especificado de acuerdo al método seleccionado ya sea A, B o C. Determinar el volumen y la masa del molde con o sin el plato.

Revisar que el molde se encuentre en buenas condiciones, que las paredes del molde y el collar de extensión estén alineados correctamente. El pisón debe estar en buenas condiciones de trabajo y que sus partes no estén flojas ni desgastadas de lo contrario realizar los ajustes necesarios y calibrarlo nuevamente.

3.1.7 Procedimiento.

3.1.7.1 Suelo.

No utilizar suelo que fue previamente compactado en el laboratorio. Utilizar el Método de Preparación Húmedo preferiblemente.

3.1.7.1.1 Método de Preparación Húmedo.

Sin haber secado la muestra previamente, pasar la muestra por el tamiz No 4 (4.75-mm), 3/8 in (9.5-mm) o 3/4 in (19.0-mm) dependiendo el método que se haya elegido A, B o C. Determinar el porcentaje de la masa del material retenido y del material que pasa, a una porción secarla al horno y obtener su contenido de humedad. A la fracción de ensayo, prepararla y obtener 4 sub-especímenes (de preferencia 5) con distintos contenidos de humedad. El contenido de humedad del primer sub-especímen, debe estar cercano a la humedad óptima del material y se lo realizará a través de adición o remoción de agua en el sub-especímen y mezclado; el resto de sub-especímenes deberán tener un contenido de agua determinado de tal forma que al momento de graficar la curva se tengan 2 puntos en el lado seco y 2 puntos en el lado húmedo con una variación entre humedades aproximadamente del 2%. Son necesarios al menos 2 puntos en lado seco y 2 puntos en el lado húmedo del punto óptimo para definir el peso unitario seco en la curva de compactación. En ocasiones se presentan suelos con humedades óptimas muy altas o curvas de compactación relativamente planas, en estos casos se requieren de grandes incrementos en sus contenidos de humedad para obtener una curva bien definida. Los incrementos en el contenido de humedad no deben exceder el 4%.

Para cada sub-especímen, seleccionar 2.3 kg. para el método A o B o 5.9 kg. en el caso del método C. Para obtener cada sub-especímen con el grado de humedad requerido, añadir la

cantidad de agua necesaria y remover hasta lograr homogeneizar el suelo. El agua debe ser añadida mientras se remueve el suelo; en el caso de que se requiera secar el material, este debe ser secado al ambiente o en un horno cuya temperatura no exceda los 140°F (60°C). Durante el secado es necesario remover el material para que las partículas de agua se distribuyan en todas partes, cuando ya está seco el suelo colarlo en un recipiente tapado y ubicarlo de acuerdo a la Tabla 5.

Tabla 3.1 – Tiempo de Secado Próctor Estándar

Tiempo de Reposo Mínimo Requerido para la Humectación de Especímenes	
Clasificación	Tiempo de Reposo Mínimo, h
GW, GP, SW, SP	No se Requiere
GM, SM	3
Todos los otros suelos	16

Fuente: ASTM D698, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction of Soils Using Standard Effort (12400 ft³/ft³ (600 kN-m/m³))*.
Table 2 “Required Standing Times of Moisturized Specimens”.2012

3.1.7.1.1 Método de Preparación Seco.

En el caso de que la muestra se encuentre demasiado húmeda, secarla a temperatura ambiente o en un horno cuya temperatura no exceda los 140°F (60°C). Cuando ya esté seca a los grumos que se forman disgregarlos evitando romper las partículas individuales. Tamizar la muestra por el tamiz que corresponda No 4 (4.75-mm), 3/8 in (9.5-mm) o 3/4 in (19.0-mm). Cuando se esté preparando el material para pasar por el tamiz 3/4 in (19.0-mm) en el caso de la compactación en el molde de 6 in., disgregar el material de tal forma que por lo menos pase por el tamiz 3/8 in (9.5-mm) con el objetivo de facilitar la distribución del agua durante la preparación de los sub-especímenes posteriormente. Determinar el contenido de agua de la fracción de ensayo y el porcentaje de la masa del material retenido y del material que pasa, a una porción secarla al horno y obtener su contenido de humedad. A la fracción de ensayo, prepararla y obtener 4 sub-especímenes (de preferencia 5) con distintos contenidos de humedad pero para la obtención del sub-especímen se deberá separar el suelo por un método mecánico o por un proceso de cuarteo. El contenido de humedad del primer sub-especímen, debe estar cercano a la humedad óptima del material y se lo realizará a través de adición de agua en el sub-especímen y mezclado; el resto de sub-especímenes deberán tener un contenido de agua determinado de tal forma que al momento de graficar la curva se tengan 2 puntos en el lado seco y 2 puntos en el lado húmedo con

una variación entre humedades aproximadamente del 2%. Son necesarios al menos 2 puntos en lado seco y 2 puntos en el lado húmedo del punto óptimo para definir el peso unitario seco en la curva de compactación. En ocasiones se presentan suelos con humedades óptimas muy altas o curvas de compactación relativamente planas, en estos casos se requieren de grandes incrementos en sus contenidos de humedad para obtener una curva bien definida. Los incrementos en el contenido de humedad no deben exceder el 4%. Para cada sub-espécimen, seleccionar 2.3 kg. para el método A o B o 5.9 kg. en el caso del método C. Para obtener cada sub-espécimen con el grado de humedad requerido, añadir la cantidad de agua necesaria y remover hasta lograr homogeneizar el suelo. El agua debe ser añadida mientras se remueve el suelo; en el caso de que se requiera secar el material, este debe ser secado al ambiente o en un horno cuya temperatura no exceda los 140°F (60°C). Durante el secado es necesario remover el material para que las partículas de agua se distribuyan en todas partes, cuando ya está seco el suelo colarlo en un recipiente tapado y ubicarlo de acuerdo a la Tabla 2 del ASTM-D692-12 “Required Standing Times of Moisturized Specimens”.

3.1.8 Compactación.

Determinar y anotar la masa del molde con o sin el plato base.

Ensamblar y asegurar el molde y el collar a la base del plato. Verificar que estén alineadas las paredes internas del molde con las del collar de extensión. El molde deberá asentarse en un lugar sin desniveles es decir en un lugar uniforme y rígido de tal forma que proporcione la rigidez de un cilindro o cubo de concreto de masa no menor a las 200 lbf. o 91.kg. respectivamente. Asegurar el plano a la superficie rígida. La unión de la superficie rígida con el molde, collar y plato base debe permitir un desmolde fácil una vez terminado el ensayo.

El suelo debe ser compactado en 3 capas. Después de la compactación, cada capa deberá tener aproximadamente el mismo espesor y extenderse en el collar. Previo a la compactación, colocar el suelo suelto en el molde y esparcirlo procurando hacer una capa de espesor uniforme. Con el mismo pisón manual de compactación o con un cilindro de 2 in. (50 mm) de diámetro apisonar el material para que este no esté suelto o esponjoso antes de empezar con la compactación. Después de la compactación de las 2 primeras capas, en

el caso de que exista suelo que no haya sido compactado tal como el adyacente a las paredes del molde o el extendido sobre la superficie compactada, será recortado y dicho suelo deberá ser descartado. Un cuchillo u otro aparato semejante deberán ser utilizados. La cantidad de suelo utilizado debe ser el necesario como para que la tercera capa compactada se extienda dentro del anillo pero no se extienda más de 1/4 in. (6mm) aproximadamente por encima del tope del molde. En el caso de que la tercera capa compactada sobrepase los límites establecidos por encima del tope del molde, este punto deberá ser descartado. Además, también será descartado este punto si durante la compactación de la tercera capa en el último golpe del pisón este resulta por debajo del tope del molde.

Compactar cada capa con 25 golpes en el caso del molde de 4-in. (101.6-mm) o 56 golpes en el caso del molde de 6-in. (152.4-mm).

Al operar el pisón manual de compactación, tener precaución de evitar que la elevación de la guía al momento que el pisón sube. Mantener el pisón firmemente y que no se incline más de 5° con la vertical. Aplicar los golpes a una velocidad uniforme de aproximadamente 25 golpes por minuto y que los golpes cubran toda la superficie compactada del espécimen de manera completa y uniforme.

Terminada la compactación de la última capa, se debe remover el collar y el plato base del molde. Con un cuchillo recortar el suelo adyacente al collar con el fin de aflojar el suelo antes de que el collar sea retirado y evitar estropear el suelo por debajo de la parte superior del molde. Para evitar que el suelo se quede adherido, rotar el collar y el plato base antes de sacarlos por completo.

Con mucha precaución enrasar al espécimen compactado por medio de una regla recta; realizar el mismo procedimiento en la parte superior e inferior del molde. En los lugares que se encuentren agujeros u hoyos rellenar con el suelo utilizado durante este punto y presionar con los dedos, después pasar nuevamente la regla para lograr una superficie plana en la parte superior e inferior del molde. En el caso de suelos muy húmedos o muy secos se suele perder agua o suelo cuando se retira el plato base por lo tanto se aconseja para este tipo de suelos dejar el plato base fijo en el molde.

Determinar y anotar el peso del espécimen compactado más el molde con una aproximación al gramo. En el caso de que no se haya sacado el plato base entonces anotar el peso del espécimen, el molde y el plato base con aproximación al gramo.

Retirar el material del molde. Obtener una muestra para contenido de humedad del espécimen a través de una porción significativa de todo el suelo compactado dentro del molde. Se aconseja quebrar el material desmoldado para facilitar el secado.

Al finalizar con la compactación del último espécimen, comparar los pesos unitarios húmedos para asegurarse de que los datos obtenidos sigan el patrón deseado en el lado seco y húmedo de la curva para trazar correctamente la curva de compactación. Para realizar una evaluación es de gran ayuda trazar los datos del peso unitario húmedo y el contenido de humedad en cada punto. En el caso de que el patrón obtenido no es el deseado es necesario preparar otros especímenes para realizar la compactación y obtener más puntos para la curva.

3.1.9 Cálculos:

Es necesario calcular la densidad seca y el contenido de humedad de cada sub-espécimen ensayado para graficar cada punto en la curva de compactación.

Densidad Húmeda:

Ecuación 3.1

$$\rho_m = \frac{(M_t - M_{md})}{V}$$

Donde:

ρ_m = Densidad Húmeda del espécimen compactado (g/cm³)

M_t = Masa del suelo húmedo en el molde y molde (g)

M_{md} = Masa del molde de compactación (g)

V = Volumen del molde de compactación (cm³)

Densidad Seca:

Ecuación 3.2

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde:

ρ_d = Densidad Seca del espécimen compactado (g/cm^3)

ρ_m = Densidad Húmeda del espécimen compactado (g/cm^3)

w = Contenido de humedad del espécimen compactado (%)

Peso Unitario Seco:

Ecuación 3.3

$$\gamma_d = \rho_d$$

Donde:

γ_d = Peso Unitario Seco del espécimen compactado (g/cm^3)

ρ_d = Densidad Seca del espécimen compactado (g/cm^3)

En el caso de que se quiera obtener un peso unitario seco o una densidad seca en otras unidades es necesario multiplicar los valores calculados anteriormente por las constantes de conversión respectivas. Es decir, si γ_d está en lbf/ft^3 multiplicar por 62.428 para obtener la densidad en g/cm^3 o por 0.062428 para obtener la densidad en kg/m^3 . Si el γ_d está en kN/m^3 multiplicar por 9.8066 para obtener la densidad en g/cm^3 o por 0.0098066 para obtener la densidad en kg/m^3 .

3.1.9.1 Curva de compactación.

Graficar los valores del peso unitario seco y el contenido de humedad de cada punto y trazar una curva suave que pase por los puntos graficados. De cada punto graficado, el peso unitario seco debe estar con aproximación 0.11lbf/ft^3 (0.02 kN/m^3) y el contenido de agua con aproximación del 0.1%. Ya graficada la curva, determinar el Contenido de Agua Óptimo y el Peso Unitario Seco Máximo. En el caso de que se haya removido de la muestra más del 5% de material sobredimensionado es necesario realizar una corrección al Contenido de Agua Óptimo y al Peso Unitario Seco Máximo a través de la práctica ASTM-D4718 “Método de Ensayo para la Corrección del Peso Unitario y Contenido de Agua en Suelos que Contienen Partículas Sobredimensionadas”. Es importante aclarar que esta corrección deberá realizarse in-situ o en el campo mas no en los resultados de compactación del laboratorio.

La forma de la curva de compactación en el lado húmedo debe ser paralela o seguir la forma de la curva de saturación.

Graficar la Curva de Saturación 100% basada ya sea en una estimación o en una gravedad específica medida. Los valores del contenido de agua al 100% de saturación pueden ser calculados de la siguiente manera:

Ecuación 3.4

$$w_{sat} = \frac{(\gamma_w)(G_s) - (\gamma_d)}{(\gamma_d)(G_s)} * 100$$

Donde:

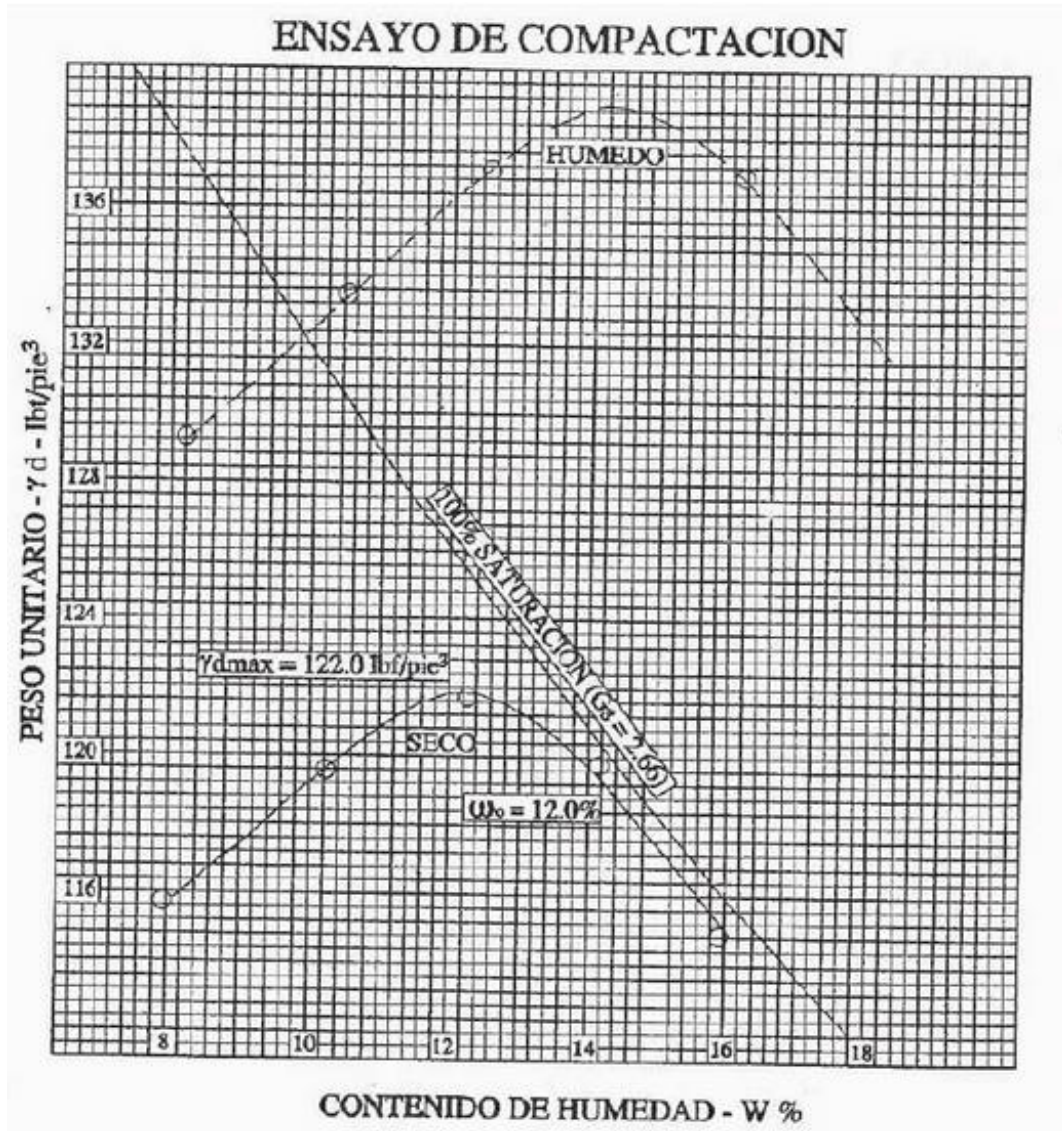
w_{sat} = Contenido de Agua para una saturación completa

γ_w = Peso Unitario del Agua, 62.32 lbf/ft³ (9.789 kN/m³) a 20°C

G_s = Gravedad específica

γ_d = Peso Unitario Seco del Suelo (estimada o medida)

Gráfico 3.3 - Curva de Compactación



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/29593693/Manual-Proctor-Estándar>

3.2 Compactación del Suelo en Laboratorio Utilizando un Esfuerzo Modificado de 56000 ft-lbf/ft³ (2700 KN-m/m³) o Próctor Modificado.¹¹

3.2.1 Alcance.

El objetivo de este ensayo es determinar la relación que existe entre el contenido de agua de un suelo o un material y su peso unitario seco a través de una curva de compactación. El material será compactado en moldes con un diámetro de 4 o 6 pulgadas, dependiendo el

¹¹ ASTM International D698, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56000ft-lbf/ft³ (2700 KN-m/m³))*. West Conshohocken, 2012.

método que se vaya a utilizar, a través de la caída libre de un pisón de 44.48 N a 457.2 mm de altura el cuál produce finalmente un esfuerzo de compactación de 2700 KN-m/m³.

Este ensayo se aplica únicamente a suelos o materiales en los cuales su porcentaje de masa retenida en el tamiz ¾-in sea igual o menor al 30% y no han sido previamente compactados en laboratorio; por lo tanto se sobreentiende que el material no podrá ser reutilizado durante el ensayo

Existen 3 métodos para realizar este ensayo. El método a utilizarse deberá ser indicado en el informe del ensayo.

- Método A:

Molde: 4 in. de diámetro.

Material: Pasa el tamiz No 4.

Capas: 5.

Número de golpes por capa: 25.

Uso: Este método será utilizado si el 25% de la masa del material o menos es retenida en el tamiz No 4.

Otro uso: Si el requerimiento de gradación del material no cumple con las especificaciones del método, entonces utilizar método B o C.

- Método B:

Molde: 4 in. de diámetro.

Material: Pasa el tamiz 3/8-in.

Capas: 5.

Número de golpes por capa: 25.

Uso: Este método será utilizado si el 25% de la masa del material o menos es retenida en el tamiz 3/8-in.

Otro uso: Si el requerimiento de gradación del material no cumple con las especificaciones del método, entonces utilizar método C.

- Método C:

Molde: 6 in. de diámetro.

Material: Pasa el tamiz 3/4-in.

Capas: 5.

Número de golpes por capa: 56.

Uso: Este método será utilizado si el 30% de la masa del material o menos es retenida en el tamiz 3/4-in.

El molde de 6-in. de diámetro no deberá ser utilizado en ninguno de los métodos A y B.

En el caso de que el espécimen de ensayo contenga más del 5% de su masa de fracción sobredimensionada y no va a ser incluida dicha masa en el ensayo, deberán hacerse correcciones al peso unitario y al contenido de agua del espécimen en el suelo en campo a través del Ensayo ASTM-D4718.

3.2.2 Terminología.

Esfuerzo Estándar: durante el ensayo de compactación, son los 56000 ft-lbf/ft³ (2700 kN-m/m³) de esfuerzo de compactación aplicados por el equipo.

Peso Unitario Máximo Modificado en lbf/ft³ (KN/m³): es el valor máximo determinado a través de la curva de compactación usando el método estándar.

Contenido de Agua Óptimo en %: el contenido de humedad para el cual el suelo compactado alcanza la densidad seca máxima.

Fracción sobredimensionada en %: la porción del total del espécimen no utilizada para la conformación del ensayo de compactación. Será la porción total retenida en el tamiz No 4 para el método A, 3/8-in en el método B y 3/4-in en el método C.

Fracción de ensayo en %: la porción del total del espécimen utilizada para la conformación del ensayo de compactación. Será la porción total que pasa el tamiz No 4 para el método A, 3/8-in en el método B y 3/4-in en el método C.

3.2.3 Significancia y Uso.

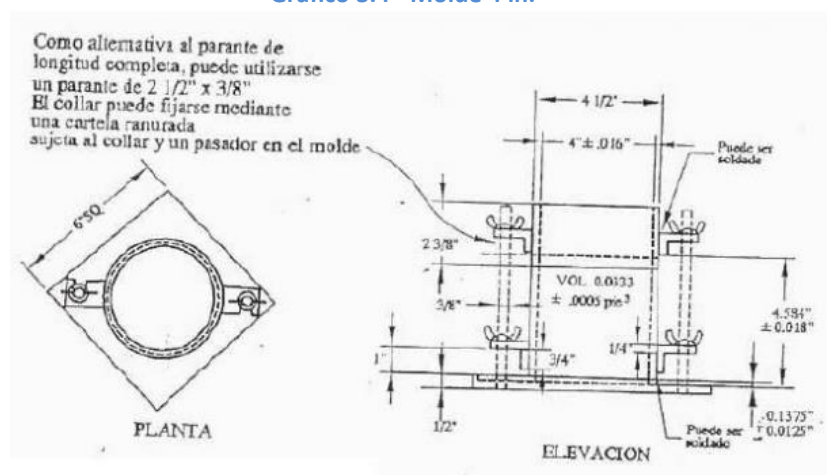
Cuando se realizan trabajos de compactación de suelo en campo como rellenos, terraplenes, mejoramientos, etc. se requieren porcentajes de compactación que estén cerca del 100% para que las propiedades ingenieriles del suelo sean satisfactorias como la resistencia al corte, compresibilidad o permeabilidad. En el caso de los suelos para cimentación, suelen ser compactados para mejorar sus propiedades ingenieriles. El ensayo de Proctor Estándar determina las bases para determinar el porcentaje de compactación y el contenido de humedad necesaria para lograr conseguir dichas propiedades ingenieriles con el objetivo de controlar durante la construcción que se ha llegado a los porcentajes de compactación y contenidos de agua deseados.

3.2.4 Equipos.

El molde debe tener una forma cilíndrica y de metal rígido con la capacidad y dimensiones siguientes:

- Molde de 4-in: debe tener 4000 ± 0.016 -in. (101.6 ± 0.4 -mm.) aproximadamente de diámetro interno, una altura de 4.584 ± 0.018 -in. (116.4 ± 0.5 -mm) y un volumen de 0.0333 ± 0.0005 ft³ (943.0 ± 14 cm³).

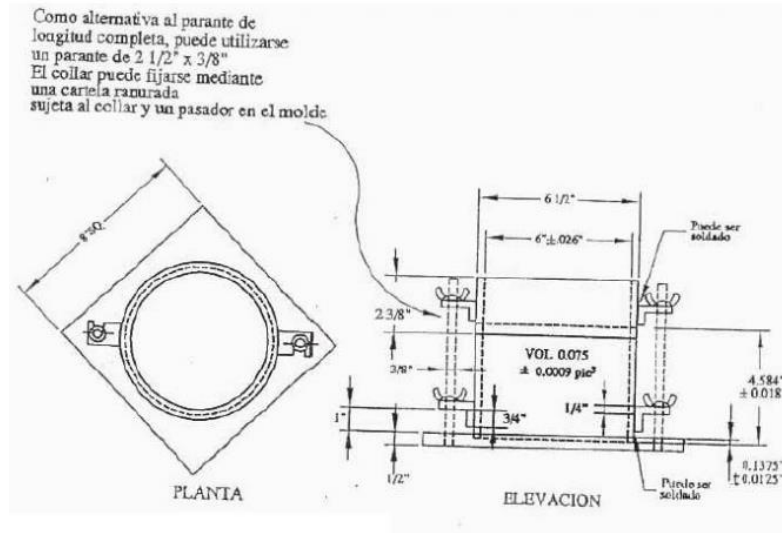
Gráfico 3.4 - Molde 4 in.



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/29593693/Manual-Proctor-Estándar>

- Molde de 6-in: debe tener 6000 ± 0.026 -in. (152.4 ± 0.7 -mm.) aproximadamente de diámetro interno, una altura de 4.584 ± 0.018 -in. (116.4 ± 0.5 mm) y un volumen de 0.0750 ± 0.0009 ft³ (943.0 ± 14 cm³).

Gráfico 3.5 - Molde 6 in.



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/29593693/Manual-Proctor-Estándar>

Las paredes del molde pueden ser rígidas, divididas o cónicas. Las de tipos “divididas” pueden consistir en dos secciones de medio de círculo cada una o una sección del tubo se divide a lo largo del elemento, en los dos casos las secciones serán unidas de una forma segura para así formar el cilindro y reunir los requerimientos de esta sección. Las de tipo “cónicas” deberán tener un diámetro interno cónico que sea uniforme y no mida más de 0.200in./ft (16.7 mm/m) del alto del molde. Cada molde deberá tener un plato base y un collar de extensión ensamblado que permita asegurar al molde con el plato base, ambos hechos de metal rígido y fabricados de tal forma que permitan ajustar y desajustar fácilmente al molde. El collar de extensión deberá extenderse por lo menos 2.0 in (51 mm) por encima del borde superior del molde formando una sección cilíndrica de al menos 0.75 in. (19.0 mm) por debajo de la misma.

El pisón ya sea manual o mecánico deberá tener una caída libre de 18.0 ± 0.05 in. (457.2 ± 1.3 mm) desde la superficie del espécimen. El peso del pisón deberá ser de 10.00 ± 0.02 lbf (44.48 ± 0.09 N, o en masa 4.5364 ± 0.009 kg). La cara que golpea o tiene contacto con el espécimen a ensayar deberá ser plana y circular con un diámetro de 2.0 ± 0.005 in. (50.80

± 0.13 mm), si por desgaste el diámetro de dicha cara excede los 2.0 ± 0.01 in. deberá ser reemplazado el pisón.

Un Extractor de Muestras es opcional y es cualquier tipo de mecanismo utilizado para extraer el espécimen del molde.

La balanza deberá contar con una precisión de 0.1-g.

El Horno de Secado deberá ser capaz de mantener una temperatura constante de $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ($110 \pm 5^{\circ}$) durante la cámara de secado. Estas especificaciones normalmente requieren de un horno de ventilación forzada.

La Regla será de metal con una longitud no menor a las 10 in. (250 mm). La longitud total de la regla deberá ajustarse a una tolerancia de ± 0.005 in. (0.1 mm). Si el borde del recorte es más grueso que $1/8$ in. (3 mm), este deberá ser biselado.

