

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS A
TRAVÉS DE PRUEBAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA.**

POR:

ROMMEL FERNANDO BENÍTEZ PAZ

**ESTUDIO DE CASO PRESENTADO COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO
DE**

MAESTRO EN INGENIERIA

CHIHUAHUA, CHIH., MÉXICO

NOVIEMBRE 2018



Determinación de propiedades físicas de los suelos a través de pruebas de resistividad eléctrica. Estudio de caso presentado por Rommel Fernando Benítez Paz como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobado y aceptado por:

M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado

M.C. Alejandro Calderón Landaverde
Nombre del Coordinador
Coordinador(a) Académico

M.C. Alejandro Calderón Landaverde
Director de Estudio de Caso

Noviembre 2018

Fecha

Comité:

M.C. Alejandro Calderón Landaverde
Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Dra. Daphne Espejel García
M.I. José Antonio Portillo Ocegüera

© Derechos Reservados

Rommel Fernando Benítez Paz
Calle Santa Laura 5-A, Colonia
San Carlos, Nogales, Sonora.
C.P. 84090

NOVIEMBRE DE 2018



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

28 de noviembre de 2018

ING. ROMMEL FERNANDO BENÍTEZ PAZ

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de Estudio de Caso para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director **M.C. Alejandro Calderón Landaverde** para que lo desarrolle como Estudio de Caso, con el título: **"DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS A TRAVÉS DE PRUEBAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA"**.

ÍNDICE

Resumen

Índice de Contenido

Índice de Tablas

Índice de Figuras

DETERMINACION DE PROPIEDADES FISICAS Y MECANICAS A TRAVES DE PRUEBAS DE RESISTIVIDAD ELECTRICA

Capítulo 1. Modelación matemática

1.1 Planteamiento de la ecuación diferencial

Capítulo 2. Diseño de prueba paramétrica y validación experimental

2.1 Prototipo de prueba

2.2 Validación experimental

Capítulo 3. Caso real de utilización del equipo KC-16 en campo

3.1 Descripciones de trabajos de campo

3.2 Trabajos preliminares de laboratorio

3.3 Cálculos de humedad del suelo por medio del equipo KC-16



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

Capítulo 4. Conclusiones

Curriculum Vitae

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares del Estudio de Caso.

ATENTAMENTE
"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

M.I. JAVIER GONZÁLEZ CANTÚ

FACULTAD DE
INGENIERÍA
UACH.



DIRECCIÓN

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN

En la vida existen momentos emotivos que deseáramos compartir con las personas que son de gran importancia en nuestras vidas, en ocasiones el tiempo no alcanza.

Dedico el presente estudio a:

*La memoria de quien fue el ser que me dio la identidad en la vida, con profundo amor y reconocimiento a mi padre
Profe. José Francisco Benítez Rivera.*

*Lo dedico como honra a las lecciones de vida con gratitud y amor a mi mejor maestra, por siempre estar presente en los momentos más relevante de la vida, por impulsar mis Sueños y enseñarme – a mi madre
Profra. Irma Paz Ibarra*

Resumen

En los últimos años se ha creado la “necesidad” de procesos de certificación y, acreditación y/o mecanismos de calidad que respalden el profesionalismo y ética de las instituciones y en general del ser humano. Hablando en el ramo de la construcción que es el que nos corresponde, se han implementado cursos, normatividades entre otras actividades que desde mi punto de vista se le da prioridad al cumplimiento de estos protocolos que si bien fortalecen nuestro desempeño profesional pueden llegar a obstaculizar el desarrollo de tecnologías e innovación procesos, mismos que se pueden implementar por experiencia, ingenio y creatividad propias del ser humano.

En el área de control de calidad de la construcción, orientado a lo que respecta en suelos compactados existen métodos para determinar las dos variables que intervienen en su calidad, el porcentaje de humedad en el momento de la compactación, ω , y el grado de compactación, %C, (porcentaje respecto al peso volumétrico seco máximo); estos métodos para medición de estos parámetros tienen sus normas y procedimientos tanto en campo como en laboratorio, mismos que deben de ser ejecutados bajo sus lineamientos sin pasar un punto o una coma aun cuando el técnico conozca a la perfección y el sentido de cada uno de estos procesos.

La poca flexibilidad que anteponen estas normas y la rigidez con la que se aplica, no permiten que la persona pueda moverse hacia ningún lado, es lineal y siempre hacia el frente sin la posibilidad de ver hacia nuevos horizontes técnico-científicos que permitan la creación de nuevos procesos e implementación de equipos más económicos que den resultados igual o más precisos, que cuenten con un modelo matemático que los respalde y justifique la implementación de los mismos.