Tamices de $3/4$ in (19.0 mm), $3/8$ in (9.5 mm) y No 4 (4.75 mm) conforme exija la especificación.

Herramientas para Mezclar: puede ser cualquier herramienta que facilite la mezcla del material como cucharones, espátulas, sprays para rociar el agua, entre otros.

3.2.5 Espécimen de Ensayo.

La mínima cantidad de suelo o material en estado seco necesario para en método A y B es de 16 kg. en el caso del método C se requieren 29 kg. por lo tanto la masa húmeda de la muestra obtenida en campo deberá ser de por lo menos 23 kg. y 45 kg. respectivamente. En el caso de que existan partículas sobredimensionadas se necesitará una mayor cantidad de muestra.

Si todavía no se ha realizado la gradación del material, determinar el porcentaje de masa retenido en el tamiz No 4 (4.75-mm), $3/8$ in (9.5-mm) y $3/4$ in (19.0-mm) para seleccionar el método que se va a utilizar en el ensayo ya sea A, B o C respectivamente. Los porcentajes de material retenido en cada tamiz obtenerlo extrayendo una porción representativa de la muestra total.

3.2.6 Preparación del Equipo.

Seleccionar el molde especificado de acuerdo al método seleccionado ya sea A, B o C. Determinar el volumen y la masa del molde con o sin el plato.

Revisar que el molde se encuentre en buenas condiciones, que las paredes del molde y el collar de extensión estén alineados correctamente. El pisón debe estar en buenas condiciones de trabajo y que sus partes no estén flojas ni desgastadas de lo contrario realizar los ajustes necesarios y calibrarlo nuevamente.

3.2.7 Procedimiento.

3.2.7.1 Suelo.

No utilizar suelo que fue previamente compactado en el laboratorio. Utilizar el Método de Preparación Húmedo preferiblemente.

3.2.7.1.1 Método de Preparación Húmedo.

Sin haber secado la muestra previamente, pasar la muestra por el tamiz No 4 (4.75-mm), 3/8 in (9.5-mm) o 3/4 in (19.0-mm) dependiendo el método que se haya elegido A, B o C. Determinar el porcentaje de la masa del material retenido y del material que pasa, a una porción secarla al horno y obtener su contenido de humedad. A la fracción de ensayo, prepararla y obtener 4 sub-especímenes (de preferencia 5) con distintos contenidos de humedad. El contenido de humedad del primer sub-especímen, debe estar cercano a la humedad óptima del material y se lo realizará a través de adición o remoción de agua en el sub-especímen y mezclado; el resto de sub-especímenes deberán tener un contenido de agua específico de tal forma que al momento de graficar la curva se tengan 2 puntos en el lado seco y 2 puntos en el lado húmedo con una variación entre humedades aproximadamente del 2%. Son necesarios al menos 2 puntos en lado seco y 2 puntos en el lado húmedo del punto óptimo para definir el peso unitario seco en la curva de compactación. En ocasiones se presentan suelos con humedades óptimas muy altas o curvas de compactación relativamente planas, en estos casos se requieren de grandes

incrementos en sus contenidos de humedad para obtener una curva bien definida. Los incrementos en el contenido de humedad no deben exceder el 4%.

Para cada sub-espécimen, seleccionar 2.3 kg. para el método A o B o 5.9 kg. en el caso del método C. Para obtener cada sub-espécimen con el grado de humedad requerido, añadir la cantidad de agua necesaria y remover hasta lograr homogeneizar el suelo. El agua debe ser añadida mientras se remueve el suelo; en el caso de que se requiera secar el material, este debe ser secado al ambiente o en un horno cuya temperatura no exceda los 140°F (60°C). Durante el secado es necesario remover el material para que las partículas de agua se distribuyan en todas partes, cuando ya está seco el suelo colarlo en un recipiente tapado y ubicarlo de acuerdo a la Tabla 6.

Tabla 3.2 Tiempo de Secado Próctor Modificado

TABLA 2 Tiempo de Reposo Mínimo Requerido para la Humectación de Especímenes	
Clasificación	Tiempo de Reposo Mínimo, h
GW, GP, SW, SP	No se Requiere
GM, SM	3
Todos los otros suelos	16

Fuente: ASTM D698, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction of Soils Using Modified Effort (56000 ft³/ft³ (2700 kN-m/m³)).* Table 2 “Required Standing Times of Moisturized Specimens”.2012

3.2.7.1.2 Método de Preparación Seco.

En el caso de que la muestra se encuentre demasiado húmeda, secarla a temperatura ambiente o en un horno cuya temperatura no exceda los 140°F (60°C). Cuando ya esté seca a los grumos que se forman disgregarlos evitando romper las partículas individuales. Tamizar la muestra por el tamiz que corresponda No 4 (4.75-mm), 3/8 in (9.5-mm) o 3/4 in (19.0-mm). Cuando se esté preparando el material para pasar por el tamiz 3/4 in (19.0-mm) en el caso de la compactación en el molde de 6 in., disgregar el material de tal forma que por lo menos pase por el tamiz 3/8 in (9.5-mm) con el objetivo de facilitar la distribución del agua durante la preparación de los sub-especímenes posteriormente. Determinar el contenido de agua de la fracción de ensayo y el porcentaje de la masa del material retenido y del material que pasa, a una porción secarla al horno y obtener su contenido de humedad. A la fracción de ensayo, prepararla y obtener 4 sub-especímenes (de preferencia 5) con distintos contenidos de humedad pero para la obtención del sub-espécimen se deberá

separar el suelo por un método mecánico o por un proceso de cuarteo. El contenido de humedad del primer sub-espécimen, debe estar cercano a la humedad óptima del material y se lo realizará a través de adición de agua en el sub-espécimen y mezclado; el resto de sub-espécímenes deberán tener un contenido de agua determinado de tal forma que al momento de graficar la curva se tengan 2 puntos en el lado seco y 2 puntos en el lado húmedo con una variación entre humedades aproximadamente del 2%. Son necesarios al menos 2 puntos en lado seco y 2 puntos en el lado húmedo del punto óptimo para definir el peso unitario seco en la curva de compactación. En ocasiones se presentan suelos con humedades óptimas muy altas o curvas de compactación relativamente planas, en estos casos se requieren de grandes incrementos en sus contenidos de humedad para obtener una curva bien definida. Los incrementos en el contenido de humedad no deben exceder el 4%. Para cada sub-espécimen, seleccionar 2.3 kg. para el método A o B o 5.9 kg. en el caso del método C.

Para obtener cada sub-espécimen con el grado de humedad requerido, añadir la cantidad de agua necesaria y remover hasta lograr homogeneizar el suelo. El agua debe ser añadida mientras se remueve el suelo; en el caso de que se requiera secar el material, este debe ser secado al ambiente o en un horno cuya temperatura no exceda los 140°F (60°C). Durante el secado es necesario remover el material para que las partículas de agua se distribuyan en todas partes, cuando ya está seco el suelo colarlo en un recipiente tapado y ubicarlo de acuerdo a la Tabla 2 del ASTM-D692-12 “Required Standing Times of Moisturized Specimens”.

3.2.8 Compactación.

Determinar y anotar la masa del molde con o sin el plato base.

Ensamblar y asegurar el molde y el collar a la base del plato. Verificar que estén alineadas las paredes internas del molde con las del collar de extensión. El molde deberá asentarse en un lugar sin desniveles es decir en un lugar uniforme y rígido de tal forma que proporcione la rigidez de un cilindro o cubo de concreto de masa no menor a las 200 lbf. o 91.kg. respectivamente. Asegurar el plano a la superficie rígida. La unión de la superficie rígida con el molde, collar y plato base debe permitir un desmolde fácil una vez terminado el ensayo.

El suelo debe ser compactado en 5 capas. Después de la compactación, cada capa deberá tener aproximadamente el mismo espesor y extenderse en el collar. Previo a la compactación, colocar el suelo suelto en el molde y esparcirlo procurando hacer una capa de espesor uniforme. Con el mismo pisón manual de compactación o con un cilindro de 2 in. (50 mm) de diámetro apisonar el material para que este no esté suelto o esponjoso antes de empezar con la compactación. Después de la compactación de las 4 primeras capas, en el caso de que exista suelo que no haya sido compactado tal como el adyacente a las paredes del molde o el extendido sobre la superficie compactada, será recortado y dicho suelo deberá ser descartado. Un cuchillo u otro aparato semejante deberán ser utilizados. La cantidad de suelo utilizado debe ser el necesario como para que la quinta capa compactada se extienda dentro del anillo pero no se extienda más de 1/4 in. (6mm) aproximadamente por encima del tope del molde. En el caso de que la quinta capa compactada sobrepase los límites establecidos por encima del tope del molde, este punto deberá ser descartado. Además, también será descartado este punto si durante la compactación de la quinta capa en el último golpe del pisón este resulta por debajo del tope del molde.

Compactar cada capa con 25 golpes en el caso del molde de 4-in. (101.6-mm) o 56 golpes en el caso del molde de 6-in. (152.4-mm).

Al operar el pisón manual de compactación, tener precaución de evitar que la elevación de la guía al momento que el pisón sube. Mantener el pisón firmemente y que no se incline más de 5° con la vertical. Aplicar los golpes a una velocidad uniforme de aproximadamente 25 golpes por minuto y que los golpes cubran toda la superficie compactada del espécimen de manera completa y uniforme.

Terminada la compactación de la última capa, se debe remover el collar y el plato base del molde. Con un cuchillo recortar el suelo adyacente al collar con el fin de aflojar el suelo antes de que el collar sea retirado y evitar estropear el suelo por debajo de la parte superior del molde. Para evitar que el suelo se quede adherido, rotar el collar y el plato base antes de sacarlos por completo.

Con mucha precaución enrasar al espécimen compactado por medio de una regla recta; realizar el mismo procedimiento en la parte superior e inferior del molde. En los lugares que se encuentren agujeros u hoyos rellenar con el suelo utilizado durante este punto y presionar con los dedos, después pasar nuevamente la regla para lograr una superficie plana en la parte superior e inferior del molde. En el caso de suelos muy húmedos o muy secos se suele perder agua o suelo cuando se retira el plato base por lo tanto se aconseja para este tipo de suelos dejar el plato base fijo en el molde.

Determinar y anotar el peso del espécimen compactado más el molde con una aproximación al gramo. En el caso de que no se haya sacado el plato base entonces anotar el peso del espécimen, el molde y el plato base con aproximación al gramo.

Retirar el material del molde. Obtener una muestra para contenido de humedad del espécimen a través de una porción significativa de todo el suelo compactado dentro del molde. Se aconseja quebrar el material desmoldado para facilitar el secado.

Al finalizar con la compactación del último espécimen, comparar los pesos unitarios húmedos para asegurarse de que los datos obtenidos sigan el patrón deseado en el lado seco y húmedo de la curva para trazar correctamente la curva de compactación. Para realizar una evaluación es de gran ayuda trazar los datos del peso unitario húmedo y el contenido de humedad en cada punto. En el caso de que el patrón obtenido no es el deseado es necesario preparar otros especímenes para realizar la compactación y obtener más puntos para la curva.

3.2.9 Cálculos.

Es necesario calcular la densidad seca y el contenido de humedad de cada sub-espécimen ensayado para graficar cada punto en la curva de compactación.

Densidad Húmeda:

Ecuación 3.1

$$\rho_m = \frac{(M_t - M_{md})}{V}$$

Donde:

ρ_m = Densidad Húmeda del espécimen compactado (g/cm³)

M_t = Masa del suelo húmedo en el molde y molde (g)

M_{md} = Masa del molde de compactación (g)

V = Volumen del molde de compactación (cm³)

Densidad Seca:

Ecuación 3.2

$$\rho_d = \frac{\rho_m}{1 + \frac{w}{100}}$$

Donde:

ρ_d = Densidad Seca del espécimen compactado (g/cm³)

ρ_m = Densidad Húmeda del espécimen compactado (g/cm³)

w = Contenido de humedad del espécimen compactado (%)

Peso Unitario Seco:

Ecuación 3.3

$$\gamma_d = \rho_d$$

Donde:

γ_d = Peso Unitario Seco del espécimen compactado (g/cm³)

ρ_d = Densidad Seca del espécimen compactado (g/cm³)

En el caso de que se quiera obtener un peso unitario seco o una densidad seca en otras unidades es necesario multiplicar los valores calculados anteriormente por las constantes de conversión respectivas. Es decir, si γ_d está en lbf/ft³ multiplicar por 62.428 para obtener la densidad en g/cm³ o por 0.062428 para obtener la densidad en kg/m³. Si el γ_d está en kN/m³ multiplicar por 9.8066 para obtener la densidad en g/cm³ o por 0.0098066 para obtener la densidad en kg/m³.

3.2.9.1 Curva de compactación:

Graficar los valores del peso unitario seco y el contenido de humedad de cada punto y trazar una curva suave que pase por los puntos graficados. De cada punto graficado, el peso unitario seco debe estar con aproximación 0.1lbf/ft³ (0.02 kN/m³) y el contenido de agua con aproximación del 0.1%. Ya graficada la curva, determinar el Contenido de Agua

Óptimo y el Peso Unitario Seco Máximo. En el caso de que se haya removido de la muestra más del 5% de material sobredimensionado es necesario realizar una corrección al Contenido de Agua Óptimo y al Peso Unitario Seco Máximo a través de la práctica ASTM-D4718 “Método de Ensayo para la Corrección del Peso Unitario y Contenido de Agua en Suelos que Contienen Partículas Sobredimensionadas”. Es importante aclarar que esta corrección deberá realizarse in-situ o en el campo mas no en los resultados de compactación del laboratorio.

La forma de la curva de compactación en el lado húmedo debe ser paralela o seguir la forma de la curva de saturación.

Graficar la Curva de Saturación 100% basada ya sea en una estimación o en una gravedad específica medida. Los valores del contenido de agua al 100% de saturación pueden ser calculados de la siguiente manera:

Ecuación 3.4

$$w_{sat} = \frac{(\gamma_w)(G_s) - (\gamma_d)}{(\gamma_d)(G_s)} * 100$$

Donde:

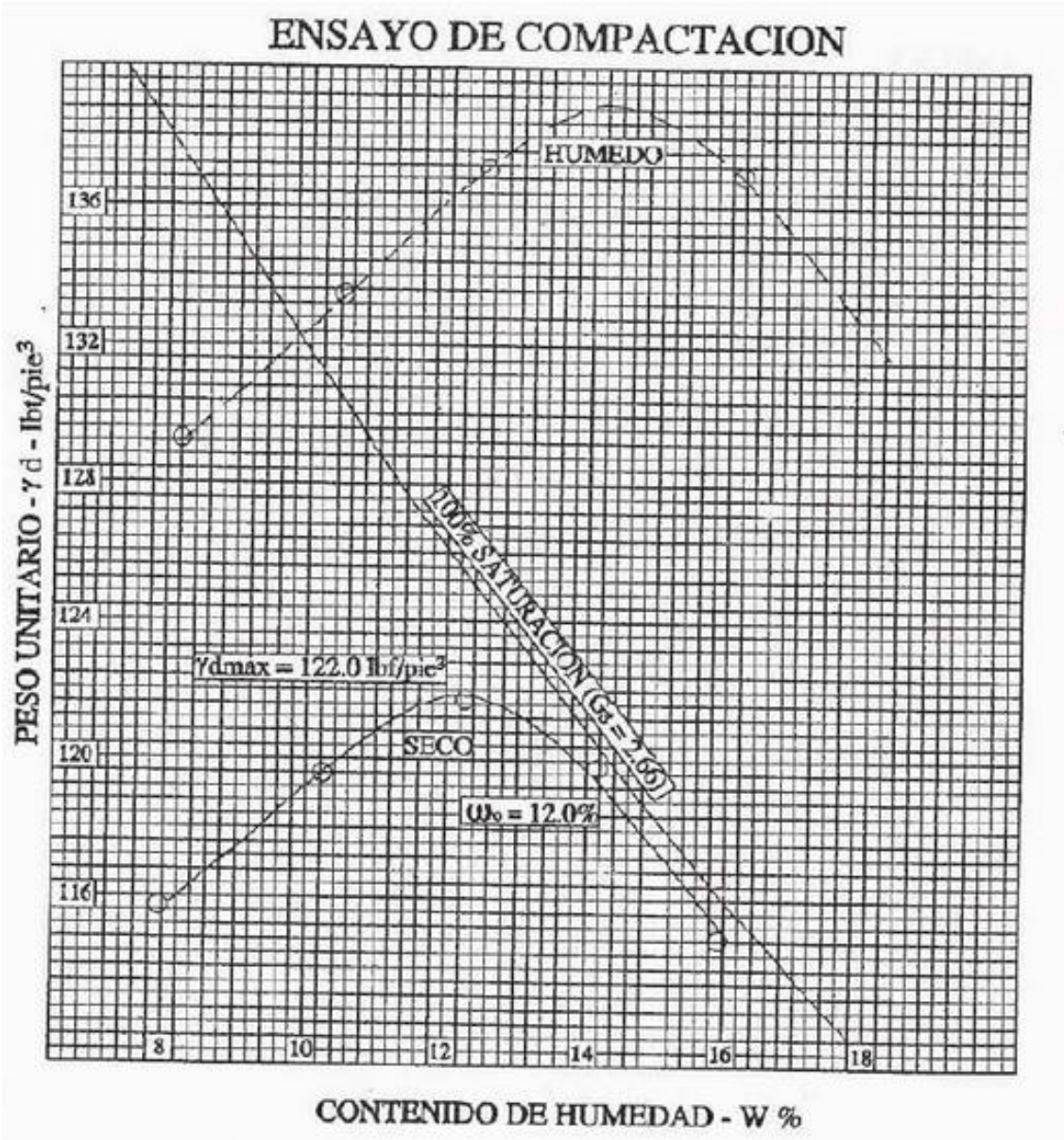
w_{sat} = Contenido de Agua para una saturación completa

γ_w = Peso Unitario del Agua, 62.32 lbf/ft³ (9.789 kN/m³) a 20°C

G_s = Gravedad específica

γ_d = Peso Unitario Seco del Suelo (estimada o medida)

Gráfico 3.3 - Curva de Compactación.



Fuente: <http://es.scribd.com/doc/29593693/Manual-Proctor-Estándar>

CAPÍTULO 4: EQUIPO PARA CONTROL DE COMPACTACIÓN IN-SITU

La compactación se refiere al proceso mecánico en el cual se provoca una mayor compacidad de las partículas del suelo reduciendo el número de vacíos con el fin de mejorar sus propiedades geomecánicas.

La importancia de la compactación radica en que para fines constructivos es necesario mejorar la resistencia del suelo para que este pueda soportar las cargas a las que va a ser sometido en un futuro, reduciendo así su capacidad de deformación, como también el esponjamiento, la contracción y la permeabilidad.

Al momento de compactar un suelo el agua juega un papel sumamente importante. Es por eso que previo a realizar la compactación en el laboratorio se determinó la humedad óptima. La humedad óptima, como ya fue explicado en el capítulo anterior, es la cantidad de agua que requiere el suelo para que al ser compactado logre alcanzar su densidad seca máxima. En este caso se determinó la humedad óptima y la densidad seca máxima a través del Proctor Modificado.

4.1. Cálculo de la Densidad y Contenido de Humedad In-Situ por el Método Cono y Arena.¹²

4.1.1 Alcance.

Este ensayo se utiliza para la determinación de la densidad del suelo in-situ. Este ensayo es aplicable para suelos que no contengan una cantidad apreciable de rocas o grava con un tamaño de partícula mayor a 1 ½ in. Es importante tomar en cuenta que el material donde se va a realizar el ensayo tenga una cohesión suficiente para que los lados del hueco se mantengan estables al momento de realizar el ensayo. No se puede realizar este tipo de ensayo en suelos orgánicos, saturados o con una plasticidad alta ya que se puede comprimir o deformar durante la excavación. Tampoco se puede realizar en suelos

¹² ASTM International D1556, *Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil by Sand-Cone Method*. West Conshohoken, 2012.

granulares no compactados debido a que al momento de realizar el hoyo no van a ser capaces de mantener estables las paredes del agujero.

4.1.2 Equipos.

Para realizar este ensayo se necesita un contenedor de arena, el cono de arena y una placa. El contenedor de arena puede ser un frasco ajustable con un volumen de capacidad superior al hoyo que se va a hacer en suelo.

El cono de arena consiste en un aparato desmontable con una válvula cilíndrica con un orificio de aproximadamente media pulgada de diámetro acoplada a un embudo metálico en un lado y al contenedor de arena en el otro lado, hay que tomar en cuenta que la válvula debe impedir por completo el paso de más arena cuando esta se cierra. El material del cual está hecho el cono debe ser de metal y lo suficientemente rígido como para evitar que se deforme y que su volumen cambie. El cono debe formar un ángulo de 60° con la placa.

La placa es metálica y cuenta con un agujero en el centro con una brida en donde se apoyará el cono de arena, el diámetro de dicho agujero es de 3 pulgadas y el ancho de la placa oscilará entre los $3/8$ y $1/2$ pulgada.

La arena debe ser limpia, seca, con uniformidad tanto en su densidad como en su granulometría, durable, no debe tener ninguna partícula cementante y capaz de fluir o caer libremente. Es importante que tenga un coeficiente de uniformidad menor a 2.0, que sus partículas de mayor tamaño no pasen del tamiz No 10 y que menos del 3% del peso pase por el tamiz No 60. Su densidad es calculada en laboratorio y es conocida como Densidad Bulk. La arena podrá ser reutilizada si se remueven las partículas de suelo que pueden contaminarla, si se verifica que su gradación sea la correcta, si se seca y si se recalcula la densidad bulk.

Gráfico 4.1 - Dimensiones Cono.

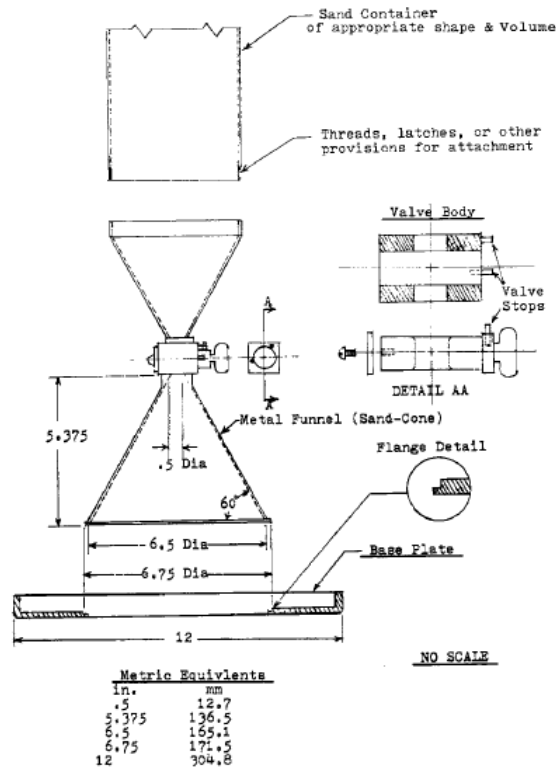


FIG. 1 Density Apparatus

Fuente: ASTM International, *Density and Unit Weight of Soils in Place by Sand-Cone Method*, 2007.

Una balanza con una precisión a los 5.0 g. para tomar los pesos del suelo excavado y del cono y arena. La capacidad de carga mínima con la cual debe contar la balanza es de 20 kg. Además, contar con algunos accesorios que se necesitan para realizar el ensayo en campo como cuchillo, cucharón, cincel, combo, clavos para estabilizar la placa, brocha, fundas, una franela, hojas de campo, etc.

4.1.3 Procedimiento.

Previo a ir a realizar el ensayo al campo es necesario determinar el peso de la arena que ocupa el cono y la placa (M3).

Seleccionar un sector donde se va a realizar el ensayo tomando en cuenta que va a ser representativa para el área que se quiere determinar la densidad y peso unitario.

Utilizar la placa para nivelar el suelo donde se va a realizar el ensayo ya que se necesita una superficie plana. Colocar la placa en el suelo cerciorándose de que la superficie del suelo esté en contacto con el agujero del centro de la placa. Asegurar la placa con los clavos para que esta no se mueva durante el ensayo.

El volumen del hoyo va a depender del tamaño máximo de partícula del suelo que se va a ensayar. Los volúmenes están especificado en la Tabla 1 ASTM “*Minimum Test Hole Volumes Based on Maximum Size of Included Particle*” de la Norma ASTM-D1556 “*Density and Unit Weight of Soil in Place Sand-Cone Method.*”

Tabla 4.1 – Volúmen mínimo del hoyo basado en el tamaño máximo de partícula del suelo.

Maximum Particle Size		Minimum Test Hole Volumes	
in.	(mm)	cm ³	ft ³
1/2	(12.7)	1415	0.05
1	(25.4)	2125	0.075
1 1/2	(38)	2830	0.1

Fuente: ASTM International, *Density and Unit Weight of Soils in Place by Sand-Cone Method*, 2007.

Realizar el agujero de ensayo siguiendo el hueco circular en el medio de la placa, ayudarse a cavar con el cincel y el combo procurando no destruir la pared lateral del agujero la cual debe quedar lo más lisa posible mientras que el fondo debe quedar plano o cóncavo.

Gráfico 4.2 – Placa y Agujero del Ensayo Cono y Arena



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Extraer el suelo del agujero con un cucharón o algo similar y colocar en un recipiente con su debida identificación del número de ensayo, hay que fijarse que el suelo extraído del

agujero sea una parte representativa para los cálculos. Al momento de sacar el suelo excavado hay que tener mucha precaución de no perder nada de dicho suelo ya que afectará posteriormente a los cálculos. Tomar en cuenta que el recipiente donde se va a almacenar el suelo debe evitar la pérdida de humedad del mismo al menos hasta que la masa del suelo sea determinada y dos especímenes sean destinados a contenido de humedad. Determinar la masa del suelo húmedo (M_4) que estaba en el agujero.

Gráfico 4.3 - Masa de suelo húmedo.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Pesar el frasco más el cono y arena y anotarlo (M_1) antes de virarlo para realizar el ensayo.

Gráfico 4.4 - Masa del frasco antes del ensayo



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Ya realizado el agujero, limpiar la placa, especialmente la brida, con una brocha librándola de cualquier partícula de suelo que pueda presentarse. Virar el recipiente con el cono y arena haciendo que el cono calce en la brida de la placa, tomar en cuenta que la válvula debe estar cerrada. Evitando cualquier tipo de vibración, abrir la válvula para que caiga la arena libremente y cuando se observe que no cae más arena cerrar la válvula y levantar el frasco con el cono y arena.

Gráfico 4.5 - Frasco y cono virados.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Pesar el frasco con el cono y la arena después de haberlo vertido en el agujero y anotarlo (M_2).

4.1.4 Cálculos.

Calcular el volumen del agujero.

Ecuación 4.1

$$V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{\rho_1}$$

Donde:

V = Volumen del agujero (cm^3).

M_1 = Masa frasco más cono y arena antes de verter en el agujero (gr).

M_2 = Masa Frasco más cono más arena después de verter en el agujero (gr).

M_3 = Masa de la arena en el cono y la placa (gr).

ρ_1 = Densidad Bulk de la arena (gr/cm³).

Calcular el contenido de agua del suelo (w).

Calcular la masa seca del suelo removido del agujero.

Ecuación 4.2

$$M_5 = \frac{100 * M_4}{w + 100}$$

Donde:

M_5 = Masa seca del suelo removido del agujero (gr).

M_4 = Masa del suelo húmedo removido del agujero (gr).

w = Contenido de agua del suelo en el agujero (%).

Calcular densidad húmeda y densidad seca.

Ecuación 4.3

$$\rho_m = \frac{M_4}{V}$$

Donde:

ρ_m = Densidad Húmeda de suelo (gr/cm³).

M_4 = Masa del suelo húmedo removido del agujero (gr).

V = Volumen del agujero (cm³).

Ecuación 4.4

$$\rho_d = \frac{M_5}{V}$$

Donde:

ρ_m = Densidad Seca de suelo (gr/cm³).

M_4 = Masa del suelo seco removido del agujero (gr).

V = Volumen del agujero (cm³).

El porcentaje de compactación puede ser calculado dividiendo la densidad seca del suelo y la densidad seca máxima calculada en laboratorio a través del Próctor Estándar o Modificado.

4.2 Determinación de la Densidad y Contenido de Humedad In-Situ a través del Densímetro Nuclear.¹³

4.2.1 Alcance.

Con el densímetro nuclear se puede calcular la densidad in-situ de suelos o agregados de tres maneras por retrodispersión, por transmisión directa o por retrodispersión/proporción de vacíos de aire. Pero el método más utilizado es el de transmisión directa.

La densidad húmeda del suelo es obtenida a través de la disminución de la radiación gamma desde una fuente ubicada a no más de 300mm hacia un detector que está ubicado en la superficie del suelo. Para calcular los valores de la densidad en masa por unidad de volumen, el equipo compara la velocidad a la que viajaron los rayos gamma con datos previamente establecidos durante la calibración. Por otro lado, para obtener la densidad seca se sustrae la masa del agua por unidad del volumen de la densidad húmeda.

El equipo también está calibrado para leer la cantidad de agua en masa por unidad de volumen y al dividir este valor para la densidad del agua y multiplicándola por 100 se obtiene un equivalente al contenido de agua volumétrico. La cantidad de agua en masa por unidad de volumen obtenida se la calculó a través de un proceso de termalización o disminución de la velocidad de los neutrones por el hidrógeno; la fuente de neutrones y el detector de neutrones térmicos están ubicados en la superficie durante el ensayo. Por último, para obtener el contenido de agua gravimétrico se divide la masa del agua en los espacios vacíos o poros para la masa total del material.

Como fue mencionado anteriormente el método más utilizado para el uso del densímetro nuclear es el de Transmisión Directa en donde la sonda que es la fuente de rayos gamma se extiende desde la base del equipo a través de un hueco previamente realizado a una profundidad deseada.

¹³ ASTM International D6938, *Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil-Aggregate by Nuclear Methods*. West Conshohocken. 2012.

Es importante recalcar que al ser un equipo que contiene fuentes radioactivas de neutrones y rayos gamma emite una radiación que es perjudicial para la salud. Los operadores de este tipo de equipo deben estar al tanto de todas las medidas de seguridad y las precauciones que deben tener para manejarlo. En el caso del Ecuador para operar este equipo es necesario contar con un permiso del Ministerio de Energías no Renovables y además de todo el equipo de protección personal debe tener un medidor de radiación o dosímetro.

4.2.2 Equipo.

Densímetro Nuclear: Equipo dotado con un medidor nuclear para realizar ensayos de densidad húmeda y contenido de humedad in-situ.

Varilla de perforación: Es una varilla de acero con la cual se hace el agujero para que el vástago ingrese.

Placa Guía: Es una placa para mantener a la varilla de perforación vertical mientras se la clava en el suelo.

Combo: Sirve para clavar la varilla de perforación en el suelo.

4.2.3 Terminología.

Medidor Nuclear: es un aparato que contiene uno o más fuentes radioactivas que se usan para medir ciertas propiedades de los suelos y agregados.

Fuente de Rayos Gamma: es una fuente de material radioactivo que emite radiación gamma.

Fuente de Neutrones: es una fuente de material radioactivo que emite radiación de neutrones.

Detector: es un aparato que detecta y mide la radiación.

Vástago: es una vara de metal pegada a un medidor nuclear en donde se coloca la fuente radioactiva o el detector.

4.2.4 Significancia y Uso.

Este método permite calcular la densidad húmeda y el contenido de agua de suelos y agregados de una manera rápida y sin destruir el área de ensayo. Principalmente el

densímetro nuclear es utilizado para control de calidad en suelos y agregados compactados por lo cual es requerido en el ámbito de la construcción como también para investigaciones. Al no dañar el área de trabajo, este método permite tomar varias medidas en una misma área para análisis estadísticos.

4.2.5 Limitantes.

Existen algunos factores que pueden afectar o inciden en las medidas de densidad in-situ como son:

- Si el material posee compuestos químicos puede afectar la medida de densidad.
- Si el material no es homogéneo o la superficie no es regular.
- Si se calcula por retrodispersión las medidas de densidad y contenido de agua son influenciadas principalmente por el material en la superficie.
- Si se calcula por transmisión directa los valores de densidad y contenido de agua son el promedio de todos los valores obtenidos desde la punta del vástago hincado dentro del suelo hasta la superficie.
- Las partículas sobredimensionadas o grandes vacíos pueden causar lecturas o medidas de mayor o menor densidad.
- Otro equipo radioactivo debe estar alejado por lo menos 9 m.

Por otra parte, existen otros factores que pueden afectar o incidir en las medidas de contenido de agua in-situ como son:

- La composición química del material. Hidrógeno que no forme parte de las moléculas de agua o carbono como también boro, cloro y cadmio.
- El contenido de agua calculado no es necesariamente el contenido de agua promedio del volumen de toda la muestra medida. Como ya se explicó anteriormente, el contenido de agua es calculado por retrodispersión siempre y el valor obtenido se basa en el contenido de humedad próximo a la superficie.
- Otra fuente de neutrones debe estar alejada por lo menos 9m.

4.2.6 Procedimiento.

Al elegir el sitio donde se van a realizar el o los ensayos, procurar que el equipo no tenga ningún objeto a menos de 600mm (24 in.) y en el caso de que se vaya a realizar el o los ensayos en un sitio cerrado como una zanja es necesario realizar las debidas correcciones que se proponen en el manual de cada equipo.

Limpiar la superficie del terreno elegido para hacer el ensayo y evitar que quede cualquier tipo de material ya sea ajeno al suelo o el mismo suelo pero suelto.

Preparar un área de terreno equivalente al tamaño del equipo para que este esté en pleno contacto con la superficie del suelo a ensayar.

En el caso de que haya agujeros o irregularidades bajo el equipo, la máxima profundidad permitida del agujero es de 3 mm. (1/8 in.) de lo contrario hay que rellenar las irregularidades con suelo fino del mismo material o llevar arena fina desde un inicio.

Es muy importante el contacto de la superficie con el equipo para realizar el ensayo. Lo óptimo sería que estén en total contacto la superficie y el equipo pero en el caso de que no sea así el área q no está en contacto del equipo con la superficie no deberá exceder al 10% de la misma.

Encender el equipo y permitir que se estabilice de acuerdo a lo que recomiende el fabricante en el manual.

4.2.6.1 Método por Transmisión Directa.

El sitio donde se va a realizar el ensayo debe estar alejado por lo menos 150 mm. (6 in.) de cualquier vertical.

Realizar un hueco en el suelo con ayuda de la placa guía, la varilla de perforación y un combo.

Gráfico 4.6 - Varilla de perforación siendo clavada.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

El agujero debe ser mínimo 50 mm. (2 in.) más profundo que la medida deseada. Por otra parte, el agujero debe estar completamente vertical o perpendicular al suelo de tal manera que no ocasione que el equipo se incline al momento de hundir el vástago en el agujero. Al momento de retirar la varilla de perforación hacerlo con mucha precaución para no causar un desmoronamiento del suelo, que ingrese material suelto o que se dañe la superficie.

A continuación se coloca el equipo en la superficie y se inserta el vástago en el agujero hasta la profundidad deseada. El equipo debe ser suavemente empujado hacia atrás para que el vástago esté en completo contacto con el suelo.

Gráfico 4.7 - Vástago insertado.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Cualquier otro artefacto radioactivo debe estar alejado a no menos de 9m del equipo para evitar que tenga algún efecto en la medición.

Poner la profundidad a la que se va a realizar el ensayo en el equipo al igual que el dato del próctor el cual fue calculado en laboratorio para obtener el porcentaje de compactación.

Asegurar y registrar la densidad en más de una lectura al igual que el contenido de agua.

Leer la densidad húmeda in-situ y el contenido de humedad in-situ.

4.3 Determinación de la Densidad y Contenido de Humedad In-Situ a través del Densímetro Eléctrico.¹⁴⁻¹⁵

4.3.1 Alcance.

El densímetro eléctrico, al igual que los métodos anteriores, permite determinar las propiedades in-situ (densidad húmeda, contenido de agua y la compactación relativa) de suelos no congelados, suelos totalmente consolidados y no consolidados así como también en mezclas de agregados. Estos datos se obtienen midiendo la impedancia electromagnética del suelo compactado.

En otras palabras, los valores de densidad húmeda y contenido de agua son obtenidos después de correlacionarlos con una serie de datos empíricos usando un aparato que mide la impedancia electromagnética del suelo.

Con la medida de los cambios electromagnéticos del suelo se puede determinar sus propiedades electromagnéticas a una frecuencia específica. Con estos datos se genera una función que describe la relación que existe entre las propiedades eléctricas sobre un rango de frecuencias. Finalmente, dicha función es comparada con un modelo empírico con el cual se calibró el equipo para la determinación del contenido de agua y la densidad.

¹⁴ ASTM International D7830D7830M, *Standard Test Method for In-Place Density (Unit Weight) and Water Content of Soil Using an Electromagnetic Soil Density Gauge*. West Conshohocken. 2013.

¹⁵ Humboldt Mfg. Co., Manual del Usuario Humboldt H-4114SD.3F. Illinois. 2013.

4.3.2 Equipos.

Caja del Densímetro Eléctrico: Caja que cuenta incorporado al equipo de medición y todos los accesorios para realizar el ensayo.

Plantilla para Dardos: Es una plantilla guía para clavar los dardos en el suelo.

Sensor de Suelo: Este sensor transfiere al equipo de medición, que se encuentra en la caja del Densímetro Eléctrico, la información eléctrica del suelo que se está ensayando a través de un cable que los conecta.

Cables para el Sensor de Suelo: Su función es conectar los dardos al sensor de suelo. A un extremo de los cables hay un conector de teléfono hembra de $\frac{1}{4}$ in. mientras que al otro lado se encuentra una pinza tipo alicate. El conector de teléfono se conecta a los pines que tiene el sensor de suelo y la pinza tipo alicate a los dardos que están clavados en el suelo. Son 2 cables.

Sonda de Temperatura: Mide la temperatura del suelo. Se conecta al sensor de suelo a través de un pequeño conector.

Dardos: Existen de varios tamaños pero en el caso de esta investigación se contó con dardos de 15 cm. (6 in). esta es la única profundidad a la cual se puede realizar este ensayo ya que la longitud de los dardos es una limitante. Son 4 dardos.

Martillo: La función del martillo es clavar los dardos en el suelo a ensayar.

Sonda tipo T: Este accesorio es de ayuda para hacer un agujero e introducir la sonda de temperatura en el suelo.

4.3.3 Terminología.

Impedancia: es la resistencia a la conductividad de la corriente alterna.

Modelo de Suelo: es la correlación lineal que definen las propiedades eléctricas y las propiedades físicas de un mismo suelo después de realizar una calibración.

4.3.4 Significancia y Uso.

Este método permite calcular la densidad húmeda y el contenido de agua de suelos y agregados de una manera rápida y sin destruir el área de ensayo. Principalmente el densímetro eléctrico es utilizado para control de calidad en suelos por lo cual es requerido en el ámbito de la construcción como también para investigaciones. Al no dañar el área de trabajo, este método permite tomar varias medidas en una misma área para análisis estadísticos.

4.3.5 Interferencias.

Durante la calibración del equipo al realizar el modelo de suelo no pueden existir anomalías en el suelo de ensayo; es decir sus propiedades de impedancia eléctrica no deben ser significativamente distintas a las del suelo que se va a ensayar en campo. Objetos metálicos o suelo orgánico pueden afectar a la precisión del método.

Otros factores que afectan en los resultados del equipo son los compuestos químicos y mineralógicos también pueden como por ejemplo materiales suelos con alto contenido de hierro, roca volcánica o con una fracción significativa de partículas cementantes, suelos orgánicos, materiales reciclados o con contenido asfáltico, cemento portland, limo, ceniza u otros modificadores estabilizantes.

El agua que contiene el suelo si lleva sal o algún contaminante afectará igual en los resultados.

La temperatura a la cual tiene que estar el suelo para el ensayo está entre los 10°C y los 40°C; los efectos de la temperatura en el suelo van a depender de cada tipo de suelo.

La colocación del equipo durante el ensayo tiene que ser correcta ya que una mala colocación también afecta a los resultados. Los suelos no homogéneos, las superficies irregulares y suelos con grandes vacíos igualmente afectan los resultados.

Suelos con partículas sobredimensionadas causan un error en el cálculo del contenido de agua y la densidad.

Pueden haber sectores con un campo electromagnético fuerte generado por cables de alta tensión los cual puede generar errores en los cálculos de densidad y contenido de agua.

4.3.6 Calibración.

Previo a la calibración es necesario obtener los datos de densidad seca máxima y porcentaje de humedad óptima ya que se van a utilizar durante la calibración del Densímetro Eléctrico. El método que se usó para determinar los datos del Próctor en esta investigación fue el ASTM D1557-12 “Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56000ft-lbf/ft³ (2700kN-m/m³)).”

El equipo utilizado en esta investigación es un Densímetro Eléctrico HUMBOLDT H-4114SD.3F, es importante especificar el equipo utilizado ya que la calibración depende de cada equipo.

Las medidas tomadas con el Densímetro Eléctrico deben ser cuantificadas a través de cualquier método tradicional como el densímetro nuclear, cono y arena, o cualquier otro método que determine la densidad húmeda y porcentaje de agua. En esta investigación para la calibración del modelo de suelo se utilizó el Densímetro Nuclear TROXLER 3411 para la determinación de densidades húmedas y para el porcentaje de humedad se lo calculó a través del horno de secado eligiendo dos especímenes a la profundidad que se realizaron las mediciones de densidad cumpliendo con la norma ASTM D2216 “Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.” Por cada punto que se tome con el Densímetro Eléctrico, simultáneamente deberá tomarse con el Densímetro Nuclear y una muestra de humedad.

El objetivo del modelo de suelo es construir una curva que muestre los distintos valores de densidad y humedad de un mismo material. Para generar la correlación del modelo de suelo el fabricante propone lo siguiente: el equipo realiza una matriz con un mínimo de 6 puntos (entre 6 y 12 puntos) los cuales deben contener distintas medidas de humedad y densidad entre sí. Entre los distintos niveles de humedad y densidad debe haber 2 medidas de densidad distintas, uno cercano a la densidad máxima, y 3 contenidos de humedad

distintos, uno bajo, uno medio y uno alto este último cercano al contenido de agua óptimo. La densidad máxima y el contenido de agua óptimo se obtienen a través de los datos del Próctor que ya fue calculado con anterioridad.

La calibración fue realizada en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador. Para el modelo de suelo el material se levantó un sector de suelo compactado en el área donde se hicieron posteriormente los ensayos. Se prefirió obtener el material de esta manera ya que si se muestreaba de la pila de donde se estaba utilizando el suelo para la compactación podía existir una segregación en el material, alterando así las características del suelo del modelo con respecto al suelo en campo.

Gráfico 4.8 - Muestreo en campo.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Para lograr un buen modelo de suelo hay que generar condiciones iguales a las que se trabajó al material en campo. Para la colocación del material y posterior compactación en el Laboratorio se destinó un cajón de madera “Colorada” de 1m de largo por 1m de ancho por 0.40m de profundidad. El cajón fue unido mediante tacos igualmente de madera por lo tanto no había ningún tipo de metal, como clavos, que pueda influir con las medidas tomadas por el Densímetro Eléctrico.

Gráfico 4.9 - Cajón de madera.



Fotografía tomada durante la calibración.

Para realizar la compactación del material en el cajón se eligió un pisón de explosión o pisón compactador.

Gráfico 4.10 - Compactación del suelo con Pisón.



Fotografía tomada durante la calibración.

Gráfico 11 - Medición con Densímetro Eléctrico.



Gráfico 12 - Medición con Densímetro Nuclear.



Fotografías tomadas durante la calibración.

Como ya se explicó antes, el modelo necesita de 6 puntos con densidades y humedades distintas. Durante la calibración del equipo se empezó con una humedad baja del suelo, se compactó primero a una densidad baja y se realizaron las mediciones; luego se levantó el material se lo volvió a compactar a una densidad pegada a la máxima y se tomaron las respectivas mediciones. De la misma forma se procedió con la humedad media pero antes se humedeció el material para alcanzar la humedad deseada mezclándolo varias veces hasta que esté homogéneo, se lo compactó primero a una densidad baja y se realizaron las mediciones; luego se levantó el material y se lo volvió a compactar a una densidad pegada a la máxima para posteriormente realizar las mediciones nuevamente. Igual fue el procedimiento con la humedad alta (la cual debe estar cercana a la óptima) se humedeció el material y se compactó a una densidad baja se realizaron las mediciones, se levantó el material y se lo volvió a compactar pero esta vez a una densidad alta o pegada a la máxima y se tomaron las medidas con los dos equipos.

Para humedecer el material se calculó la masa de agua que necesitaba el suelo mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 4.5

$$W_{agua} = \frac{W_m * (h - h_{nat})}{100 + h_{nat}}$$

Donde:

W_{agua} = Masa del agua (kg)

W_m = Masa total del suelo húmedo (kg).

h = Humedad a la que se quiere llegar (%).

h_{nat} = Humedad a la que se encuentra el suelo (%).

Ecuación 4.6

$$W_m = \rho_m * V$$

Donde:

W_m = Masa total del suelo húmedo (kg).

ρ_m = Densidad del suelo Húmedo (kg/m³). Calculada con el Densímetro Nuclear.

V = Volumen del material (m³). Calculado en la caja.

Valga recalcar que en cada punto se realizó un ensayo con el Densímetro Nuclear y se obtuvo la humedad con un secado al horno.

En el caso de la compactación del suelo se la realizó en 2 capas. Primero una capa de 12.5 cm de espesor y se compacto; después se repitió el proceso encima de la capa ya compactada. El espesor del material compactado finalmente fue de 25cm. pero las medidas se tomaban a 15 cm. de profundidad. Este proceso se llevó a cabo en los 6 puntos.

Finalmente, los datos obtenidos de densidad húmeda y contenido de agua con el Densímetro Nuclear y el ensayo de humedad respectivamente deben ser ingresados en el equipo en el punto que corresponda. De esta manera el equipo genera dos gráficos: uno de Impedancia vs Densidad Húmeda y otro de Peso del Agua vs un valor de C/R. A estos puntos el operador puede incluirlos o segregarlos según crea conveniente para ajustar la curva. Con los datos ingresados en cada punto, el quipo genera un número que es producto de la precisión global de correlación generada llamada "FIT"; este número de correlación FIT debe esta entre 0.600 y 1.000 para que los datos del modelo de suelo sean considerados aceptables para realizar los ensayos en campo. Mientras más pegado esté el número de correlación FIT a 1.000 es mejor pero el mínimo valor aceptado es de 0.600.

4.3.7 Datos de la Calibración del Modelo de Suelo del Densímetro Eléctrico HUMBOLDT H-4114SD.3F.

4.3.7.1 Datos de la Caracterización del Material.

Para la caracterización del material se realizaron 2 granulometrías y 2 abrasiones de 2 muestras de suelo. No se pudieron llevar a cabo los ensayos de límites Atterberg debido a que el porcentaje de suelo fino que contenían las 2 muestras era no plástico o de baja plasticidad y no se podía moldear el suelo fino tanto para el ensayo de límite líquido como para el de límite plástico ya que se llegaba a una consistencia del suelo muy inestable al humedecerla, por lo tanto se clasifico a la porción fina del suelo como limo de baja plasticidad.

Clasificación SUCS:

Los siguientes criterios se tomaron en cuenta para realizar la clasificación del suelo según el SUCS de la primera muestra de suelo con los datos obtenidos en los ensayos:

- 86.7% del material fue retenido en el tamiz No 200 => suelo de grano grueso.
- Del 86.7% el 59.44% pasa por el tamiz No 4 => arena (S).
- El 13.3% de suelo que pasa por el tamiz No 200 es un limo de baja plasticidad (ML) => arena limosa (SM).
- El porcentaje retenido en el tamiz No 4 es de 35.2% => “con grava.”
- Finalmente el suelo es una “Arena Limosa con Grava” cuya nomenclatura será: SM con grava.

Los datos de la granulometría y abrasión para realizar esta clasificación se encuentran en los Anexos 1 y 2 respectivamente.

Los siguientes criterios se tomaron en cuenta para realizar la clasificación del suelo según el SUCS de la segunda muestra de suelo con los datos obtenidos en los ensayos:

- 89.0% del material fue retenido en el tamiz No 200 => suelo de grano grueso.
- Del 89% el 56.33% pasa por el tamiz No 4 => arena (S).
- El 11.0% de suelo que pasa por el tamiz No 200 es un limo de baja plasticidad (ML) => arena limosa (SM).
- $C_u = 74.19$ y $C_c = 1.82$ => Arena bien graduada (SW).
- El porcentaje retenido en el tamiz No 4 es de 35.2% => “con grava.”
- Finalmente el suelo es una “Arena bien Graduada con Limo y Grava” cuya nomenclatura será: SW-SM con grava.

Los datos de la granulometría y abrasión para realizar esta clasificación se encuentran en los Anexos 3 y 4 respectivamente.

Clasificación AASHTO:

Los siguientes criterios se tomaron en cuenta para realizar la clasificación AASHTO de la primera muestra de suelo con los datos obtenidos en los ensayos:

- En el tamiz No 10 se retuvo el 48.9% del suelo.
- En el tamiz No 40 se retuvo el 20.80% del suelo.
- En el tamiz No 200 se retuvo el 14.80% del suelo.
- IP se asume que es 0.
- Por lo tanto con estos porcentajes de suelo retenido en los distintos tamices el suelo se encuentra en el grupo A-1-a.

Los datos de la granulometría y abrasión para realizar esta clasificación se encuentran en los Anexos 1 y 2 respectivamente.

Los siguientes criterios se tomaron en cuenta para realizar la clasificación AASHTO de la segunda muestra de suelo con los datos obtenidos en los ensayos:

- En el tamiz No 10 se retuvo el 41.70% del suelo.
- En el tamiz No 40 se retuvo el 18.10% del suelo.
- En el tamiz No 200 se retuvo el 12.60% del suelo.
- IP se asume que es 0.
- Por lo tanto con estos porcentajes de suelo retenido en los distintos tamices el suelo se encuentra en el grupo A-1-a.

Los datos de la granulometría y abrasión para realizar esta clasificación se encuentran en los Anexos 3 y 4 respectivamente.

4.3.7.2 Datos del Ensayo de Compactación del Suelo en Laboratorio Utilizando un Esfuerzo Modificado (Próctor Modificado) ASTM 1557

Se realizaron en total tres ensayos de compactación de tres muestras aleatorias extraídas del suelo donde llevó a cabo la investigación. El resumen de los resultados es el siguiente:

- Muestra 1

Densidad Seca Máxima: 1.990 g/cm³

Porcentaje de Humedad Óptima: 9.21%

Datos y gráfico del ensayo revisar en Anexo No 5.

- Muestra2

Densidad Seca Máxima: 1.940 g/cm³

Porcentaje de Humedad Óptima: 9.63%

Datos y gráfico del ensayo revisar en Anexo No 6.

- Muestra 3

Densidad Seca Máxima: 1.970 g/cm³

Porcentaje de Humedad Óptima: 9.73%

Datos y gráfico del ensayo revisar en Anexo No 7.

Durante la caracterización del material se determinó que el material a ensayar es una arena limosa con grava y a través de la experiencia en distintos ensayos de compactación de este tipo de arenas con similares características las densidades secas máximas obtenidas son igual o mayores a 2.000 g/cm³. Para el modelo de suelo se tomaron los valores del Próctor de la Muestra 1 ya que la densidad seca máxima obtenida es la mayor de los tres ensayos. Por lo tanto se trabajó con una densidad seca máxima de 1.990 g/cm³ y un Porcentaje de Humedad Óptima de 9.21%.

4.3.7.3 Datos obtenidos con el Densímetro Nuclear y Humedad que se Ingresaron al Densímetro Eléctrico para Generar el Modelo de Suelo.

Por cada punto que se tomó con el Densímetro Eléctrico se realizaron cuatro medidas consecutivas con el Densímetro Nuclear y se realizó un promedio el cual fue el que se ingresó como dato al respectivo punto del Densímetro Eléctrico HUMBOLDT H-4114SD.3F1. Cabe recalcar que el dato que se ingresó del Densímetro Nuclear es el de Densidad Húmeda (d húmeda) y los otros valores (d seca, %W y % Compactación) son de referencia. Por otra parte, el valor calculado de contenido de humedad a través de secado en el horno es el que se ubica a la derecha de la tabla y es el que se ingresó en equipo (Densímetro Eléctrico).

La tabla que se presenta a continuación contiene los resultados realizados en el modelo de suelo utilizando el Densímetro Nuclear para el cálculo de Densidad Húmeda y el Secado en el Horno para el cálculo de la Humedad. El material ensayado tenía una capa de espesor constante modelada a diferentes grados de humedad y compactación: humedad baja y

densidad baja, humedad baja y densidad alta, humedad media y densidad baja, humedad media y densidad alta, humedad alta y densidad baja, humedad alta y densidad alta.

Tabla 4.2 - Valores Ingresados en el Densímetro Eléctrico para su Calibración

DENSIDAD HUMEDA Y HUMEDAD PARA INGRESAR EN MODELO DEL EDG					
PUNTO 1 Humedad Baja-Densidad Baja					
Pto	δ seca (g/cm ³)	δ húmeda (g/cm ³)	W (%)	Compactación (%)	Humedad obtenida en Horno
1	1742	1857	6.6	87.6	7.799%
2	1719	1835	6.8	86.4	
3	1761	1872	6.3	88.5	
4	1743	1849	6.1	87.6	
Promedio	1741.25	1853.25	6.45	87.525	
PUNTO 2 Humedad Baja-Densidad Alta					
Pto	δ seca (g/cm ³)	δ húmeda (g/cm ³)	W (%)	Compactación (%)	Humedad obtenida en Horno
1	1936	2040	5.4	87.6	7.799%
2	1917	2030	5.9	86.4	
3	1887	1998	5.9	88.5	
4	1897	2010	5.9	87.6	
Promedio	1909.25	2019.5	5.775	87.525	
PUNTO 3 Humedad Media-Densidad Baja					
Pto	δ seca (g/cm ³)	δ húmeda (g/cm ³)	W (%)	Compactación (%)	Humedad obtenida en Horno
1	1915	2060	7.6	96.2	8.795%
2	1889	2040	8	94.9	
3	1904	2055	7.9	95.7	
4	1893	2045	8.1	95.1	
Promedio	1900.25	2050	7.9	95.475	
PUNTO 4 Humedad Media-Densidad Alta					
Pto	δ seca (g/cm ³)	δ húmeda (g/cm ³)	W (%)	Compactación (%)	Humedad obtenida en Horno
1	1975	2129	7.8	99.2	8.795%
2	1980	2120	7.1	99.5	
3	1927	2080	7.9	96.8	
4	1910	2086	8.5	96.6	
Promedio	1948	2103.75	7.825	98.025	
PUNTO 5 Humedad Alta-Densidad Baja					
Pto	δ seca (g/cm ³)	δ húmeda (g/cm ³)	W (%)	Compactación (%)	Humedad obtenida en Horno
1	1893	2055	8.6	95.1	9.072%
2	1899	2063	8.6	95.4	
3	1927	2080	7.1	96.8	
4	1909	2060	7.9	95.9	
Promedio	1907	2064.5	8.05	95.8	
PUNTO 6 Humedad Alta-Densidad Alta					
Pto	δ seca (g/cm ³)	δ húmeda (g/cm ³)	W (%)	Compactación (%)	Humedad obtenida en Horno
1	1972	2145	8.8	99.1	9.072%
2	1984	2156	8.6	99.7	
3	1938	2088	7.7	97.4	
4	1995	2151	7.9	100.2	
Promedio	1972.25	2135	8.25	99.1	

Después de haber ingresado los valores de densidades húmedas y contenidos de agua, el Densímetro Eléctrico realizó los gráficos de Impedancia vs Densidad Húmeda y Peso del Agua vs C/R con los cuales se obtuvo un número de correlación FIT de 0.745 lo cual es aceptable por lo tanto se culminó con la calibración del modelo de suelo habilitando la realización de los ensayos en campo.

4.3.8 Procedimiento.

Encender el Densímetro Eléctrico y elegir el modelo de suelo para realizar el ensayo.

Gráfico 4.13 - Encendido del equipo.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

Limpiar el área de ensayo de cualquier piedra o suelo suelto, la superficie debe estar nivelada. El suelo debe estar en contacto con la plantilla para dardos en su gran mayoría. Usar la plantilla para dardos como guía para clavar los 4 dardos en el suelo. Los dardos insertados en el suelo no pueden estar inclinados más de 20° con la vertical. El hombro de los dardos debe estar al mismo nivel del suelo. Si al momento de introducir los dardos se encuentra con una roca que impide su introducción debe moverse el sitio de prueba ligeramente.

Gráfico 4.14 - Plantilla y Dardos.



Fotografías tomadas durante ensayos en campo.

Conectar el sensor de suelo al equipo, después colocarlo en medio de la plantilla para dardos con los pines hacia arriba. Un pedazo de velcro pegado en la plantilla ayuda a que el sensor de suelo no se caiga.

Gráfico 4.15 - Conexión de sensor de suelo.



Fotografías tomadas durante ensayos en campo.

Un extremo del cable del sensor de suelo conectar en uno de los pines del sensor de suelo y el otro extremo con la pinza de alicate conectar a un dardo. Repetir el mismo proceso con el otro cable de sensor de suelo pero en el otro pin y en un dardo contrario al ya conectado. Tomar en cuenta que la posición de las pinzas de alicate debe ser lo más recto posible y los cables nunca deben cruzarse.

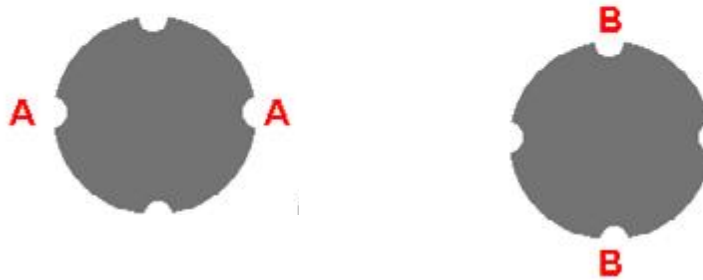
Gráfico 4.16 - Conexión cables del sensor de suelo.



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

El Densímetro Nuclear HUMBOLDT H-4114SD.3F1 toma los datos en dos posiciones para arrojar los datos finales y es necesario colocar los cables primero en la posición AA y luego en la posición BB, durante el cambio de posición de los cables hay que tener cuidado de no cruzar los cables.

Gráfico 4.17 - Posición AA y BB para ensayo del Densímetro Eléctrico.



Fuente: Manual del Usuario Densímetro Eléctrico HUMBOLDT H-4114SD.3F1

Conectar el sensor de temperatura al sensor de suelo. Con la sonda tipo T hacer un agujero alejado de la plantilla e introducir el sensor de temperatura en el agujero.

Gráfico 4.18 - Conexión de sonda de temperatura



Fotografías tomadas durante ensayos en campo.

Una vez realizadas todas las conexiones es posible realizar el ensayo y obtener los resultados de densidad húmeda y contenido de agua.

Gráfico 4.19 - Densímetro Eléctrico listo para el ensayo



Fotografía tomada durante ensayos en campo.

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Resultados de los Ensayos con Cono y Arena.

Los valores obtenidos de densidad seca, densidad húmeda, humedad y porcentaje de compactación in-situ a través del ensayo de Cono y Arena son los siguientes:

Tabla 5.1 - Resultados de los Ensayos con Cono y Arena

CONO Y ARENA				
Pto.	D. Seca (g/cm ³)	D. Húmeda (g/cm ³)	Humedad (%)	Compactación (%)
1	1.907	2.053	7.68	95.82
2	1.874	2.031	8.35	94.18
3	1.940	2.087	7.58	97.47
4	1.909	2.072	8.57	95.92
5	1.833	1.983	8.17	92.13
6	1.933	2.083	7.79	97.11
7	1.897	2.051	8.10	95.34
8	1.944	2.090	7.52	97.69
9	1.911	2.063	7.94	96.03
10	1.891	2.044	8.08	95.05
11	1.874	2.018	7.65	94.19
12	1.854	1.995	7.59	93.17
13	1.911	2.044	6.97	96.02
14	1.825	1.976	8.26	91.72
15	1.908	2.065	8.25	95.86
16	1.865	2.005	7.49	93.71
17	1.919	2.056	7.15	96.44
18	1.914	2.049	7.07	96.17
19	1.867	1.998	7.05	93.80
20	1.839	2.014	9.54	92.39
21	1.944	2.096	7.79	97.70
22	1.893	2.007	6.03	95.13
23	1.846	1.985	7.53	92.78
24	1.913	2.028	6.02	96.13
25	1.922	2.041	6.20	96.57

Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver como se calcularon los datos de los resultados obtenidos del cono y arena revisar los Anexos del 8 al 32.

5.2 Resultados de los Ensayos con Densímetro Nuclear.

Durante los ensayos con el Densímetro Nuclear se tomaron 2 medidas en cada punto. El resultado que se observa en la tabla es el promedio de las 2 medidas.

Los valores obtenidos de densidad seca, densidad húmeda, humedad y porcentaje de compactación in-situ con del Densímetro Nuclear son los siguientes:

Tabla 2 - Resultados de Ensayos con el Densímetro Nuclear

DENSÍMETRO NUCLEAR				
Pto.	D. Seca (g/cm ³)	D. Húmeda (g/cm ³)	Humedad (%)	Compactación (%)
1	2.051	2.204	7.45	103.05
2	1.984	2.147	8.20	99.65
3	1.970	2.113	7.40	98.85
4	2.007	2.147	7.05	100.85
5	2.000	2.152	7.65	100.45
6	1.988	2.139	7.60	99.90
7	1.964	2.135	7.00	100.20
8	1.964	2.113	7.60	98.65
9	1.972	2.125	7.75	99.10
10	1.984	2.138	7.75	99.70
11	1.947	2.094	7.50	97.85
12	1.955	2.104	7.60	98.20
13	1.980	2.116	6.80	99.50
14	1.982	2.124	7.20	99.60
15	1.922	2.065	7.45	96.55
16	2.003	2.145	7.05	100.70
17	1.964	2.095	6.45	98.90
18	1.969	2.101	6.70	98.90
19	1.964	2.109	7.00	99.00
20	1.927	2.125	10.25	96.85
21	1.975	2.130	7.90	99.25
22	1.954	2.077	6.35	98.15
23	1.973	2.150	9.00	99.10
24	1.971	2.093	6.15	99.05
25	1.910	2.023	5.95	95.95

Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver como se calcularon los datos de los resultados obtenidos del cono y arena revisar los Anexos del 33 y 34.

5.3 Resultados de los Ensayos con Densímetro Eléctrico.

En los ensayos con el Densímetro Eléctrico se tomaron 3 medidas en el mismo punto, el resultado que se observa a continuación es el promedio de las 3 medidas.

Los valores obtenidos de densidad seca, densidad húmeda, humedad y porcentaje de compactación in-situ con del Densímetro Eléctrico son los siguientes:

Tabla 5.3 - Resultados de Ensayos con el Densímetro Eléctrico

DENSÍMETRO ELÉCTRICO				
Pto.	D. Seca (g/cm ³)	D. Húmeda (g/cm ³)	Humedad (%)	Compactación (%)
1	1.863	2.030	9.000	93.600
2	1.819	1.980	8.800	91.433
3	1.831	1.991	8.800	92.000
4	1.816	1.980	9.033	91.267
5	1.826	1.998	9.400	91.800
6	1.802	1.965	9.000	90.600
7	1.821	1.991	9.300	91.533
8	1.817	1.983	9.200	91.300
9	1.837	2.012	9.500	92.333
10	1.851	2.024	9.367	93.000
11	1.855	2.024	9.100	93.233
12	1.813	1.977	9.000	91.133
13	1.834	2.002	9.133	92.200
14	1.874	2.044	9.100	94.133
15	1.872	2.035	8.700	94.100
16	1.837	1.997	8.733	92.267
17	1.816	1.973	8.667	91.267
18	1.828	1.987	8.667	91.867
19	1.819	1.972	8.500	91.333
20	1.887	2.059	9.133	94.867
21	1.866	2.027	8.600	93.767
22	1.853	2.014	8.700	93.100
23	1.860	2.026	8.967	93.467
24	1.748	1.906	9.000	87.867
25	1.738	1.890	8.800	87.300

Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver como se calcularon los datos de los resultados obtenidos del Densímetro Eléctrico revisar los Anexos del 35 al 38.

5.4 Correlación de Datos.

5.4.1 Definición de Correlación Lineal.

La correlación lineal es definida como la relación o dependencia que existe entre dos variables mediante una distribución bidimensional.¹⁶ En otras palabras define que tan estrecha es la relación entre dos grupos de variables. Se la representa en un gráfico de dispersión mediante una línea recta. El valor de mayor interés es el coeficiente de correlación (r) ya que es un valor numérico nos indica que tan buena o que tan mala es la correlación que existe entre las dos variables, es decir nos muestra numéricamente la calidad de relación entre dichas variables. El coeficiente de correlación r se encuentra entre -1 y 1 es decir $-1 \leq r \leq 1$. Si r es igual o está cerca de -1 o 1 se puede considerar a la correlación perfecta o fuerte, si r está pegado o es igual a 0 se considera una correlación débil o nula. $r = \sqrt{R^2}$

Donde:

r = Coeficiente de correlación.

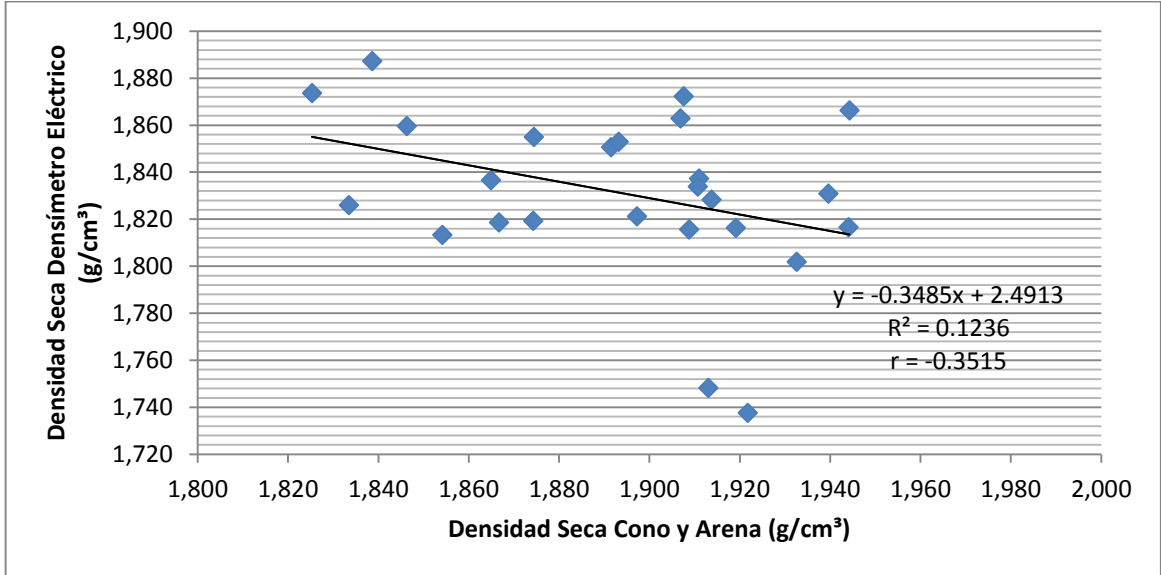
R^2 = Coeficiente de determinación.

Si bien el análisis de correlación se realiza para analizar la relación que existe entre una variable dependiente con una variable independiente en esta investigación las 2 variables que se analizan en los cuatro casos de correlación son independiente ya que los resultados en cada punto obtenidos no van a verse influidos por cualquier otro de los métodos empleados. Pero, como se especificó anteriormente para analizar los datos que arroja el densímetro eléctrico se los comparará con los datos del cono y arena y del densímetro nuclear por separado es decir estos dos últimos métodos son variables de control frente a las variables del densímetro eléctrico. Finalmente, para poder establecer un método de análisis se establece a los resultados del cono y arena y del densímetro nuclear como variables independientes porque van a ser variables de control y a los resultados del densímetro eléctrico como variables dependientes.

¹⁶ Diccionario Enciclopédico Vox 1. Editorial Larousse. 2009.

5.4.2 Correlación de Densidad Seca Cono y Arena vs Densímetro Eléctrico.

Gráfico 5.1 – Densidad Seca Cono y Arena vs Densímetro Eléctrico

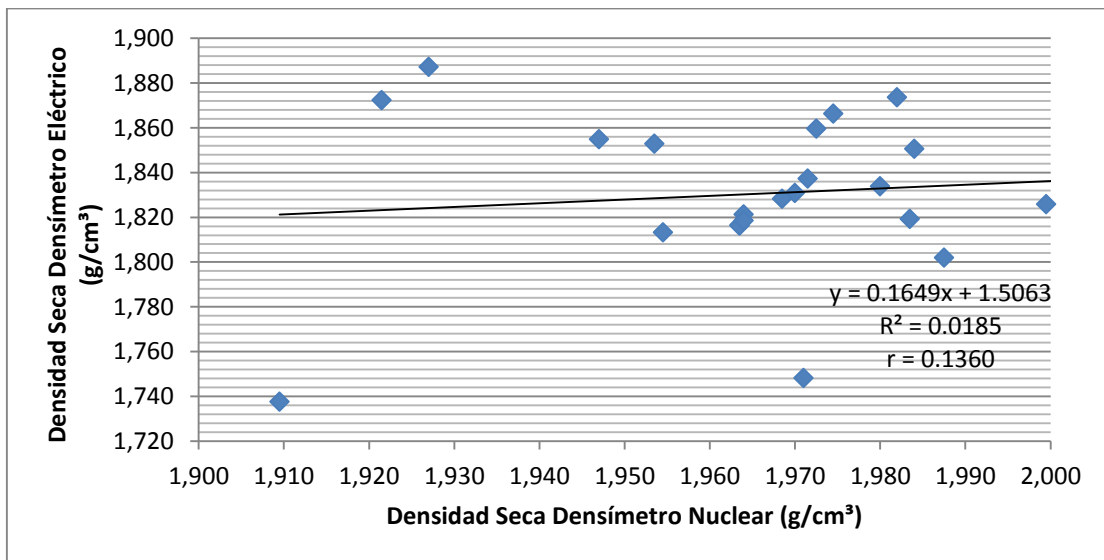


Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver cómo se obtuvo la ecuación del gráfico (y), el coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R^2) revisar Anexos 39 y 40.

5.4.3 Correlación de Densidad Seca Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico.

Gráfico 5.2 – Densidad Seca Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico

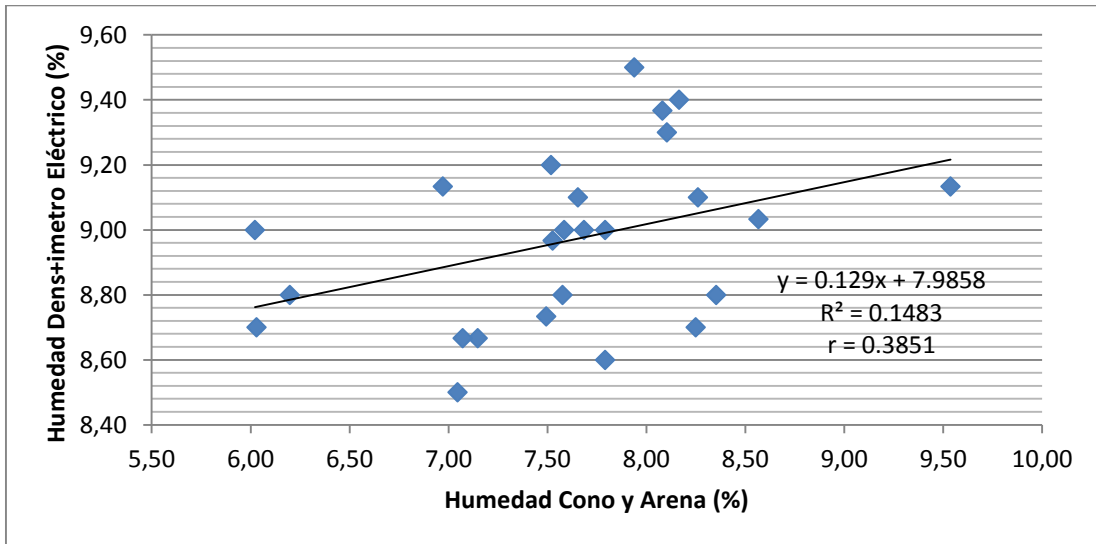


Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver cómo se obtuvo la ecuación del gráfico (y), el coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R²) revisar Anexos 41 y 42.

5.4.4 Correlación de Humedad Cono y Arena vs Densímetro Eléctrico.

Gráfico 5.3 – Humedad Cono y Arena vs Densímetro Eléctrico

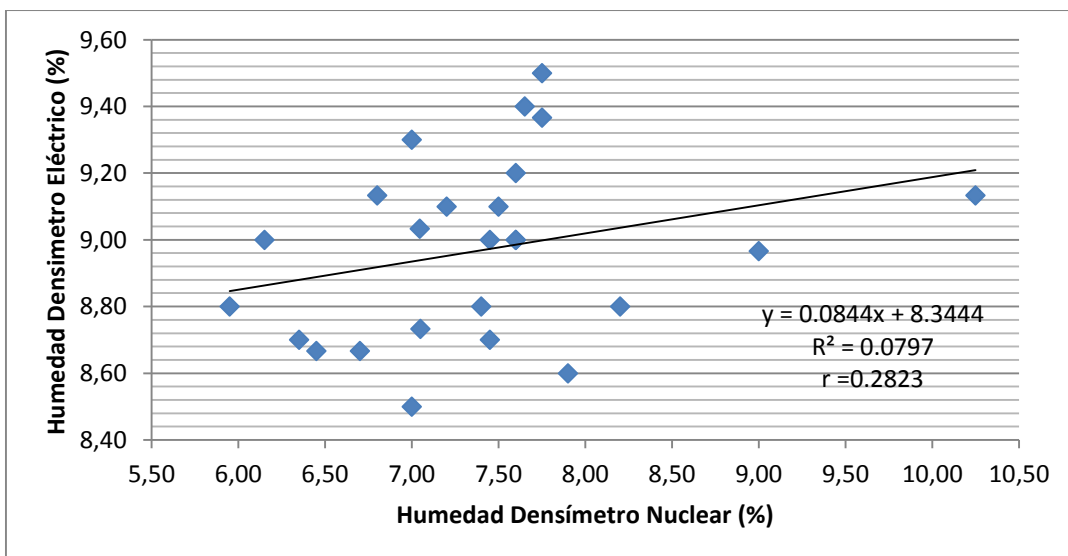


Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver cómo se obtuvo la ecuación del gráfico (y), el coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R²) revisar Anexos 43 y 44.

5.4.5 Correlación de Humedad Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico.

Gráfico 5.4 - Humedad Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico



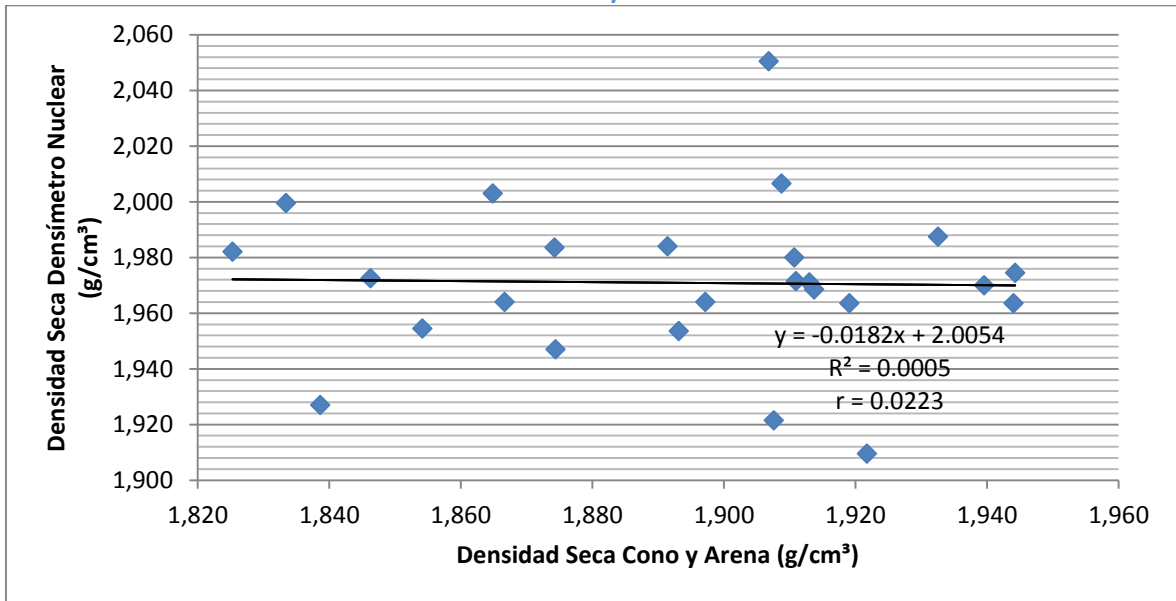
Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver cómo se obtuvo la ecuación del gráfico (y), el coeficiente de correlación (r) y el coeficiente de determinación (R²) revisar Anexos 45 y 46.

Por motivos únicamente comparativos a continuación se presentan los gráficos de correlación que existen entre el cono y arena y el densímetro nuclear tanto en densidad seca como en humedad.

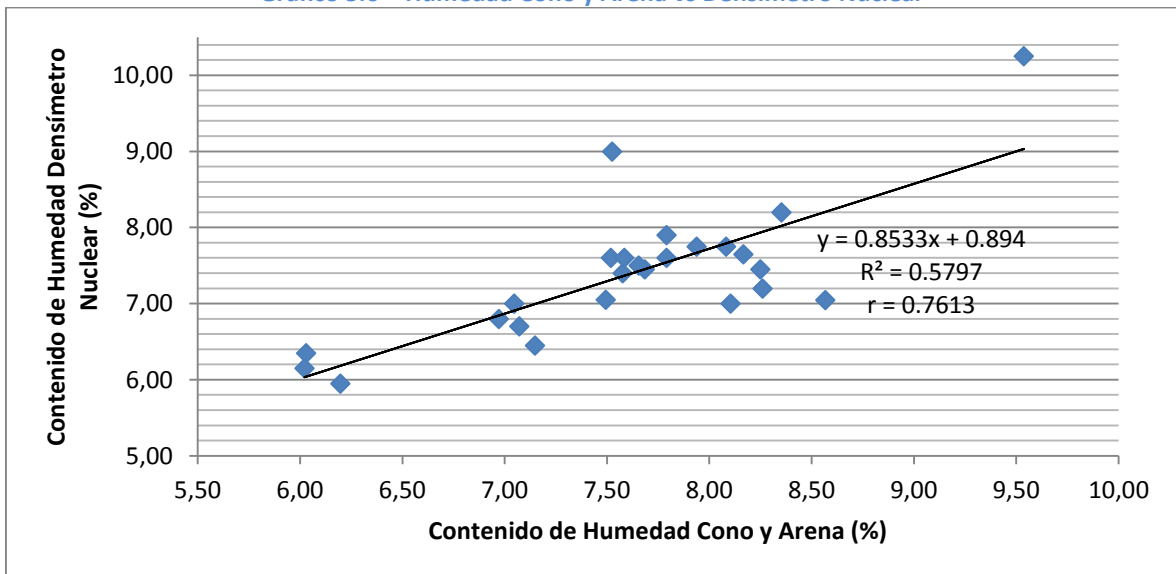
5.4.6. Correlación de Densidad Seca Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico.

Gráfico 5.5 – Densidad Seca Cono y Arena vs Densímetro Nuclear



5.4.7. Correlación de Densidad Seca Densímetro Nuclear vs Densímetro Eléctrico.

Gráfico 5.6 – Humedad Cono y Arena vs Densímetro Nuclear



5.5 Análisis de Varianza.

El propósito del análisis de varianza es determinar si existe una diferencia significativa entre las medias de dos poblaciones para lo cual hay que establecer dos hipótesis para determinar si existe o no aquella diferencia; la primera hipótesis o hipótesis nula (H_0) propone que las varianzas de los dos grupos de variables son iguales es decir $S_1^2 = S_2^2$, la segunda hipótesis o hipótesis alternativa (H_1) propone que la varianza del primer grupo de variables es distinta a la varianza del segundo grupo de variables es decir $S_1^2 \neq S_2^2$. Para poder analizar si existe o no diferencias entre los dos grupos de variables y aceptar o rechazar las hipótesis planteadas es necesario determinar F. El valor de F es el resultado de la división entre la varianza del primer grupo para la varianza del segundo grupo es decir $F = \frac{S_1^2}{S_2^2}$; a F se la compara con un valor de F crítico determinado a través de Tablas que muestran los Puntos de Porcentaje de la Distribución F para X grados de libertad. Si el valor de F es menor al F crítico entonces se acepta la Hipótesis Nula (H_0) concluyendo que no existen diferencias entre un grupo y otro. Si el valor F es mayor al F crítico entonces se rechaza la Hipótesis Nula (H_0) y se acepta la Hipótesis Alternativa (H_1) concluyendo que si existen diferencias entre el grupo 1 y el grupo 2.

Las Tablas de Puntos de la Distribución F van a depender del nivel de significancia con el que se desee trabajar. Cuando se elige trabajar con cierto valor de significancia (α) el valor con el que se deberá buscar en la tabla es para $\alpha/2$. En esta investigación se decidió trabajar con una significancia de 5% es decir $\alpha = 0.05$ por lo tanto para hallar el F crítico es necesario ver en la Tabla de Puntos de Distribución F de $\alpha/2 = 0.025$. Anexo 51.

5.5.1 Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Densidad Seca a través del Cono y Arena y Densímetro Eléctrico.

Planteamiento de hipótesis:

- Hipótesis Nula: $S_1^2 = S_2^2 \rightarrow$ No existe diferencia entre la utilización del método de Cono y Arena y de Densímetro Eléctrico para la determinación de la Densidad Seca in-situ.

- Hipótesis Alternativa: $S_1^2 \neq S_2^2 \rightarrow$ Si existe diferencia entre la utilización del método de Cono y Arena y de Densímetro Eléctrico para la determinación de la Densidad Seca in-situ.

Tabla 5.4 - Análisis de Varianza de Densidad Seca de Cono y Arena y Densímetro Eléctrico

	<i>D Seca Cono y Arena</i>	<i>D Seca Densímetro Eléctrico</i>
Media	1.893303197	1.831346667
Varianza	0.001232777	0.001212041
Observaciones	25	25
Grados de libertad	24	24
F	1.017108183	
Valor crítico para F	2.269277278	
F<F crítico	Hipótesis Nula Aceptada	

Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver cómo de obtuvieron los valores de la Tabla de Análisis de Varianza revisar el Anexo 47.

5.5.2 Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Densidad Seca a través del Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico.

Planteamiento de hipótesis:

- Hipótesis Nula: $S_1^2 = S_2^2 \rightarrow$ No existe diferencia entre la utilización del método de Densímetro Nuclear y de Densímetro Eléctrico para la determinación de la Densidad Seca in-situ.
- Hipótesis Alternativa: $S_1^2 \neq S_2^2 \rightarrow$ Si existe diferencia entre la utilización del método de Densímetro Nuclear y de Densímetro Eléctrico para la determinación de la Densidad Seca in-situ.

Tabla 5.5 - Análisis de Varianza de Densidad Seca de Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico

	<i>D Seca Densímetro Nuclear</i>	<i>D Seca Densímetro Eléctrico</i>
Media	1.9709	1.831346667
Varianza	0.000823813	0.001212041
Observaciones	25	25
Grados de libertad	24	24
F		1.471258911
Valor crítico para F		2.269277278
F<F crítico	Hipótesis Nula Aceptada	

Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver cómo de obtuvieron los valores de la Tabla de Análisis de Varianza revisar el Anexo 48.

5.5.3 Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Humedad a través del Cono y Arena y Densímetro Eléctrico.

Planteamiento de hipótesis:

- Hipótesis Nula: $S_1^2 = S_2^2 \rightarrow$ No existe diferencia entre la utilización del método de Cono y Arena y de Densímetro Eléctrico para la determinación de la Humedad in-situ.
- Hipótesis Alternativa: $S_1^2 \neq S_2^2 \rightarrow$ Si existe diferencia entre la utilización del método de Cono y Arena y de Densímetro Eléctrico para la determinación de la Humedad in-situ.

Tabla 5.6 - Análisis de Varianza de Humedad de Cono y Arena y Densímetro Eléctrico

	<i>Humedad Cono y Arena</i>	<i>Humedad Densímetro Eléctrico</i>
Media	7.614743558	8.968
Varianza	0.634995423	0.071248148
Observaciones	25	25
Grados de libertad	24	24
F	8.912448109	
Valor crítico para F	2.269277278	
F>F crítico	Hipótesis nula rechazada, hipótesis alternativa aceptada.	

Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver cómo de obtuvieron los valores de la Tabla de Análisis de Varianza revisar el Anexo 49.

5.5.4 Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Humedad a través del Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico.

Planteamiento de hipótesis:

- Hipótesis Nula: $S_1^2 = S_2^2 \rightarrow$ No existe diferencia entre la utilización del método de Densímetro Nuclear y de Densímetro Eléctrico para la determinación de la Humedad in-situ.

- Hipótesis Alternativa: $S_1^2 \neq S_2^2 \rightarrow$ Si existe diferencia entre la utilización del método de Densímetro Nuclear y de Densímetro Eléctrico para la determinación de la Humedad in-situ.

Tabla 5.7 - Análisis de Varianza de Humedad de Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico

	<i>Humedad Densímetro Nuclear</i>	<i>Humedad Densímetro Eléctrico</i>
Media	7.3918	8.968
Varianza	0.797576833	0.071248148
Observaciones	25	25
Grados de libertad	24	24
F	11.19435177	
Valor crítico para F	2.269277278	
F>F crítico	Hipótesis nula rechazada, hipótesis alternativa aceptada.	

Fuente: Juan Martín Flores Cano

Para ver cómo de obtuvieron los valores de la Tabla de Análisis de Varianza revisar el Anexo 50.

Por motivos únicamente comparativos a continuación se presentan los gráficos de correlación que existen entre el cono y arena y el densímetro nuclear tanto en densidad seca como en humedad.

5.5.5 Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Densidad Seca a través del Cono y Arena y Densímetro Nuclear.

Planteamiento de hipótesis:

- Hipótesis Nula: $S_1^2 = S_2^2 \rightarrow$ No existe diferencia entre la utilización del método de Cono y Arena y de Densímetro Nuclear para la determinación de la Densidad Seca in-situ.
- Hipótesis Alternativa: $S_1^2 \neq S_2^2 \rightarrow$ Si existe diferencia entre la utilización del método de Cono y Arena y de Densímetro Nuclear para la determinación de la Densidad Seca in-situ.

Tabla 5.8 - Análisis de Varianza de Humedad de Densímetro Nuclear y Densímetro Eléctrico

	<i>D Seca Cono y Arena</i>	<i>D Seca Densímetro Eléctrico</i>
Media	1.893303197	1.9709
Varianza	0.001232777	0.000823813
Observaciones	25	25
Grados de libertad	24	24
F	1.496429478	
Valor crítico para F	2.269277278	
F<F crítico	Hipótesis nula aceptada	

Fuente: Juan Martín Flores Cano

5.5.6 Análisis de Varianza de los Datos Obtenidos de Humedad a través del Cono y Arena y Densímetro Nuclear.

Planteamiento de hipótesis:

- Hipótesis Nula: $S_1^2 = S_2^2 \rightarrow$ No existe diferencia entre la utilización del método de Cono y Arena y de Densímetro Nuclear para la determinación de la Humedad in-situ.
- Hipótesis Alternativa: $S_1^2 \neq S_2^2 \rightarrow$ Si existe diferencia entre la utilización del método de Cono y Arena y de Densímetro Nuclear para la determinación de la Humedad in-situ.

Tabla 5.9 - Análisis de Varianza de Humedad de Cono y Arena y Densímetro Nuclear

	<i>Humedad Cono y Arena</i>	<i>Humedad Densímetro Nuclear</i>
Media	7.614743558	7.3918
Varianza	0.634995423	0.797576833
Observaciones	25	25
Grados de libertad	24	24
F	1.256035562	
Valor crítico para F	2.269277278	
F>F Crítico	Hipótesis Nula Aceptada	

Fuente: Juan Martín Flores Cano

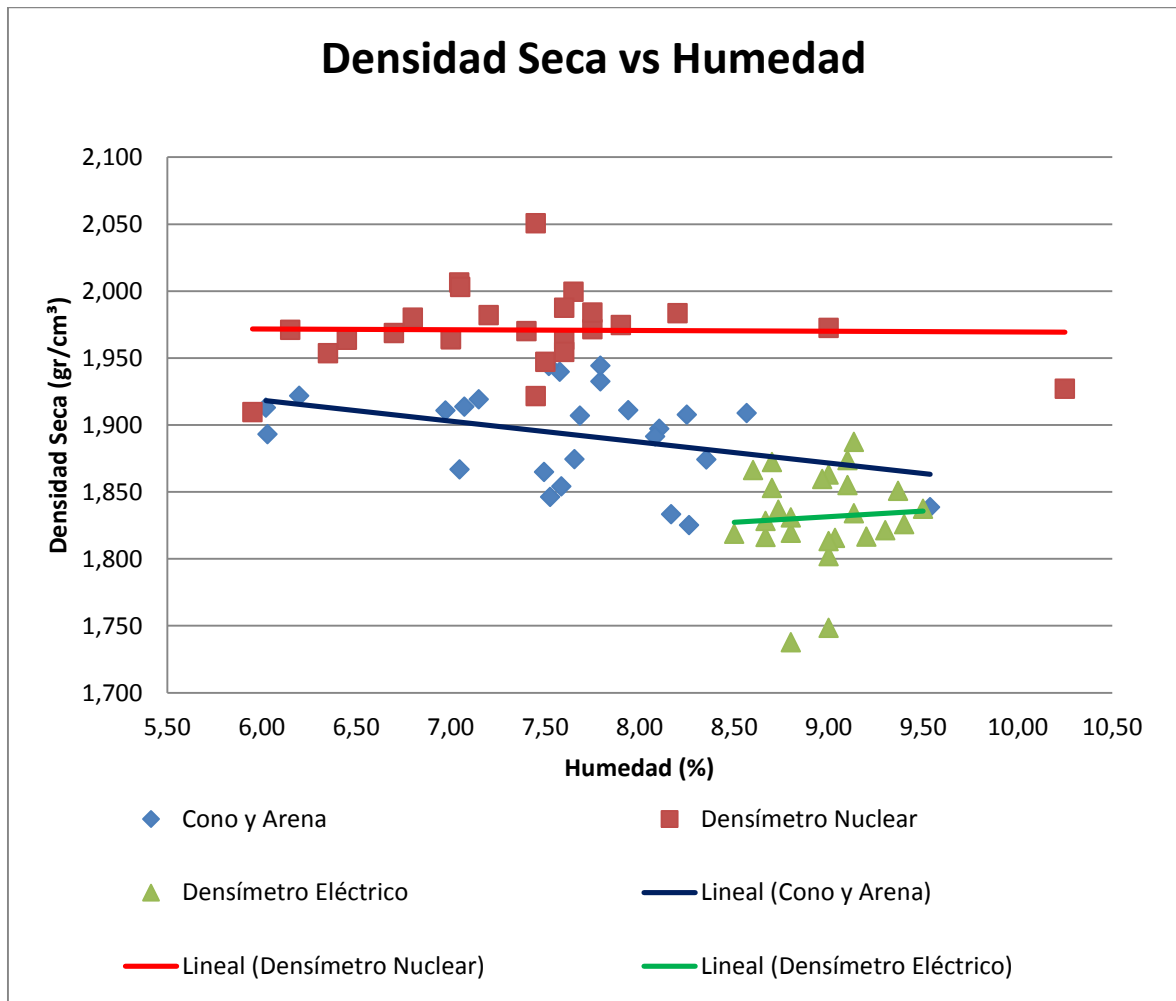
5.6. Tabla Comparativa de Densidad Seca y Humedad Obtenida con Cada Método.

Tabla 3: Tabla comparativa de resultados de densidad seca y humedad obtenida con cada método

Pto.	D. Seca (g/cm ³) Cono y Arena	Humedad (%) Cono y Arena	D. Seca (g/cm ³) Densímetro	Humedad (%) Densímetro Nuclear	D. Seca (g/cm ³) Densímetro	Humedad (%) Densímetro Eléctrico
1	1.907	7.68	2.051	7.45	1.863	9.000
2	1.874	8.35	1.984	8.20	1.819	8.800
3	1.940	7.58	1.970	7.40	1.831	8.800
4	1.909	8.57	2.007	7.05	1.816	9.033
5	1.833	8.17	2.000	7.65	1.826	9.400
6	1.933	7.79	1.988	7.60	1.802	9.000
7	1.897	8.10	1.964	7.00	1.821	9.300
8	1.944	7.52	1.964	7.60	1.817	9.200
9	1.911	7.94	1.972	7.75	1.837	9.500
10	1.891	8.08	1.984	7.75	1.851	9.367
11	1.874	7.65	1.947	7.50	1.855	9.100
12	1.854	7.59	1.955	7.60	1.813	9.000
13	1.911	6.97	1.980	6.80	1.834	9.133
14	1.825	8.26	1.982	7.20	1.874	9.100
15	1.908	8.25	1.922	7.45	1.872	8.700
16	1.865	7.49	2.003	7.05	1.837	8.733
17	1.919	7.15	1.964	6.45	1.816	8.667
18	1.914	7.07	1.969	6.70	1.828	8.667
19	1.867	7.05	1.964	7.00	1.819	8.500
20	1.839	9.54	1.927	10.25	1.887	9.133
21	1.944	7.79	1.975	7.90	1.866	8.600
22	1.893	6.03	1.954	6.35	1.853	8.700
23	1.846	7.53	1.973	9.00	1.860	8.967
24	1.913	6.02	1.971	6.15	1.748	9.000
25	1.922	6.20	1.910	5.95	1.738	8.800

Fuente: Juan Martín Flores Cano

Gráfico 5.7 – Gráfico comparativo de densidad seca y humedad obtenido con cada método y su respectiva línea de tendencia



Fuente: Juan Martín Flores

CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, VENTAJAS Y DESVENTAJAS.

6.1 CONCLUSIONES:

Las conclusiones realizadas parten de que esta investigación fue realizada a través de una calibración del equipo (Densímetro Eléctrico) hecha en laboratorio en un cajón de madera con un pisón de explosión para la compactación. Para realizar la calibración del equipo en campo no se pudo contar con las facilidades debido que era necesario contar con la maquinaria adecuada y el personal debido a un costo que tendría que ser afrontado por la empresa constructora y de la misma manera invertir tiempo en la realización de dicho modelo.

- Al realizar un análisis de correlación de la densidad seca obtenida con el densímetro eléctrico y el cono y arena y a su vez con el densímetro eléctrico y el densímetro nuclear se llegó a determinar que tienen un coeficiente de correlación bajo; por lo tanto los valores de densidad seca obtenidos con el densímetro eléctrico no mantienen ninguna relación con los valores de densidad seca obtenidos ni con el cono y arena ni con el densímetro nuclear.
- El análisis de correlación realizado entre las humedades obtenidas con el densímetro eléctrico y el cono y arena como también con el densímetro eléctrico y el densímetro nuclear arrojaron un coeficiente de correlación bajo; lo que quiere decir que las humedades determinadas a través del densímetro eléctrico no tiene ninguna relación con las humedades determinadas tanto con el cono y arena como con el densímetro nuclear.
- Según el análisis de varianza realizado entre las densidades secas obtenidas con el densímetro eléctrico y el cono y arena muestra que no existe ninguna diferencia entre la utilización de cualquiera de los dos métodos con una significancia del 95%.
- Los resultados obtenidos en el análisis de varianza entre los valores de densidad seca del densímetro eléctrico y el densímetro nuclear, los valores de humedad del densímetro eléctrico y el cono y arena y los valores de humedad del densímetro eléctrico y densímetro nuclear muestran que si existe una diferencia entre la utilización de un método y otro con una significancia del 95%.

- Los resultados tanto de humedad como de densidad seca que arrojaron el cono y arena y el densímetro nuclear no son similares a pesar de que se realizó una calibración previa a la investigación.

6.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DENSÍMETRO ELÉCTRICO.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL DENSÍMETRO ELÉCTRICO	
Ventajas	Desventajas
Rapidez en la obtención de resultados.	Para generar el modelo de suelo es necesario contar con otro equipo (Cono y Arena o Densímetro Nuclear).
No produce ningún riesgo a la salud del operador a diferencia del densímetro nuclear por la radiación.	Se necesita generar un modelo de suelo específico para cada tipo de suelo que se quiera ensayar.
Fácil de transportar.	Si no se cuenta con el modelo de suelo no es conveniente para realizar control de trabajos pequeños (ej: cimentaciones).
Fácil de operar.	

6.3 RECOMENDACIONES.

- Para generar el modelo de suelo, el equipo que se ocupe (Cono y Arena o Densímetro Nuclear) para la calibración del densímetro eléctrico deberá estar debidamente calibrado.
- Si no se dispone de las facilidades para realizar la calibración del equipo en campo, la zona donde se va a llevar a cabo la compactación del material en el laboratorio debe ser una zona cubierta para que el suelo no pierda humedad por el sol o se humedezca por la lluvia.
- Para obtener datos más completos del Densímetro Eléctrico realizar un estudio haciendo la calibración del modelo de suelo en el campo con el equipo de compactación que se utilizará a lo largo de todo el proyecto.
- Uno de los factores que puede influir para la calibración del modelo de suelo del densímetro eléctrico es el método de compactación ya que en el tramo de carretera investigada se compactó con un rodillo liso vibrante autopropulsado y el modelo de suelo se lo realizó compactando con un pisón de explosión o pisón compactador.

Al realizar el modelo de suelo en laboratorio no se pueden generar las mismas condiciones de compactación que si se pueden generar al realizar el modelo de suelo en campo.

- En el ámbito de la construcción se suelen requerir ensayos y resultados inmediatos. El tiempo que lleva realizar la calibración del modelo de suelo puede perjudicar tanto al contratista como al dueño del equipo. Sin embargo, en el caso de que la calibración de equipo sea realizada exitosamente, para vías sería de mucha utilidad por la rapidez de obtención de los datos.
- Para la utilización del Densímetro Eléctrico se recomienda verificar que los modelos generados para la calibración del equipo cumplan con todas las exigencias que plantea el manual del equipo que se vaya a utilizar.

BIBLIOGRAFÍA.

- Agroads. (17 de 03 de 2014). Obtenido de <http://www.agroads.com.ar/detalle.asp?clasi=226633>
- Análisis de Regresión. (20 de 05 de 2014). Obtenido de http://www.uam.es/personal_pdi/economicas/sgarcia/analisisderegresion.pdf
- Apuntes Ingeniería Civil. (13 de 02 de 2014). Obtenido de Formas y Texturas de las Partículas del Suelo: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/forma-y-textura-de-las-particulas-del.html>
- Atlas Copco. (17 de 03 de 2014). Obtenido de Dynapac CA1300DA: <http://www.atlascopco.com.pe/pees/products/product.aspx?id=3522630>
- Clasificación de Suelos. (13 de 02 de 2014). Obtenido de http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf
- Clasificación de suelos SUCS. (14 de 02 de 2014). Obtenido de http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria.pdf
- Das, B. M. (2001). Principios de Ingeniería de Comentaciones. Sacramento: 4.
- edd.hg. (20 de 02 de 2014). Sistema de Clasificación de Suelos AASHTO. Obtenido de <http://ingenieriaciviltips.blogspot.com/2011/05/sistema-de-clasificacion-de-suelos.html>
- emopic. (25 de 03 de 2014). Obtenido de <http://www.emopyc.com/emopyc/maquinaria/List/listing/rodillos-manuales-129/1.html>
- Ferro Vicmar. (25 de 03 de 2014). Obtenido de <http://www.ferrovicmar.com/herramientas-electricas.asp?producto=bandeja-vibrante-610170>
- Interempresas. (25 de 03 de 2014). Obtenido de <http://www.interempresas.net/ObrasPublicas/FeriaVirtual/Producto-Rodillo-vibrante-tandem-Bomag-BW-174-AD-3059.html>
- Larousse. (2009). Diccionario Enciclopédico.
- Lloret, P. B. (2009). Máquinaria de Obras Públicas II: máquinas y equipos. (4ta ed.). España: Editorial Club Universitario.
- López, I. W. (18 de Marzo de 2014). SlideShare. Obtenido de <http://www.slideshare.net/wlopezalmarza/compactacion-de-suelos>
- Ministerio de Industria de Propiedad Intelectual. (25 de 03 de 2014). Obtenido de Modelo de Utilidad: http://www.espatentes.com/pdf/0218358_u.pdf

- Nol, M. A. (25 de 03 de 2014). Tractores con Rulo Compactador Vibrador y Plancha Vibratoria. Obtenido de <http://miguelangelnoll.blogspot.com/2010/09/tractores-con-rulo-compactador.html>
- Pruebas de Identificación en Campo. (15 de 02 de 2014). Obtenido de https://docs.google.com/presentation/d/16Z0-eqst__pxnSMGh8YYEkjoGdI5O5c4Z9X7Mt5jHyE/edit?pli=1#slide=id.p21
- Públicas, Ministerio de Transportes y Obras. (12 de 03 de 2014). Obtenido de Competencias Técnicas en Aseguramiento y Control de Calidad de Obras Civiles: <http://www.slideshare.net/UCGcertificacionvial/equipos-de-compactacin-seccin-6-3533866>
- Quesada, Steven. (13 de 02 de 2014). Sistema de Clasificación de Suelos SUCS. Obtenido de http://www.tec-digital.itcr.ac.cr/file/3255755/informe_1_steven_
- Reclamation, U. D. (1974). Manual de Tierras (Earth Manual). Washington D.C.: Editorial Técnica Bellisco.
- Revista d Construcción. (11 de 03 de 2014). Obtenido de Salfa presenta máquina de gran productividad en nivelación con obstáculos: <http://www.dconstruccion.cl/?p=12109>
- SEGOB. (13 de 02 de 2014). Obtenido de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5184475&fecha=01/04/2011
- Sistema de Clasificación AASHTO. (20 de 02 de 2014). Obtenido de <http://www3.ucn.cl/FacultadesInstitutos/laboratorio/aashtoM2.htm>
- (2007). Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by Sand-Cone Method. En ASTM International D1556 (págs. 1-7). West Conshohocken.
- (2013). Standard Test Method for In-Place (Unit Weight) and Water Content of Soil Using an Electromagnetic Soil Density Gauge. En Astm International D7830/D7830M (págs. 1-18). West Conshohocken.
- (2010). Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depth). En ASTM International D6938 (págs. 1-11). West Conshohocken.
- (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56000 ft-lb/ft³ (2700 kN-m/m³)). En ASTM International D1557 (págs. 1-14). West Conshohocken.
- (2012). Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12400 ft-lb/ft³ (600 kN-m/m³)). En ASTM International D698 (págs. 1-13). West Conshohocken.

- Testing Equipment for Construction Materials HUMBOLDT. (01 de 2013). Manual del Usuario H-4114SD.3F. Illinois, U.S.A.
- Universidad Católica de Valparaíso. (13 de 02 de 2014). Obtenido de http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf
- Universidad de Valparaíso. (13 de 02 de 2014). Obtenido de Análisis Granulométrico: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria.pdf
- Yamane, T. (1979). Estadística (Vol. 3ra edición). México D.F., México: Harla.

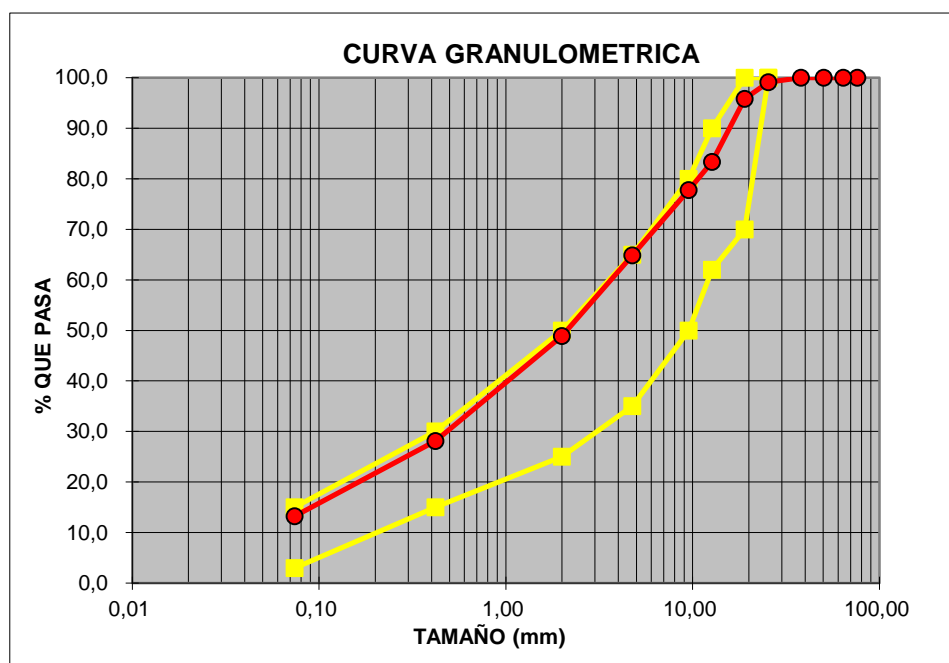
ANEXOS

Anexo 1.

INFORME DE ENSAYO GRANULOMETRIA POR MALLAS

PROYECTO:	Collas-Tababela	SOLICITADO POR:	Juan Martín Flores
LOCALIZACION:	Tababela	FECHA DE EMISIÓN:	23/06/2014
NORMA ENSAYO:	ASTM C 136	ESPECIFICACION:	Base Clase 2
CANTERA:	Stock	MASA DE LA MUESTRA:	19762.00

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICAC. MOP - 001 - f - 2002 404-1.2
3"	76.20	0.0	0.0	0.0	100.0	
2 1/2"	64.00	0.0	0.0	0.0	100.0	
2"	50.40	0.0	0.0	0.0	100.0	
1 1/2"	38.10	0.0	0.0	0.0	100.0	
1"	25.40	182.0	182.0	0.9	99.1	100
3/4"	19.00	653.0	835.0	4.2	95.8	70-100
1/2"	12.70	2465.0	3300.0	16.7	83.3	
3/8"	9.51	1097.0	4397.0	22.2	77.8	50-80
No.4	4.76	2555.0	6952.0	35.2	64.8	35-65
No.10	2.00	3142.9	10094.9	51.1	48.9	25-50
No.40	0.42	4105.0	14199.9	71.9	28.1	15-30
No.200	0.074	2939.3	17139.2	86.7	13.3	3-15
P A S A No 200		2622.8	2622.8			
SUMA:		19762.0	19762.0			



Anexo 2.

INFORME DE ENSAYO

ENSAYO DE ABRASIÓN E IMPÁCTO POR LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

PROYECTO: Collas-Tababela **SOLICITADO POR:** Juan Martín Flores
LOCALIZACION: Tababela **FECHA DE EMISIÓN:** 11/06/2014
NORMA ENSAYO: ASTM C 131 **ESPECIFICACIÓN:** Base Clase 2
CANTERA: Stock **MASA DE LA MUESTRA:** 5000.00 gr



TABLE 1 Gradings of Test Samples

Sieve Size (Square Openings)		Mass of Indicated Sizes, g			
Passing	Retained on	Grading			
		A	B	C	D
37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	1 250 ± 25	...	...	...
25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	1 250 ± 25	...	...	...
19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
9.5 mm (¾ in.)	6.3 mm (¼ in.)	...	...	2 500 ± 10	...
6.3 mm (¼ in.)	4.75-mm (No. 4)	...	...	2 500 ± 10	...
4.75-mm (No. 4)	2.36-mm (No. 8)	...	...	...	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

$$D = (C / A) * 100$$

$$C = (A - B)$$

TIPO DE GRADACION:

B

MASA INICIAL DE LA MUESTRA

A= 5000 gr.

MASA RETENIDA EN EL TAMIZ Nº 12

B= 3275 gr

DESPUES DE 500 REVOLUCIONES

MASA QUE PASA EL TAMIZ Nº 12

C= 1725 gr

PORCENTAJE DE DESGASTE:

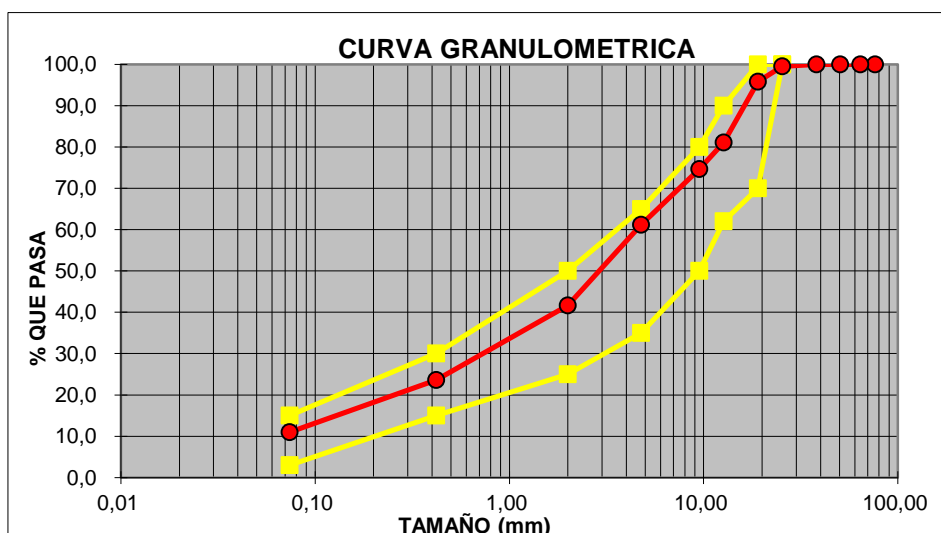
D= 35 %

Anexo 3.

**INFORME DE ENSAYO
GRANULOMETRIA POR MALLAS**

PROYECTO:	Collas-Tababela	SOLICITADO POR:	Juan Martín Flores
LOCALIZACION:	Tababela	FECHA DE EMISIÓN:	10/06/2014
NORMA ENSAYO:	ASTM C 136	ESPECIFICACION:	Base Clase 2
CANTERA:	Stock	MASA DE LA MUESTRA:	19366.00

MALLA No.	ABERTURA (mm)	MASA RETENIDA PARCIAL	MASA RETENIDA ACUMULADA	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	ESPECIFICAC. MOP - 001 - f - 2002 404-1.2
3"	76.20	0.0	0.0	0.0	100.0	
2 1/2"	64.00	0.0	0.0	0.0	100.0	
2"	50.40	0.0	0.0	0.0	100.0	
1 1/2"	38.10	0.0	0.0	0.0	100.0	
1"	25.40	86.0	86.0	0.4	99.6	100
3/4"	19.00	728.0	814.0	4.2	95.8	70-100
1/2"	12.70	2847.0	3661.0	18.9	81.1	
3/8"	9.51	1248.0	4909.0	25.3	74.7	50-80
No.4	4.76	2617.0	7526.0	38.9	61.1	35-65
No.10	2.00	3770.1	11296.1	58.3	41.7	25-50
No.40	0.42	3494.8	14791.0	76.4	23.6	15-30
No.200	0.074	2444.6	17235.6	89.0	11.0	3-15
P A S A No 200		2130.4	2130.4			
SUMA:		19366.0	19366.0			



D60= 4.60
D30=0.72
D10=0.06
Cu= 74.19
Cc= 1.82

Anexo 4.

INFORME DE ENSAYO

ENSAYO DE ABRASIÓN E IMPÁCTO POR LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

PROYECTO: Collas-Tababela **SOLICITADO POR:** Juan Martín Flores
LOCALIZACION: Tababela **FECHA DE EMISIÓN:** 11/06/2014
NORMA ENSAYO: ASTM C 131 **ESPECIFICACIÓN:** Base Clase 2
CANTERA: Stock **MASA DE LA MUESTRA:** 5010.00 gr



TABLE 1 Gradings of Test Samples

Sieve Size (Square Openings)		Mass of Indicated Sizes, g			
Passing	Retained on	Grading			
		A	B	C	D
37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	1 250 ± 25	...	...	...
25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	1 250 ± 25	...	...	...
19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	1 250 ± 10	2 500 ± 10	...	...
9.5 mm (¾ in.)	6.3 mm (¼ in.)	...	...	2 500 ± 10	...
6.3 mm (¼ in.)	4.75-mm (No. 4)	...	...	2 500 ± 10	...
4.75-mm (No. 4)	2.36-mm (No. 8)	...	...	...	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

$$D = (C / A) * 100$$

$$C = (A - B)$$

TIPO DE GRADACION: **B**

MASA INICIAL DE LA MUESTRA A= 5010 gr.

MASA RETENIDA EN EL TAMIZ Nº 12 B= 3190 gr

DESPUES DE 500 REVOLUCIONES

MASA QUE PASA EL TAMIZ Nº 12 C= 1820 gr

PORCENTAJE DE DESGASTE: **D= 36 %**

Anexo 5.

PROCTOR MODIFICADO 2700 kN-m/m³

	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado
Tamiz 3/4	6.78	6.78
Tamiz 3/8	18.52	25.3
Tamiz No 4	12.97	38.27

Método de Preparación: Método Húmedo

Peso del Martillo (N): 44.48

Método: C

No de Capas: 5

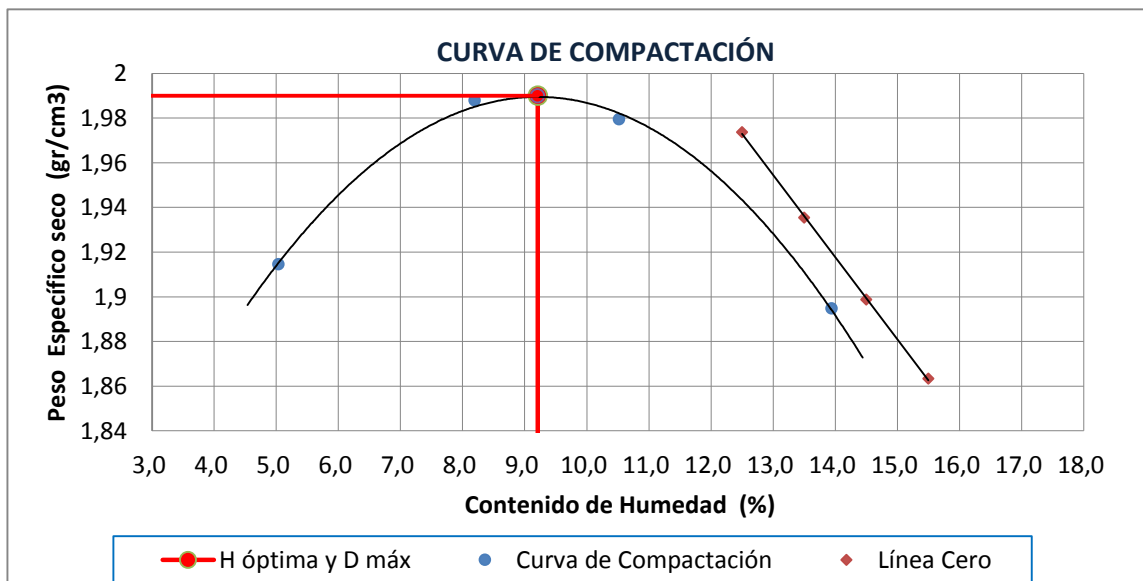
Volumen del Molde (cm³): 2115

No de Golpes por Capa: 56

Peso del Molde (gr): 6040

Altura Caída del Martillo (mm): 457.2

No de Prueba	1		2		3		4	
Peso Molde + Suelo Húmedo (gr)	10589.00		10667.00		10606.00		10293.00	
Peso Molde (gr)	6040.00		6040.00		6040.00		6040.00	
Peso de Suelo Húmedo (gr)	4549.00		4627.00		4566.00		4253.00	
Densidad Húmeda (gr/cm³)	2.151		2.188		2.159		2.011	
CÁLCULO DE HUMEDAD								
No Capsula	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso caps + suelo humedo (gr)	203.79	214.15	264.34	267.54	334.92	368.79	214.47	194.95
Peso caps + suelo seco (gr)	194.25	204.17	245.13	247.68	301.14	331.48	207.15	188.40
Peso capsula (gr)	80.75	79.18	61.44	60.07	61.11	61.25	63.38	56.96
Peso del agua (gr)	9.54	9.98	19.21	19.86	33.78	37.31	7.32	6.55
Peso suelo seco	113.50	124.99	183.69	187.61	240.03	270.23	143.77	131.44
% humedad	8.41	7.98	10.46	10.59	14.07	13.81	5.09	4.98
% HUMEDAD PROMEDIO	8.19		10.52		13.94		5.04	
DENSIDAD SECA (gr/cm³)	1.988		1.979		1.895		1.914	



Densidad Seca Máxima (kg/cm³): 1.970

Humedad Óptima (%):

9.73

Anexo 6.

PROCTOR MODIFICADO 2700 kN-m/m³

	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado
Tamiz 3/4	6.47	6.47
Tamiz 3/8	16.63	23.11
Tamiz No 4	12.72	35.82

Método de Preparación: Método Húmedo

Peso del Martillo (N): 44.48

Método: B

No de Capas: 5

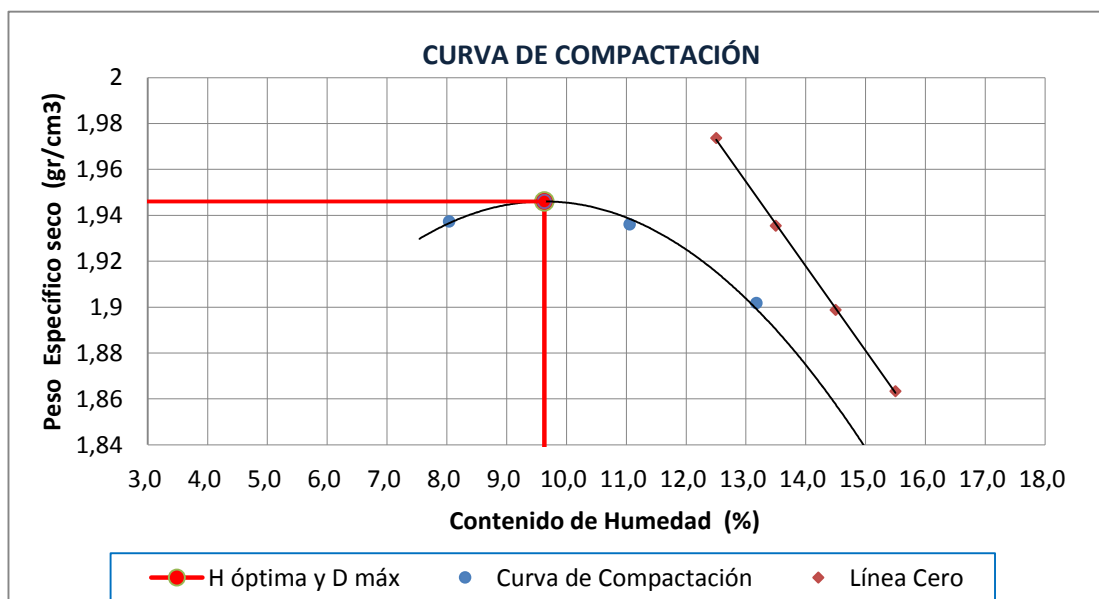
Volumen del Molde (cm³): 946

No de Golpes por Capa: 25

Peso del Molde (gr): 4199

Altura Caída del Martillo (mm): 457.2

No de Prueba	1		2		3		4	
Peso Molde + Suelo Húmedo (gr)	6179.00		6223.00		6235.00		6173.00	
Peso Molde (gr)	4199.00		4199.00		4199.00		4199.00	
Peso de Suelo Húmedo (gr)	1980.00		2034.00		2036.00		1974.00	
Densidad Húmeda (gr/cm³)	2.093		2.150		2.152		2.087	
CÁLCULO DE HUMEDAD								
No Capsula	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso caps + suelo humedo (gr)	70.01	76.56	75.69	78.10	121.48	119.26	138.72	141.75
Peso caps + suelo seco (gr)	66.21	72.18	69.86	71.98	109.32	107.61	122.22	124.82
Peso capsula (gr)	18.26	18.50	16.93	16.85	17.62	18.66	18.38	17.66
Peso del agua (gr)	3.80	4.38	5.83	6.12	12.16	11.65	16.50	16.93
Peso suelo seco	47.95	53.68	52.93	55.13	91.70	88.95	103.84	107.16
% humedad	7.92	8.16	11.01	11.10	13.26	13.10	15.89	15.80
% HUMEDAD PROMEDIO	8.04		11.06		13.18		15.84	
DENSIDAD SECA (gr/cm³)	1.937		1.936		1.902		1.801	



Densidad Seca Máxima (kg/cm³): 1.946

Humedad Óptima (%): 9.63

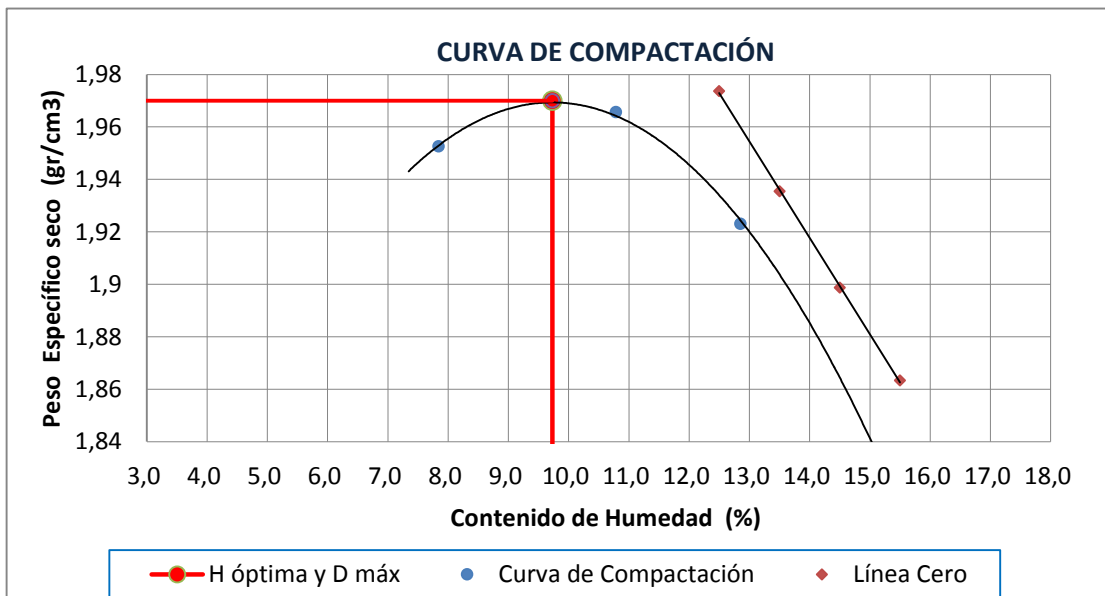
Anexo 7.

PROCTOR MODIFICADO 2700 kN-m/m³

	Porcentaje Retenido	Porcentaje Retenido Acumulado
Tamiz 3/4	5.43	5.43
Tamiz 3/8	18.5	23.93
Tamiz No 4	13.05	36.98

Método de Preparación: Método Húmedo **Peso del Martillo (N):** 44.48
 Método: B **No de Capas:** 5
Volumen del Molde (cm³): 946 **No de Golpes por Capa:** 25
Peso del Molde (gr): 4199 **Altura Caída del Martillo (mm):** 457.2

No de Prueba	1		2		3		4	
Peso Molde + Suelo Húmedo (gr)	6259.00		6252.00		6155.00		6173.00	
Peso Molde (gr)	4199.00		4199.00		4199.00		4199.00	
Peso de Suelo Húmedo (gr)	2060.00		2053.00		1956.00		1992.00	
Densidad Húmeda (gr/cm³)	2.178		2.170		2.068		2.106	
CÁLCULO DE HUMEDAD								
No Capsula	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Peso caps + suelo humedo (gr)	224.14	222.13	235.58	223.68	471.18	516.53	267.80	313.68
Peso caps + suelo seco (gr)	204.38	202.85	211.37	200.78	416.59	456.05	252.86	296.89
Peso capsula (gr)	22.51	22.79	22.81	22.82	80.00	79.33	61.87	83.36
Peso del agua (gr)	19.76	19.28	24.21	22.90	54.59	60.48	14.94	16.79
Peso suelo seco	181.87	180.06	188.56	177.96	336.59	376.72	190.99	213.53
% humedad	10.86	10.71	12.84	12.87	16.22	16.05	7.82	7.86
% HUMEDAD PROMEDIO	10.79		12.85		16.14		7.84	
DENSIDAD SECA (gr/cm³)	1.966		1.923		1.780		1.953	



Densidad Seca Máxima (kg/cm³): 1.970

Humedad Óptima (%): 9.73

Anexo 8.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 1

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	7040.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3496.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2718.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2718.000

HUMEDAD

No Capsula	1.000	2.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1109.760	1276.000
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1036.300	1190.000
Peso capsula (gr)(M ₈)	74.130	78.000
Peso del agua (gr)	73.460	86.000
Peso suelo seco	962.170	1112.000
% humedad(h)	7.635	7.734
% humedad promedio (H)	7.684	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

Volumen del agujero (cm ³) =	1323.684	$V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$
Peso del suelo seco (gr)(M ₅) =	2524.044	$M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$
Densidad Húmeda (gr/cm ³) =	2.053	$Densidad Humeda = \frac{M_4}{V}$
Densidad Seca (gr/cm ³) =	1.907	$Densidad Seca = \frac{M_5}{V}$
Porcentaje de compactación (%) =	95.821	$\% Compactación = \frac{D Seca}{Dmax}$
Porcentaje de humedad (%) =	7.684	$Porcentaje de Humedad = H$
Porcentaje de humedad óptima (%) =	83.435	$\% Humedad Optima = \frac{H}{Hop} * 100$

Anexo 9.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 2

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6950.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3695.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2302.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2302.000

HUMEDAD

No Capsula	3.000	4.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1138.070	1172.130
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1056.400	1087.700
Peso capsula (gr)(M ₈)	77.950	77.620
Peso del agua (gr)	81.670	84.430
Peso suelo seco	978.450	1010.080
% humedad(h)	8.347	8.359
% humedad promedio (H)	8.353	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1133.553 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2124.541 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.031 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.874 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 94.183 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 8.353 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 90.693 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 10.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 3

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6867.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3693.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2254.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2254.000

HUMEDAD

No Capsula	5.000	6.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1084.210	1099.730
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1013.700	1027.400
Peso capsula (gr)(M ₈)	78.100	77.820
Peso del agua (gr)	70.510	72.330
Peso suelo seco	935.600	949.580
% humedad(h)	7.536	7.617
% humedad promedio (H)	7.577	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1080.263 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2095.249 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.087 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.940 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 97.466 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.577 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 82.266 \quad \% \text{ Humedad Óptima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 11.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 4

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6864.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3766.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2135.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2135.000

HUMEDAD

No Capsula	7.000	8.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	0.000	1137.280
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	0.000	1053.700
Peso capsula (gr)(M ₂)	0.000	78.060
Peso del agua (gr)	0.000	83.580
Peso suelo seco	0.000	975.640
% humedad(h)	0.000	8.567
% humedad promedio (H)	8.567	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_2} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1030.263 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 1966.533 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.072 \quad \text{Densidad Húmeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.909 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 95.918 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 8.567 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 93.015 \quad \% \text{ Humedad Óptima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 12.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 5

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	5828.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	2783.000
Peso suelo campo + funda (gr)	1974.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	1974.000

HUMEDAD

No Capsula	9.000	10.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1078.380	1037.670
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1005.000	963.200
Peso capsula (gr)(M ₃)	78.230	78.180
Peso del agua (gr)	73.380	74.470
Peso suelo seco	926.770	885.020
% humedad(h)	7.918	8.414
% humedad promedio (H)	8.166	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_3} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

Volumen del agujero (cm ³) =	995.395	$V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$
Peso del suelo seco (gr)(M ₅) =	1824.970	$M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$
Densidad Húmeda (gr/cm ³) =	1.983	$Densidad Humeda = \frac{M_4}{V}$
Densidad Seca (gr/cm ³) =	1.833	$Densidad Seca = \frac{M_5}{V}$
Porcentaje de compactación (%) =	92.131	$\% Compactación = \frac{D Seca}{Dmax}$
Porcentaje de humedad (%) =	8.166	$Porcentaje de Humedad = H$
Porcentaje de humedad óptima (%) =	88.666	$\% Humedad Optima = \frac{H}{Hop} * 100$

Anexo 13.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO Pto No 6

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	4930.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	1676.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2360.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2360.000

HUMEDAD

No Capsula	11.000	12.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1169.910	1179.170
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1091.100	1099.400
Peso capsula (gr)(M ₈)	77.500	77.730
Peso del agua (gr)	78.810	79.770
Peso suelo seco	1013.600	1021.670
% humedad(h)	7.775	7.808
% humedad promedio (H)	7.792	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

Volumen del agujero (cm ³) =	1132.895	$V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$
Peso del suelo seco (gr)(M ₅) =	2189.411	$M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$
Densidad Húmeda (gr/cm ³) =	2.083	$Densidad Humeda = \frac{M_4}{V}$
Densidad Seca (gr/cm ³) =	1.933	$Densidad Seca = \frac{M_5}{V}$
Porcentaje de compactación (%) =	97.115	$\% Compactación = \frac{D Seca}{Dmax}$
Porcentaje de humedad (%) =	7.792	$Porcentaje de Humedad = H$
Porcentaje de humedad óptima (%) =	84.599	$\% Humedad Optima = \frac{H}{Hop} * 100$

Anexo14.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 7

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	7334.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	4110.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2283.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2283.000

HUMEDAD

No Capsula	13.000	14.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1165.030	1202.470
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1084.700	1116.900
Peso capsula (gr)(M ₈)	77.310	77.550
Peso del agua (gr)	80.330	85.570
Peso suelo seco	1007.390	1039.350
% humedad(h)	7.974	8.233
% humedad promedio (H)	8.104	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1113.158 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2111.864 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.051 \quad \text{Densidad Húmeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.897 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 95.336 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 8.104 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 87.986 \quad \% \text{ Humedad Óptima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 15.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 8

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	7029.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3535.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2698.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2698.000

HUMEDAD

No Capsula	17.000	18.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1208.220	1245.520
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1128.700	1164.100
Peso capsula (gr)(M ₃)	77.630	74.410
Peso del agua (gr)	79.520	81.420
Peso suelo seco	1051.070	1089.690
% humedad(h)	7.566	7.472
% humedad promedio (H)	7.519	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_3} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1290.789 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2509.330 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.090 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.944 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 97.690 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.519 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 81.637 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 16.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 9

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6654.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3265.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2520.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2520.000

HUMEDAD

No Capsula	15.000	16.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1232.900	1179.820
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1148.300	1098.400
Peso capsula (gr)(M ₈)	77.550	77.700
Peso del agua (gr)	84.600	81.420
Peso suelo seco	1070.750	1020.700
% humedad(h)	7.901	7.977
% humedad promedio (H)	7.939	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1221.711 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2334.653 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.063 \quad \text{Densidad Húmeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.911 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 96.029 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.939 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 86.199 \quad \% \text{ Humedad Óptima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 17.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 10

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6441.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3042.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2511.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2511.000

HUMEDAD

No Capsula	19.000	20.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1209.170	1150.230
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1123.800	1070.800
Peso capsula (gr)(M ₃)	78.000	77.990
Peso del agua (gr)	85.370	79.430
Peso suelo seco	1045.800	992.810
% humedad(h)	8.163	8.001
% humedad promedio (H)	8.082	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_3} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1228.289 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2323.240 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.044 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.891 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 95.047 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 8.082 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 87.751 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 18.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 11

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6193.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	2820.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2444.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2444.000

HUMEDAD

No Capsula	21.000	22.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1136.910	1152.220
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1061.600	1075.800
Peso capsula (gr)(M ₈)	77.660	77.630
Peso del agua (gr)	75.310	76.420
Peso suelo seco	983.940	998.170
% humedad(h)	7.654	7.656
% humedad promedio (H)	7.655	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1211.184 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2270.216 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.018 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.874 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 94.190 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.655 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 83.116 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 19.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 12

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	5162.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	1690.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2546.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2546.000

HUMEDAD

No Capsula	23.000	24.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1307.020	1266.160
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1220.400	1182.400
Peso capsula (gr)(M ₈)	78.050	78.500
Peso del agua (gr)	86.620	83.760
Peso suelo seco	1142.350	1103.900
% humedad(h)	7.583	7.588
% humedad promedio (H)	7.585	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1276.316 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2366.498 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 1.995 \quad \text{Densidad Húmeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.854 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 93.174 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.585 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 82.358 \quad \% \text{ Humedad Óptima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 20.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 13

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6731.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3084.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2844.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2844.000

HUMEDAD

No Capsula	25.000	26.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1269.380	1240.880
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1190.500	1166.300
Peso capsula (gr)(M ₈)	77.800	78.200
Peso del agua (gr)	78.880	74.580
Peso suelo seco	1112.700	1088.100
% humedad(h)	7.089	6.854
% humedad promedio (H)	6.972	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1391.447 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2658.649 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.044 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.911 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 96.015 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{Dmax}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 6.972 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 75.696 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{Hop} * 100$$

Anexo 21.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 14

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	7093.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3868.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2201.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2201.000

HUMEDAD

No Capsula	1.000	2.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1105.510	1118.210
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1026.340	1039.350
Peso capsula (gr)(M ₃)	74.330	78.400
Peso del agua (gr)	79.170	78.860
Peso suelo seco	952.010	960.950
% humedad(h)	8.316	8.206
% humedad promedio (H)	8.261	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_3} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1113.816 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2033.045 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 1.976 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.825 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 91.723 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 8.261 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 89.699 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 22.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 15

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	7089.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3387.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2948.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2948.000

HUMEDAD

No Capsula	3.000	4.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1088.900	1109.300
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1011.100	1031.500
Peso capsula (gr)(M ₈)	78.310	77.820
Peso del agua (gr)	77.800	77.800
Peso suelo seco	932.790	953.680
% humedad(h)	8.341	8.158
% humedad promedio (H)	8.249	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1427.632 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2723.345 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.065 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.908 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 95.859 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 8.249 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 89.568 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 23.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 16

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	7056.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3523.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2639.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2639.000

HUMEDAD

No Capsula	5.000	6.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1098.660	1107.220
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1026.990	1036.000
Peso capsula (gr)(M ₈)	78.410	77.930
Peso del agua (gr)	71.670	71.220
Peso suelo seco	948.580	958.070
% humedad(h)	7.556	7.434
% humedad promedio (H)	7.495	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1316.447 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2455.007 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.005 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.865 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 93.712 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.495 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 81.375 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 24.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 17

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6931.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3619.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2408.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2408.000

HUMEDAD

No Capsula	7.000	8.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1141.670	1122.370
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1070.620	1052.800
Peso capsula (gr)(M ₈)	78.020	78.260
Peso del agua (gr)	71.050	69.570
Peso suelo seco	992.600	974.540
% humedad(h)	7.158	7.139
% humedad promedio (H)	7.148	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1171.053 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2247.351 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.056 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.919 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 96.437 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.148 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 77.615 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 25.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 18

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6784.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3284.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2653.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2653.000

HUMEDAD

No Capsula	9.000	10.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1235.760	1191.680
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1158.810	1118.660
Peso capsula (gr)(M ₃)	78.640	78.300
Peso del agua (gr)	76.950	73.020
Peso suelo seco	1080.170	1040.360
% humedad(h)	7.124	7.019
% humedad promedio (H)	7.071	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_3} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1294.737 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2477.788 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.049 \quad \text{Densidad Húmeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.914 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 96.168 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.071 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 76.779 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 26.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 19

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6658.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3168.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2574.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2574.000

HUMEDAD

No Capsula	11.000	12.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1121.920	1117.460
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1052.940	1049.260
Peso capsula (gr)(M ₈)	77.590	77.890
Peso del agua (gr)	68.980	68.200
Peso suelo seco	975.350	971.370
% humedad(h)	7.072	7.021
% humedad promedio (H)	7.047	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1288.158 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2404.559 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 1.998 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.867 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 93.802 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.047 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 76.511 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 27.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 20

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6382.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	2859.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2638.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2638.000

HUMEDAD

No Capsula	13.000	14.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1216.160	1180.760
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1115.660	1086.070
Peso capsula (gr)(M ₈)	77.850	77.600
Peso del agua (gr)	100.500	94.690
Peso suelo seco	1037.810	1008.470
% humedad(h)	9.684	9.389
% humedad promedio (H)	9.537	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1309.868 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2408.326 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.014 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.839 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 92.392 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 9.537 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 103.547 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 28.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 21

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	7326.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3727.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2850.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2850.000

HUMEDAD

No Capsula	15.000	16.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1114.440	1089.140
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1040.440	1015.120
Peso capsula (gr)(M ₃)	77.650	77.850
Peso del agua (gr)	74.000	74.020
Peso suelo seco	962.790	937.270
% humedad(h)	7.686	7.897
% humedad promedio (H)	7.792	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_3} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1359.868 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2643.988 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.096 \quad \text{Densidad Húmeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.944 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 97.703 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.792 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 84.600 \quad \% \text{ Humedad Óptima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 29.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 22

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	7090.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3359.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2904.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2904.000

HUMEDAD

No Capsula	17.000	18.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1156.020	1163.840
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1093.490	1103.130
Peso capsula (gr)(M ₈)	78.010	74.540
Peso del agua (gr)	62.530	60.710
Peso suelo seco	1015.480	1028.590
% humedad(h)	6.158	5.902
% humedad promedio (H)	6.030	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1446.711 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2738.848 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.007 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.893 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 95.133 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 6.030 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 65.472 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 30.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 23

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6966.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3467.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2569.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2569.000

HUMEDAD

No Capsula	19.000	20.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1173.180	1113.280
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1095.880	1041.450
Peso capsula (gr)(M ₈)	78.220	78.130
Peso del agua (gr)	77.300	71.830
Peso suelo seco	1017.660	963.320
% humedad(h)	7.596	7.457
% humedad promedio (H)	7.526	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1294.079 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{D_b}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2389.186 \quad M_5 = \frac{M_4}{100 + H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 1.985 \quad \text{Densidad Humeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.846 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 92.776 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 7.526 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 81.717 \quad \% \text{ Humedad Optima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 31.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 24

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6871.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3386.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2606.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2606.000

HUMEDAD

No Capsula	21.000	22.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1120.670	1125.020
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1060.850	1066.170
Peso capsula (gr)(M ₈)	77.890	78.520
Peso del agua (gr)	59.820	58.850
Peso suelo seco	982.960	987.650
% humedad(h)	6.086	5.959
% humedad promedio (H)	6.022	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(D _{max})	1.990
Humedad Óptima (%) (H _{op})	9.210

CÁLCULOS

Volumen del agujero (cm³) = 1284.868

$$V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$$

Peso del suelo seco (gr)(M₅) = 2457.977

$$M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

Densidad Húmeda (gr/cm³) = 2.028

$$Densidad Humeda = \frac{M_4}{V}$$

Densidad Seca (gr/cm³) = 1.913

$$Densidad Seca = \frac{M_5}{V}$$

Porcentaje de compactación (%) = 96.132

$$\% Compactación = \frac{D Seca}{Dmax}$$

Porcentaje de humedad (%) = 6.022

$$Porcentaje de Humedad = H$$

Porcentaje de humedad óptima (%) = 65.387

$$\% Humedad Optima = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 32.

ENSAYOS CONO Y ARENA

CALIBRACIÓN CONO

Pto No 25

Peso envase + cono inicial (gr)	7024.000
Peso envase + cono final (gr)	5492.000
Peso cono + placa (gr)(M ₃)	1532.000

Densidad de la arena (gr/cm ³)(Db)	1.520
--	-------

ENSAYO

Peso envase + cono inicial (gr)(M ₁)	6728.000
Peso envase + cono final (gr)(M ₂)	3372.000
Peso suelo campo + funda (gr)	2449.000
Peso funda (gr)	0.000
Peso suelo campo (gr)(M ₄)	2449.000

HUMEDAD

No Capsula	23.000	24.000
Peso caps + suelo humedo (gr)(M ₆)	1177.230	1207.140
Peso caps + suelo seco (gr)(M ₇)	1111.700	1142.720
Peso capsula (gr)(M ₈)	78.180	78.740
Peso del agua (gr)	65.530	64.420
Peso suelo seco	1033.520	1063.980
% humedad(h)	6.340	6.055
% humedad promedio (H)	6.198	

$$h = \frac{M_6 - M_7}{M_7 - M_8} * 100$$

DATOS DEL PROCTOR

Densidad seca máxima (gr/cm ³)(Dmax)	1.990
Humedad Óptima (%) (Hop)	9.210

CÁLCULOS

$$\text{Volumen del agujero (cm}^3\text{)} = 1200.000 \quad V = \frac{M_1 - M_2 - M_3}{Db}$$

$$\text{Peso del suelo seco (gr)(M}_5\text{)} = 2306.080 \quad M_5 = \frac{M_4}{100+H} * 100$$

$$\text{Densidad Húmeda (gr/cm}^3\text{)} = 2.041 \quad \text{Densidad Húmeda} = \frac{M_4}{V}$$

$$\text{Densidad Seca (gr/cm}^3\text{)} = 1.922 \quad \text{Densidad Seca} = \frac{M_5}{V}$$

$$\text{Porcentaje de compactación (\%)} = 96.569 \quad \% \text{ Compactación} = \frac{D \text{ Seca}}{D_{max}}$$

$$\text{Porcentaje de humedad (\%)} = 6.198 \quad \text{Porcentaje de Humedad} = H$$

$$\text{Porcentaje de humedad óptima (\%)} = 67.291 \quad \% \text{ Humedad Óptima} = \frac{H}{H_{op}} * 100$$

Anexo 33.

ENSAYOS DENSÍMETRO NUCLEAR

	PTO 1		PTO 2		PTO 3	
HUMEDAD IN-SITU	7.2	7.7	7.8	8.6	7.5	7.3
HUMEDAD IN-SITU PROMEDIO	7.45		8.2		7.4	
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO g/cm ³	2.204	2.203	2.144	2.15	2.12	2.105
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.2035		2.147		2.1125	
DENSIDAD SECA EN CAMPO g/cm ³	2.055	2.046	1.988	1.979	1.979	1.961
DENSIDAD SECA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.0505		1.9835		1.97	
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	103.3	102.8	99.9	99.4	99.1	98.6
GRADO DE COMPACTACIÓN PROMEDIO (%)	103.05		99.65		98.85	

	PTO 4		PTO 5		PTO 6	
HUMEDAD IN-SITU	6.99	7.1	7.3	8	7.4	7.8
HUMEDAD IN-SITU PROMEDIO	7.045		7.65		7.6	
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO g/cm ³	2.154	2.14	2.15	2.154	2.136	2.141
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.147		2.152		2.1385	
DENSIDAD SECA EN CAMPO g/cm ³	2.015	1.998	2.004	1.995	1.989	1.986
DENSIDAD SECA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.0065		1.9995		1.9875	
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	101.3	100.4	100.7	100.2	100	99.8
GRADO DE COMPACTACIÓN PROMEDIO (%)	100.85		100.45		99.9	

	PTO 7		PTO 8		PTO 9	
HUMEDAD IN-SITU	6.7	7.3	7.7	7.5	7.8	7.7
HUMEDAD IN-SITU PROMEDIO	7		7.6		7.75	
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO g/cm ³	2.145	2.124	2.12	2.106	2.141	2.109
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.1345		2.113		2.125	
DENSIDAD SECA EN CAMPO g/cm ³	2.009	1.919	1.968	1.959	1.985	1.958
DENSIDAD SECA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	1.964		1.9635		1.9715	
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	101	99.4	98.9	98.4	99.8	98.4
GRADO DE COMPACTACIÓN PROMEDIO (%)	100.2		98.65		99.1	

	PTO 10		PTO 11		PTO 12	
HUMEDAD IN-SITU	7.9	7.6	7.4	7.6	7.4	7.8
HUMEDAD IN-SITU PROMEDIO	7.75		7.5		7.6	
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO g/cm ³	2.12	2.156	2.093	2.094	2.116	2.091
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.138		2.0935		2.1035	
DENSIDAD SECA EN CAMPO g/cm ³	1.964	2.004	1.949	1.945	1.97	1.939
DENSIDAD SECA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	1.984		1.947		1.9545	
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	98.7	100.7	98	97.7	99	97.4
GRADO DE COMPACTACIÓN PROMEDIO (%)	99.7		97.85		98.2	

	PTO 13		PTO 14		PTO 15	
HUMEDAD IN-SITU	6.2	7.4	7.2	7.2	8	6.9
HUMEDAD IN-SITU PROMEDIO	6.8		7.2		7.45	
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO g/cm ³	2.107	2.124	2.15	2.098	2.079	2.05
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.1155		2.124		2.0645	
DENSIDAD SECA EN CAMPO g/cm ³	1.983	1.977	2.006	1.958	1.925	1.918
DENSIDAD SECA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	1.98		1.982		1.9215	
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	99.7	99.3	100.8	98.4	96.7	96.4
GRADO DE COMPACTACIÓN PROMEDIO (%)	99.5		99.6		96.55	

Anexo 34.

	PTO 16		PTO 17		PTO 18	
HUMEDAD IN-SITU	7.3	6.8	6.4	6.5	7.2	6.2
HUMEDAD IN-SITU PROMEDIO	7.05		6.45		6.7	
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO g/cm ³	2.099	2.191	2.085	2.105	2.07	2.131
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.145		2.095		2.1005	
DENSIDAD SECA EN CAMPO g/cm ³	1.955	2.051	1.96	1.967	1.931	2.006
DENSIDAD SECA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.003		1.9635		1.9685	
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	98.3	103.1	98.5	99.3	97	100.8
GRADO DE COMPACTACIÓN PROMEDIO (%)	100.7		98.9		98.9	

	PTO 19		PTO 20		PTO 21	
HUMEDAD IN-SITU	6.8	7.2	9.8	10.7	8.3	7.5
HUMEDAD IN-SITU PROMEDIO	7		10.25		7.9	
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO g/cm ³	2.11	2.107	2.105	2.144	2.14	2.12
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.1085		2.1245		2.13	
DENSIDAD SECA EN CAMPO g/cm ³	1.976	1.952	1.918	1.936	1.976	1.973
DENSIDAD SECA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	1.964		1.927		1.9745	
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	99.3	98.7	96.4	97.3	99.3	99.2
GRADO DE COMPACTACIÓN PROMEDIO (%)	99		96.85		99.25	

	PTO 22		PTO 23		PTO 24	
HUMEDAD IN-SITU	6.2	6.5	9.6	8.4	6.5	5.8
HUMEDAD IN-SITU PROMEDIO	6.35		9		6.15	
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO g/cm ³	2.077	2.077	2.134	2.166	2.071	2.115
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.077		2.15		2.093	
DENSIDAD SECA EN CAMPO g/cm ³	1.956	1.951	1.946	1.999	1.944	1.998
DENSIDAD SECA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	1.9535		1.9725		1.971	
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	98.3	98	97.8	100.4	97.7	100.4
GRADO DE COMPACTACIÓN PROMEDIO (%)	98.15		99.1		99.05	

	PTO 25	
HUMEDAD IN-SITU	5.8	6.1
HUMEDAD IN-SITU PROMEDIO	5.95	
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO g/cm ³	2.014	2.032
DENSIDAD HÚMEDA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	2.023	
DENSIDAD SECA EN CAMPO g/cm ³	1.904	1.915
DENSIDAD SECA EN CAMPO PROMEDIO g/cm ³	1.9095	
GRADO DE COMPACTACIÓN (%)	95.7	96.2
GRADO DE COMPACTACIÓN PROMEDIO (%)	95.95	

Anexo 35.

ENSAYOS DENÍMETRO ELÉCTRICO

Pto.	Densidad Húmeda (gr/cm ³)			D. H. (gr/cm ³) Promedio
1	2.030	2.030	2.030	2.030
2	1.966	1.976	1.997	1.980
3	1.991	1.991	1.991	1.991
4	1.960	1.981	1.998	1.980
5	1.969	2.008	2.016	1.998
6	1.956	1.965	1.974	1.965
7	1.983	1.990	2.000	1.991
8	1.972	1.985	1.992	1.983
9	2.009	2.013	2.015	2.012
10	2.015	2.020	2.037	2.024
11	2.023	2.024	2.025	2.024
12	1.971	1.978	1.982	1.977
13	1.999	2.002	2.004	2.002
14	2.043	2.043	2.045	2.044
15	2.030	2.036	2.039	2.035
16	1.987	1.998	2.007	1.997
17	1.965	1.976	1.979	1.973
18	1.978	1.988	1.994	1.987
19	1.967	1.974	1.976	1.972
20	2.051	2.060	2.067	2.059
21	2.017	2.032	2.032	2.027
22	2.007	2.016	2.018	2.014
23	2.002	2.038	2.039	2.026
24	1.904	1.906	1.907	1.906
25	1.887	1.891	1.893	1.890

Anexo 36.

Pto.	Densidad Seca (gr/cm ³)			D.S. (gr/cm ³) Promedio
1	1.863	1.863	1.863	1.863
2	1.807	1.816	1.835	1.819
3	1.831	1.831	1.831	1.831
4	1.798	1.817	1.832	1.816
5	1.800	1.836	1.842	1.826
6	1.794	1.802	1.810	1.802
7	1.814	1.821	1.829	1.821
8	1.806	1.819	1.825	1.817
9	1.834	1.839	1.839	1.837
10	1.842	1.849	1.861	1.851
11	1.854	1.855	1.856	1.855
12	1.808	1.814	1.818	1.813
13	1.832	1.834	1.836	1.834
14	1.873	1.873	1.875	1.874
15	1.868	1.873	1.876	1.872
16	1.828	1.837	1.845	1.837
17	1.809	1.819	1.821	1.816
18	1.821	1.829	1.835	1.828
19	1.814	1.820	1.822	1.819
20	1.880	1.888	1.894	1.887
21	1.857	1.871	1.871	1.866
22	1.847	1.855	1.857	1.853
23	1.838	1.870	1.871	1.860
24	1.747	1.749	1.749	1.748
25	1.735	1.738	1.740	1.738

Anexo 37.

Pto.	Porcentaje de Compactación (%)			C (%) Promedio
1	93.60	93.60	93.60	93.60
2	90.80	91.30	92.20	91.43
3	92.00	92.00	92.00	92.00
4	90.40	91.30	92.10	91.27
5	90.50	92.30	92.60	91.80
6	90.20	90.60	91.00	90.60
7	91.20	91.50	91.90	91.53
8	90.80	91.40	91.70	91.30
9	92.20	92.40	92.40	92.33
10	92.60	92.90	93.50	93.00
11	93.20	93.20	93.30	93.23
12	90.90	91.20	91.30	91.13
13	92.10	92.20	92.30	92.20
14	94.10	94.10	94.20	94.13
15	93.90	94.10	94.30	94.10
16	91.80	92.30	92.70	92.27
17	90.90	91.40	91.50	91.27
18	91.50	91.90	92.20	91.87
19	91.10	91.40	91.50	91.33
20	94.50	94.90	95.20	94.87
21	93.30	94.00	94.00	93.77
22	92.80	93.20	93.30	93.10
23	92.40	94.00	94.00	93.47
24	87.80	87.90	87.90	87.87
25	87.20	87.30	87.40	87.30

Anexo 38.

Pto.	Porcentaje de Humedad (%)			H (%) Promedio
1	9.00	9.00	9.00	9.00
2	8.80	8.80	8.80	8.80
3	8.80	8.80	8.80	8.80
4	9.00	9.10	9.00	9.03
5	9.40	9.40	9.40	9.40
6	9.00	9.00	9.00	9.00
7	9.30	9.30	9.30	9.30
8	9.20	9.20	9.20	9.20
9	9.50	9.50	9.50	9.50
10	9.40	9.30	9.40	9.37
11	9.10	9.10	9.10	9.10
12	9.00	9.00	9.00	9.00
13	9.10	9.10	9.20	9.13
14	9.10	9.10	9.10	9.10
15	8.70	8.70	8.70	8.70
16	8.70	8.70	8.80	8.73
17	8.60	8.70	8.70	8.67
18	8.60	8.70	8.70	8.67
19	8.50	8.50	8.50	8.50
20	9.10	9.10	9.20	9.13
21	8.60	8.60	8.60	8.60
22	8.70	8.70	8.70	8.70
23	8.90	9.00	9.00	8.97
24	9.00	9.00	9.00	9.00
25	8.80	8.80	8.80	8.80

Anexo 39.

Pto.	x = D Seca Cono y Arena (g/cm ³)	y = D Seca D Eléctrico (g/cm ³)	X ²	Y ²	XY	X-MEDIA DE X	Y-MEDIA DE Y
1	1.907	1.863	3.6360111	3.470769	3.552429	0.014	0.031653333
2	1.874	1.819	3.5127473	3.3099738	3.409854	-0.019070746	-0.012013333
3	1.940	1.831	3.7619437	3.352561	3.551358	0.046269871	-0.000346667
4	1.909	1.816	3.6433951	3.2966454	3.465686	0.015464755	-0.01568
5	1.833	1.826	3.3614046	3.334276	3.347813	-0.059889829	-0.005346667
6	1.933	1.802	3.734871	3.247204	3.482512	0.039278244	-0.029346667
7	1.897	1.821	3.5993026	3.3172551	3.455402	0.003879613	-0.010013333
8	1.944	1.817	3.7792425	3.3002778	3.53165	0.050724183	-0.01468
9	1.911	1.837	3.6518097	3.3757938	3.511091	0.017667691	0.005986667
10	1.891	1.851	3.5775575	3.4249671	3.500431	-0.001859978	0.01932
11	1.874	1.855	3.5132889	3.441025	3.476969	-0.01892626	0.023653333
12	1.854	1.813	3.437922	3.2881778	3.362216	-0.039139767	-0.018013333
13	1.911	1.834	3.6508046	3.363556	3.504238	0.017404671	0.002653333
14	1.825	1.874	3.331709	3.5106268	3.419998	-0.068006231	0.04232
15	1.908	1.872	3.638925	3.5056321	3.571657	0.014293461	0.040986667
16	1.865	1.837	3.477751	3.3733444	3.42515	-0.028430271	0.00532
17	1.919	1.816	3.6828928	3.2990668	3.485701	0.025783243	-0.015013333
18	1.914	1.828	3.6623962	3.3428028	3.498952	0.020435604	-0.003013333
19	1.867	1.819	3.4844364	3.3075484	3.394841	-0.026638681	-0.01268
20	1.839	1.887	3.3804556	3.5620271	3.470054	-0.054701674	0.055986667
21	1.944	1.866	3.7802916	3.4832001	3.628707	0.050993999	0.034986667
22	1.893	1.853	3.5840387	3.433609	3.508018	-0.000147446	0.021653333
23	1.846	1.860	3.4086171	3.4583601	3.433399	-0.047059135	0.02832
24	1.913	1.748	3.6596398	3.0566694	3.344594	0.019715311	-0.083013333
25	1.922	1.738	3.6930579	3.0194854	3.339331	0.028429841	-0.09368
SUMATORIA	47.33257993	45.78366667	89.644512	83.874854	86.67205		
MEDIAS	1.893303197	1.831346667					

Anexo 40.

(X-MEDIA DE X)(Y-MEDIA DE Y)	Sx	Sy	r	R ²	b	a
0.000428255	0.035110929	0.034814386	-0.351516744	0.123564021	-0.34854788	2.49125348
0.000229103						
-1.60402E-05						
-0.000242487						
0.000320211						
-0.001152686						
-3.88479E-05						
-0.000744631						
0.000105771						
-3.59348E-05						
-0.000447669						
0.000705038						
4.61804E-05						
-0.002878024						
0.000585841						
-0.000151249						
-0.000387092						
-6.15793E-05						
0.000337778						
-0.003062564						
0.00178411						
-3.1927E-06						
-0.001332715						
-0.001636634						
-0.002663308						
SUMATORIA						

$$S_x = \frac{\sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n}}{\sqrt{n-1}}$$

$$S_y = \frac{\sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n}}{\sqrt{n-1}}$$

$$r = \frac{\sum((x-\text{media de } x) * (y-\text{media de } y))}{(n-1) * S_x * S_y}$$

$$R^2 = r^2$$

$$b = \frac{n * \sum(xy) - \sum x * \sum y}{n * \sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$a = \frac{\sum y}{n} - b * \frac{\sum x}{n}$$

$$Y = bX + a$$

Anexo 41.

Pto.	x = D Seca D Nuclear (g/cm ³)	y = D Seca D Eléctrico (g/cm ³)	X ²	Y ²	XY	X-MEDIA DE X	Y-MEDIA DE Y
1	2.051	1.863	4.2045503	3.470769	3.820082	0.080	0.031653333
2	1.984	1.819	3.9342723	3.3099738	3.608648	0.0126	-0.012013333
3	1.970	1.831	3.8809	3.352561	3.60707	-0.0009	-0.000346667
4	2.007	1.816	4.0260423	3.2966454	3.643135	0.0356	-0.01568
5	2.000	1.826	3.9980003	3.334276	3.651087	0.0286	-0.005346667
6	1.988	1.802	3.9501563	3.247204	3.581475	0.0166	-0.029346667
7	1.964	1.821	3.857296	3.3172551	3.577099	-0.0069	-0.010013333
8	1.964	1.817	3.8553323	3.3002778	3.567025	-0.0074	-0.01468
9	1.972	1.837	3.8868123	3.3757938	3.622303	0.0006	0.005986667
10	1.984	1.851	3.936256	3.4249671	3.671723	0.0131	0.01932
11	1.947	1.855	3.790809	3.441025	3.611685	-0.0239	0.023653333
12	1.955	1.813	3.8200703	3.2881778	3.54416	-0.0164	-0.018013333
13	1.980	1.834	3.9204	3.363556	3.63132	0.0091	0.002653333
14	1.982	1.874	3.928324	3.5106268	3.713607	0.0111	0.04232
15	1.922	1.872	3.6921623	3.5056321	3.597689	-0.0494	0.040986667
16	2.003	1.837	4.012009	3.3733444	3.678843	0.0321	0.00532
17	1.964	1.816	3.8553323	3.2990668	3.566371	-0.0074	-0.015013333
18	1.969	1.828	3.8749923	3.3428028	3.599074	-0.0024	-0.003013333
19	1.964	1.819	3.857296	3.3075484	3.571861	-0.0069	-0.01268
20	1.927	1.887	3.713329	3.5620271	3.636891	-0.0439	0.055986667
21	1.975	1.866	3.8986503	3.4832001	3.685075	0.0036	0.034986667
22	1.954	1.853	3.8161623	3.433609	3.619836	-0.0174	0.021653333
23	1.973	1.860	3.8907563	3.4583601	3.668193	0.0016	0.02832
24	1.971	1.748	3.884841	3.0566694	3.445965	1E-04	-0.083013333
25	1.910	1.738	3.6461903	3.0194854	3.318075	-0.0614	-0.09368
SUMATORIA	49.2725	45.78366667	97.130942	83.874854	90.23829		
MEDIAS	1.9709	1.831346667					

Anexo 42.

(X-MEDIA DE X)(Y-MEDIA DE Y)	Sx	Sy	r	R ²	b	a
0.002519605	0.028702134	0.034814386	0.135971807	0.018488332	0.16492763	1.5062908
-0.000151368						
3.12E-07						
-0.000558208						
-0.000152915						
-0.000487155						
6.9092E-05						
0.000108632						
3.592E-06						
0.000253092						
-0.000565315						
0.000295419						
2.41453E-05						
0.000469752						
-0.002024741						
0.000170772						
0.000111099						
7.232E-06						
8.7492E-05						
-0.002457815						
0.000125952						
-0.000376768						
4.5312E-05						
-8.30133E-06						
0.005751952						
SUMATORIA						
0.003260867						

$$S_x = \frac{\Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n}}{\sqrt{n-1}}$$

$$S_y = \frac{\Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{n}}{\sqrt{n-1}}$$

$$r = \frac{\Sigma((x-\text{meida de } x)*(y-\text{media de } y))}{(n-1)*S_x*S_y}$$

$$R^2 = r^2$$

$$b = \frac{n*\Sigma(xy) - \Sigma x*\Sigma y}{n*\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

$$a = \frac{\Sigma y}{n} - b * \frac{\Sigma x}{n}$$

$$Y = bX + a$$

Anexo 43.

Pto.	x = Humedad Cono y Arena (%)	y = Humedad D Eléctrico (%)	X ²	Y ²	XY	X-MEDIA DE X	Y-MEDIA DE Y
1	7.68	9.00	59.048762	81	69.15887	0.070	0.032
2	8.35	8.80	69.769427	77.44	73.50472	0.738065953	-0.168
3	7.58	8.80	57.406323	77.44	66.67493	-0.038047525	-0.168
4	8.57	9.03	73.388082	81.601111	77.38572	0.951940875	0.065333333
5	8.17	9.40	66.686179	88.36	76.76191	0.551417053	0.432
6	7.79	9.00	60.70795	81	70.12378	0.176787132	0.032
7	8.10	9.30	65.667538	86.49	75.36302	0.488807377	0.332
8	7.52	9.20	56.531402	84.64	69.17238	-0.09600686	0.232
9	7.94	9.50	63.026789	90.25	75.41994	0.324197733	0.532
10	8.08	9.37	65.315915	87.734444	75.69977	0.467082678	0.398666667
11	7.65	9.10	58.598508	82.81	69.66019	0.040222685	0.132
12	7.59	9.00	57.534186	81	68.26616	-0.029614261	0.032
13	6.97	9.13	48.603291	83.417778	63.674	-0.64313752	0.165333333
14	8.26	9.10	68.248677	82.81	75.17761	0.646532178	0.132
15	8.25	8.70	68.04965	75.69	71.76822	0.634477617	-0.268
16	7.49	8.73	56.16902	76.271111	65.45283	-0.120144138	-0.234666667
17	7.15	8.67	51.099062	75.111111	61.95246	-0.466382752	-0.301333333
18	7.07	8.67	50.003304	75.111111	61.28461	-0.54344209	-0.301333333
19	7.05	8.50	49.65559	72.25	59.89671	-0.568071273	-0.468
20	9.54	9.13	90.947929	83.417778	87.10152	1.921918781	0.165333333
21	7.79	8.60	60.710589	73.96	67.00862	0.176956478	-0.368
22	6.03	8.70	36.3605	75.69	52.46071	-1.584776723	-0.268
23	7.53	8.97	56.643399	80.401111	67.48476	-0.088562682	-0.001333333
24	6.02	9.00	36.266224	81	54.1993	-1.592599107	0.032
25	6.20	8.80	38.40958	77.44	54.53841	-1.41719725	-0.168
SUMATORIA	190.3685889	224.2	1464.8479	2012.3356	1709.191		
MEDIAS	7.614743558	8.968					

Anexo 44.

(X-MEDIA DE X)(Y-MEDIA DE Y)	Sx	Sy	r	R ²	b	a
0.00222642	0.796866001	0.266923487	0.385056757	0.148268706	0.12898115	7.98584163
-0.12399508						
0.006391984						
0.06219347						
0.238212167						
0.005657188						
0.162284049						
-0.022273592						
0.172473194						
0.186210294						
0.005309394						
-0.000947656						
-0.10633207						
0.085342247						
-0.170040001						
0.028193824						
0.140536669						
0.163757216						
0.265857356						
0.317757239						
-0.065119984						
0.424720162						
0.000118084						
-0.050963171						
0.238089138						
SUMATORIA						

$$S_x = \frac{\Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n}}{\sqrt{n-1}}$$

$$S_y = \frac{\Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{n}}{\sqrt{n-1}}$$

$$r = \frac{\Sigma((x-\text{meida de } x) * (y-\text{media de } y))}{(n-1) * S_x * S_y}$$

$$R^2 = r^2$$

$$b = \frac{n * \Sigma(xy) - \Sigma x * \Sigma y}{n * \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

$$a = \frac{\Sigma y}{n} - b * \frac{\Sigma x}{n}$$

$$Y = bX + a$$

Anexo 45

Pto.	x = Humedad D Nuclear (%)	y = Humedad D Eléctrico (%)	X ²	Y ²	XY	X-MEDIA DE X	Y-MEDIA DE Y
1	7.45	9.00	55.5025	81	67.05	0.058	0.032
2	8.20	8.80	67.24	77.44	72.16	0.8082	-0.168
3	7.40	8.80	54.76	77.44	65.12	0.0082	-0.168
4	7.05	9.03	49.7025	81.5409	63.63983	-0.3468	0.065333333
5	7.65	9.40	58.5225	88.36	71.91	0.2582	0.432
6	7.60	9.00	57.76	81	68.4	0.2082	0.032
7	7.00	9.30	49	86.49	65.1	-0.3918	0.332
8	7.60	9.20	57.76	84.64	69.92	0.2082	0.232
9	7.75	9.50	60.0625	90.25	73.625	0.3582	0.532
10	7.75	9.37	60.0625	87.7969	72.59167	0.3582	0.398666667
11	7.50	9.10	56.25	82.81	68.25	0.1082	0.132
12	7.60	9.00	57.76	81	68.4	0.2082	0.032
13	6.80	9.13	46.24	83.3569	62.10667	-0.5918	0.165333333
14	7.20	9.10	51.84	82.81	65.52	-0.1918	0.132
15	7.45	8.70	55.5025	75.69	64.815	0.0582	-0.268
16	7.05	8.73	49.7025	76.2129	61.57	-0.3418	-0.234666667
17	6.45	8.67	41.6025	75.1809	55.9	-0.9418	-0.301333333
18	6.70	8.67	44.89	75.1809	58.06667	-0.6918	-0.301333333
19	7.00	8.50	49	72.25	59.5	-0.3918	-0.468
20	10.25	9.13	105.0625	83.3569	93.61667	2.8582	0.165333333
21	7.90	8.60	62.41	73.96	67.94	0.5082	-0.368
22	6.35	8.70	40.3225	75.69	55.245	-1.0418	-0.268
23	9.00	8.97	81	80.4609	80.7	1.6082	-0.001333333
24	6.15	9.00	37.8225	81	55.35	-1.2418	0.032
25	5.95	8.80	35.4025	77.44	52.36	-1.4418	-0.168
SUMATORIA	184.795	224.2	1385.1095	2012.3356	1658.857		
MEDIAS	7.3918	8.968					

Anexo 46.

(X-MEDIA DE X)(Y-MEDIA DE Y)	Sx	Sy	r	R ²	b	a
0.0018624	0.893071572	0.266923487	0.282274791	0.079679057	0.084367	8.34437599
-0.1357776						
-0.0013776						
-0.0226576						
0.1115424						
0.0066624						
-0.1300776						
0.0483024						
0.1905624						
0.1428024						
0.0142824						
0.0066624						
-0.097844267						
-0.0253176						
-0.0155976						
0.080209067						
0.283795733						
0.2084624						
0.1833624						
0.472555733						
-0.1870176						
0.2792024						
-0.002144267						
-0.0397376						
0.2422224						
SUMATORIA	1.61494					

$$S_x = \frac{\Sigma x^2 - \frac{(\Sigma x)^2}{n}}{\sqrt{n-1}}$$

$$S_y = \frac{\Sigma y^2 - \frac{(\Sigma y)^2}{n}}{\sqrt{n-1}}$$

$$r = \frac{\Sigma((x-\text{media de } x) * (y-\text{media de } y))}{(n-1) * S_x * S_y}$$

$$R^2 = r^2$$

$$b = \frac{n * \Sigma(xy) - \Sigma x * \Sigma y}{n * \Sigma x^2 - (\Sigma x)^2}$$

$$a = \frac{\Sigma y}{n} - b * \frac{\Sigma x}{n}$$

$$Y = bX + a$$

Anexo 47.

Pto.	D Seca Cono y Arena (g/cm ³)	D Seca D Eléctrico (g/cm ³)	PROMEDIO X -X	PROMEDIO Y - Y	(PROMEDIO X -X) ²	(PROMEDIO Y -Y) ²	
1	1.907	1.863	-0.014	-0.032	0.000183048	0.001001934	
2	1.874	1.819	0.019	0.012	0.000363693	0.00014432	
3	1.940	1.831	-0.046	0.000	0.002140901	1.20178E-07	
4	1.909	1.816	-0.015	0.016	0.000239159	0.000245862	
5	1.833	1.826	0.060	0.005	0.003586792	2.85868E-05	
6	1.933	1.802	-0.039	0.029	0.00154278	0.000861227	
7	1.897	1.821	-0.004	0.010	1.50514E-05	0.000100267	
8	1.944	1.817	-0.051	0.015	0.002572943	0.000215502	
9	1.911	1.837	-0.018	-0.006	0.000312147	3.58402E-05	
10	1.891	1.851	0.002	-0.019	3.45952E-06	0.000373262	
11	1.874	1.855	0.019	-0.024	0.000358203	0.00055948	
12	1.854	1.813	0.039	0.018	0.001531921	0.00032448	
13	1.911	1.834	-0.017	-0.003	0.000302923	7.04018E-06	
14	1.825	1.874	0.068	-0.042	0.004624847	0.001790982	
15	1.908	1.872	-0.014	-0.041	0.000204303	0.001679907	
16	1.865	1.837	0.028	-0.005	0.00080828	2.83024E-05	
17	1.919	1.816	-0.026	0.015	0.000664776	0.0002254	
18	1.914	1.828	-0.020	0.003	0.000417614	9.08018E-06	
19	1.867	1.819	0.027	0.013	0.000709619	0.000160782	
20	1.839	1.887	0.055	-0.056	0.002992273	0.003134507	
21	1.944	1.866	-0.051	-0.035	0.002600388	0.001224067	
22	1.893	1.853	0.000	-0.022	2.17404E-08	0.000468867	
23	1.846	1.860	0.047	-0.028	0.002214562	0.000802022	
24	1.913	1.748	-0.020	0.083	0.000388693	0.006891214	
25	1.922	1.738	-0.028	0.094	0.000808256	0.008775942	
PROMEDIO	1.893	1.831			SUMATORIA	0.029586655	0.029088996
					VARIANZA (S²)	0.001232777	0.001212041
					DESVIACIÓN (S)	0.035110929	0.034814386
					NIVEL DE SIGNIFICANCIA (α)	0.05	
					α/2	0.025	
					F CRÍTICO	2.27	
					F	1.017108183	

$$S^2 = \frac{\Sigma(\text{PROMEDIO } X - X)^2}{n - 1}$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad F = \frac{S^2_1}{S^2_2}$$

Anexo48

Pto.	D Seca D Nuclear (g/cm ³)	D Seca D Eléctrico (g/cm ³)	PROMEDIO X - X	PROMEDIO Y - Y	(PROMEDIO X - X) ²	(PROMEDIO Y - Y) ²
1	2.051	1.863	-0.080	-0.032	0.00633616	0.001001934
2	1.984	1.819	-0.013	0.012	0.00015876	0.00014432
3	1.970	1.831	0.001	0.000	8.1E-07	1.20178E-07
4	2.007	1.816	-0.036	0.016	0.00126736	0.000245862
5	2.000	1.826	-0.029	0.005	0.00081796	2.85868E-05
6	1.988	1.802	-0.017	0.029	0.00027556	0.000861227
7	1.964	1.821	0.007	0.010	4.761E-05	0.000100267
8	1.964	1.817	0.007	0.015	5.476E-05	0.000215502
9	1.972	1.837	-0.001	-0.006	3.6E-07	3.58402E-05
10	1.984	1.851	-0.013	-0.019	0.00017161	0.000373262
11	1.947	1.855	0.024	-0.024	0.00057121	0.00055948
12	1.955	1.813	0.016	0.018	0.00026896	0.00032448
13	1.980	1.834	-0.009	-0.003	8.281E-05	7.04018E-06
14	1.982	1.874	-0.011	-0.042	0.00012321	0.001790982
15	1.922	1.872	0.049	-0.041	0.00244036	0.001679907
16	2.003	1.837	-0.032	-0.005	0.00103041	2.83024E-05
17	1.964	1.816	0.007	0.015	5.476E-05	0.0002254
18	1.969	1.828	0.002	0.003	5.76E-06	9.08018E-06
19	1.964	1.819	0.007	0.013	4.761E-05	0.000160782
20	1.927	1.887	0.044	-0.056	0.00192721	0.003134507
21	1.975	1.866	-0.004	-0.035	1.296E-05	0.001224067
22	1.954	1.853	0.017	-0.022	0.00030276	0.000468867
23	1.973	1.860	-0.002	-0.028	2.56E-06	0.000802022
24	1.971	1.748	0.000	0.083	1E-08	0.006891214
25	1.910	1.738	0.061	0.094	0.00376996	0.008775942
PROMEDIO	1.971	1.831				
				SUMATORIA	0.0197715	0.029088996
				VARIANZA (S²)	0.000823813	0.001212041
				DESVIACIÓN (S)	0.028702134	0.034814386
				NIVEL DE SIGNIFICANCIA (α)		0.05
				α/2		0.025
				F CRÍTICO		2.27
				F		1.471258911

$$S^2 = \frac{\Sigma(PROMEDIO X - X)^2}{n - 1}$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad F = \frac{S^2_1}{S^2_2}$$

Anexo 49.

Pto.	Humedad Cono y Arena (%)	Humedad D Eléctrico (%)	PROMEDIO X - X	PROMEDIO Y - Y	(PROMEDIO X - X) ²	(PROMEDIO Y - Y) ²	
1	7.68	9.00	-0.070	-0.032	0.00484077	0.001024	
2	8.35	8.80	-0.738	0.168	0.544741351	0.028224	
3	7.58	8.80	0.038	0.168	0.001447614	0.028224	
4	8.57	9.03	-0.952	-0.065	0.906191429	0.004268444	
5	8.17	9.40	-0.551	-0.432	0.304060766	0.186624	
6	7.79	9.00	-0.177	-0.032	0.03125369	0.001024	
7	8.10	9.30	-0.489	-0.332	0.238932652	0.110224	
8	7.52	9.20	0.096	-0.232	0.009217317	0.053824	
9	7.94	9.50	-0.324	-0.532	0.10510417	0.283024	
10	8.08	9.37	-0.467	-0.399	0.218166228	0.158935111	
11	7.65	9.10	-0.040	-0.132	0.001617864	0.017424	
12	7.59	9.00	0.030	-0.032	0.000877004	0.001024	
13	6.97	9.13	0.643	-0.165	0.41362587	0.027335111	
14	8.26	9.10	-0.647	-0.132	0.418003857	0.017424	
15	8.25	8.70	-0.634	0.268	0.402561847	0.071824	
16	7.49	8.73	0.120	0.235	0.014434614	0.055068444	
17	7.15	8.67	0.466	0.301	0.217512871	0.090801778	
18	7.07	8.67	0.543	0.301	0.295329305	0.090801778	
19	7.05	8.50	0.568	0.468	0.322704971	0.219024	
20	9.54	9.13	-1.922	-0.165	3.693771802	0.027335111	
21	7.79	8.60	-0.177	0.368	0.031313595	0.135424	
22	6.03	8.70	1.585	0.268	2.511517262	0.071824	
23	7.53	8.97	0.089	0.001	0.007843349	1.77778E-06	
24	6.02	9.00	1.593	-0.032	2.536371914	0.001024	
25	6.20	8.80	1.417	0.168	2.008448046	0.028224	
PROMEDIO	7.615	8.968			SUMATORIA	15.23989016	1.709955556
					VARIANZA (S²)	0.634995423	0.071248148
					DESVIACIÓN (S)	0.796866001	0.266923487
					NIVEL DE SIGNIFICANCIA (α)		0.05
					α/2		0.025
					F CRÍTICO		2.27
					F		8.912448109

$$S^2 = \frac{\Sigma(PROMEDIO X - X)^2}{n - 1}$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad F = \frac{S^2_1}{S^2_2}$$

Anexo 50.

Pto.	Humedad D Nuclear (%)	Humedad D Eléctrico (%)	PROMEDIO X -X	PROMEDIO Y - Y	(PROMEDIO X -X) ²	(PROMEDIO Y -Y) ²
1	7.45	9.00	-0.058	-0.032	0.00338724	0.001024
2	8.20	8.80	-0.808	0.168	0.65318724	0.028224
3	7.40	8.80	-0.008	0.168	6.724E-05	0.028224
4	7.05	9.03	0.347	-0.065	0.12027024	0.004268444
5	7.65	9.40	-0.258	-0.432	0.06666724	0.186624
6	7.60	9.00	-0.208	-0.032	0.04334724	0.001024
7	7.00	9.30	0.392	-0.332	0.15350724	0.110224
8	7.60	9.20	-0.208	-0.232	0.04334724	0.053824
9	7.75	9.50	-0.358	-0.532	0.12830724	0.283024
10	7.75	9.37	-0.358	-0.399	0.12830724	0.158935111
11	7.50	9.10	-0.108	-0.132	0.01170724	0.017424
12	7.60	9.00	-0.208	-0.032	0.04334724	0.001024
13	6.80	9.13	0.592	-0.165	0.35022724	0.027335111
14	7.20	9.10	0.192	-0.132	0.03678724	0.017424
15	7.45	8.70	-0.058	0.268	0.00338724	0.071824
16	7.05	8.73	0.342	0.235	0.11682724	0.055068444
17	6.45	8.67	0.942	0.301	0.88698724	0.090801778
18	6.70	8.67	0.692	0.301	0.47858724	0.090801778
19	7.00	8.50	0.392	0.468	0.15350724	0.219024
20	10.25	9.13	-2.858	-0.165	8.16930724	0.027335111
21	7.90	8.60	-0.508	0.368	0.25826724	0.135424
22	6.35	8.70	1.042	0.268	1.08534724	0.071824
23	9.00	8.97	-1.608	0.001	2.58630724	1.77778E-06
24	6.15	9.00	1.242	-0.032	1.54206724	0.001024
25	5.95	8.80	1.442	0.168	2.07878724	0.028224
PROMEDIO	7.392	8.968				

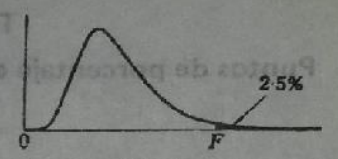
SUMATORIA	19.141844	1.709955556
VARIANZA (s²)	0.797576833	0.071248148
DESVIACIÓN (S)	0.893071572	0.266923487
NIVEL DE SIGNIFICANCIA (α)		0.05
α/2		0.025
F CRÍTICO		2.27
F		11.19435177

$$S^2 = \frac{\sum(PROMEDIO X - X)^2}{n - 1}$$

$$S = \sqrt{S^2} \quad F = \frac{S^2_1}{S^2_2}$$

Anexo 51.

TABLA 5b
Puntos de porcentaje de la distribución de F (2.5%)



ϕ_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞	ϕ_2
1	648	800	854	900	922	937	948	957	963	969	977	985	993	997	1001	1006	1010	114	1018	1
2	38.5	39.0	39.2	39.2	39.3	39.3	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.4	39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	39.5	2
3	17.4	16.0	15.4	15.1	14.9	14.7	14.6	14.5	14.5	14.4	14.3	14.3	14.2	14.1	14.1	14.0	14.0	13.9	13.9	3
4	12.2	10.6	9.98	9.60	9.36	9.20	9.07	8.98	8.90	8.84	8.75	8.66	8.56	8.51	8.46	8.41	8.36	8.31	8.26	4
5	10.0	8.43	7.76	7.39	7.15	6.98	6.85	6.76	6.68	6.62	6.52	6.43	6.33	6.28	6.23	6.18	6.12	6.07	6.02	5
6	8.81	7.26	6.60	6.23	5.99	5.82	5.70	5.60	5.52	5.46	5.37	5.27	5.17	5.12	5.07	5.01	4.96	4.90	4.85	6
7	8.07	6.54	5.89	5.52	5.29	5.12	4.99	4.90	4.82	4.76	4.67	4.57	4.47	4.42	4.36	4.31	4.25	4.20	4.14	7
8	7.57	6.06	5.42	5.05	4.82	4.65	4.53	4.43	4.36	4.30	4.20	4.10	4.00	3.95	3.89	3.84	3.78	3.73	3.67	8
9	7.21	5.71	5.08	4.72	4.48	4.32	4.20	4.10	4.03	3.96	3.87	3.77	3.67	3.61	3.56	3.51	3.45	3.39	3.33	9
10	6.94	5.46	4.83	4.47	4.24	4.07	3.95	3.85	3.78	3.72	3.62	3.52	3.42	3.37	3.31	3.26	3.20	3.14	3.08	10
11	6.72	5.26	4.63	4.28	4.04	3.88	3.76	3.66	3.59	3.53	3.43	3.33	3.23	3.17	3.12	3.06	3.00	2.94	2.88	11
12	6.55	5.10	4.47	4.12	3.89	3.73	3.61	3.51	3.44	3.37	3.28	3.18	3.07	3.02	2.96	2.91	2.85	2.79	2.72	12
13	6.41	4.97	4.35	4.00	3.77	3.60	3.48	3.39	3.31	3.25	3.15	3.05	2.95	2.89	2.84	2.78	2.72	2.66	2.60	13
14	6.30	4.86	4.24	3.89	3.66	3.50	3.38	3.29	3.21	3.15	3.05	2.95	2.84	2.79	2.73	2.67	2.61	2.55	2.49	14
15	6.20	4.76	4.15	3.80	3.58	3.41	3.29	3.20	3.12	3.06	2.96	2.86	2.76	2.70	2.64	2.58	2.52	2.46	2.40	15
16	6.12	4.69	4.08	3.73	3.50	3.34	3.22	3.12	3.05	2.99	2.89	2.79	2.68	2.63	2.57	2.51	2.45	2.38	2.32	16
17	6.04	4.62	4.01	3.66	3.44	3.28	3.16	3.06	2.98	2.92	2.82	2.72	2.62	2.56	2.50	2.44	2.38	2.32	2.25	17
18	5.98	4.56	3.95	3.61	3.38	3.22	3.10	3.01	2.93	2.87	2.77	2.67	2.56	2.50	2.44	2.38	2.32	2.26	2.19	18
19	5.92	4.51	3.90	3.56	3.33	3.17	3.05	2.96	2.88	2.82	2.72	2.62	2.51	2.45	2.39	2.33	2.27	2.20	2.13	19
20	5.87	4.46	3.85	3.51	3.29	3.13	3.01	2.91	2.84	2.77	2.68	2.57	2.46	2.41	2.35	2.29	2.22	2.16	2.09	20
21	5.83	4.42	3.82	3.48	3.25	3.09	2.97	2.87	2.80	2.73	2.64	2.53	2.42	2.37	2.31	2.25	2.18	2.11	2.04	21
22	5.79	4.38	3.78	3.44	3.22	3.05	2.93	2.84	2.76	2.70	2.60	2.50	2.39	2.33	2.27	2.21	2.14	2.08	2.00	22
23	5.75	4.35	3.75	3.41	3.18	3.02	2.90	2.81	2.73	2.67	2.57	2.47	2.36	2.30	2.24	2.18	2.11	2.04	1.97	23
24	5.72	4.32	3.72	3.38	3.15	2.99	2.87	2.78	2.70	2.64	2.54	2.44	2.33	2.27	2.21	2.15	2.08	2.01	1.94	24
25	5.69	4.29	3.69	3.35	3.13	2.97	2.85	2.75	2.68	2.61	2.51	2.41	2.30	2.24	2.18	2.12	2.05	1.98	1.91	25
26	5.66	4.27	3.67	3.33	3.10	2.94	2.82	2.73	2.65	2.59	2.49	2.39	2.28	2.22	2.16	2.09	2.03	1.95	1.88	26
27	5.63	4.24	3.65	3.31	3.08	2.92	2.80	2.71	2.63	2.57	2.47	2.36	2.25	2.19	2.13	2.07	2.00	1.93	1.85	27
28	5.61	4.22	3.63	3.29	3.06	2.90	2.78	2.69	2.61	2.55	2.45	2.34	2.23	2.17	2.11	2.05	1.98	1.91	1.83	28
29	5.59	4.20	3.61	3.27	3.04	2.88	2.76	2.67	2.59	2.53	2.43	2.32	2.21	2.15	2.09	2.03	1.96	1.89	1.81	29
30	5.57	4.18	3.59	3.25	3.03	2.87	2.75	2.65	2.57	2.51	2.41	2.31	2.20	2.14	2.07	2.01	1.94	1.87	1.79	30
40	5.42	4.05	3.46	3.13	2.90	2.74	2.62	2.53	2.45	2.39	2.29	2.18	2.07	2.01	1.94	1.88	1.80	1.72	1.64	40
60	5.29	3.93	3.34	3.01	2.79	2.63	2.51	2.41	2.33	2.27	2.17	2.06	1.94	1.88	1.82	1.74	1.67	1.58	1.48	60
120	5.15	3.80	3.23	2.89	2.67	2.52	2.39	2.30	2.22	2.16	2.05	1.94	1.82	1.76	1.69	1.61	1.53	1.43	1.31	120
∞	5.02	3.69	3.12	2.79	2.57	2.41	2.29	2.19	2.11	2.05	1.94	1.83	1.71	1.64	1.57	1.48	1.39	1.27	1.00	∞

Fuente: Esta tabla es recopilación de M. Merrington y C. Thompson, "Tables of percentage points of the inverted Beta (F) distribution," *Biometrika*, 33, 1943-1946 pp. 73-88; con permiso de autores y editores.