Dentro de los equipos que se utilizan para medir propiedades mecánicas de los suelos existen geófonos, dispositivos eléctricos y densímetros, estos últimos, son utilizados con mucha frecuencia y se les da mucho crédito, de acuerdo a la experiencia presentan resultados dudosos, lo anterior se basa, porque en muchas ocasiones y diversos trabajos, se llevan a cabo las pruebas en el mismo punto, girando el densímetro 180 grados y hay variaciones del orden de 4 a 6%, este punto es defendido por las personas que utilizan este equipo pero hay bases sólidas para debatir esto mismo que no es materia del presente escrito.

La medición de algunas propiedades mecánicas por métodos indirectos a través de mediciones eléctricas, se han comprobado para diferentes suelos tanto locales como fuera de la región de Nogales, Sonora obteniendo resultados y tendencias matemáticamente diseñadas y comprobadas. Se analizó una de ellas, que es el contenido de humedad, partiendo de las siguientes premisas:

1. El suelo entre menos humedad tiene presenta más oposición al paso de corriente eléctrica.
2. Un suelo con un determinado contenido de humedad en reposo (por más de 24 horas), presenta mayor resistencia al paso de corriente eléctrica que otro suelo con el mismo contenido de humedad agregada en el instante de tiempo de su medición.

El modelo matemático que sustenta la utilización del óhmetro para determinar el grado de humedad del suelo es la solución de la ecuación diferencial propuesta (ecuación 1.1.0).

La variación de la resistividad eléctrica del suelo respecto a la variación de la humedad, es inversamente proporcional a la humedad del suelo en un instante de tiempo dado.

Considerando la ecuación propuesta, la proporcionalidad que existe entre la resistividad eléctrica, R , y el contenido de humedad, ω , se convierte en una igualdad considerando a una constante de proporcionalidad, K .

La solución esta ecuación diferencial ordinaria de primer orden por el método de variable separable, dejando la humedad del suelo como función de la resistividad, estableciendo la metodología para determinar la constantes de integración y proporcionalidad.

Considerando conocida la resistividad eléctrica para un mismo suelo con dos contenidos de humedad distintos, tenemos los puntos (R_1, ω_1) y (R_2, ω_2) , se determina las constantes de integración, C , y de proporcionalidad, K , sustituidos en la solución de la ecuación diferencial, siendo la constante de proporcionalidad y la constante de integración respectivamente resolviendo dicho sistema, se da origen a la ecuación general Humedad-Resistividad denominada como ecuación de **Irma Paz**.

El proceso de prueba de laboratorio para determinar los valores determinados para cada suelo de las constantes mencionadas. El conocimiento de las constantes del suelo que intervienen en este fenómeno, sustituidos en la ecuación la ecuación general de los suelos

que determinan el comportamiento de la curva de resistividad –humedad, determina la ecuación particular del suelo en estudio.



Índice de Contenido

Resumen	3
Índice de Contenido	6
Índice de Tablas	7
Índice de Figuras	8
Capítulo 1: Modelación Matemática	1
1.1 PLANTEAMIENTO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL.	3
1.1.1 Solución de la ecuación diferencial.	3
1.1.2 Obtención e interpretación física de los parámetros K y C.	4
1.1.3 Simplificación de la ecuación para determinar la humedad en función de la resistividad.	6
Capítulo 2: Diseño de Prueba Paramétrica y Validación Experimental.	9
2.1 PROTOTIPO DE PRUEBA.	9
2.1.1 Procedimiento de prueba.	11
2.1.2 Ecuación particular de un suelo a través de prueba de laboratorio.	12
2.1.3 Determinación de humedad en campo para pruebas de terracerías.	12
2.2 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.	13
2.2.1 Comparación de curva experimental y curva teórica.	17
2.2.2 Resultado del análisis comparativo para el suelo 2.	18
2.2.3 Comparación entre las curvas teóricas de los suelos ensayados. .	20
Capítulo 3: Caso Real de Utilización del Equipo KC-16 en Campo.	22
3.1 DESCRIPCIONES DE TRABAJOS DE CAMPO.	24
3.2 TRABAJOS PRELIMINARES DE LABORATORIO.	25
3.2.1 Clasificación del suelo.	25
3.2.1 Peso volumétrico máximo, γ_{dmax} .	29
3.3 CÁLCULOS DE HUMEDAD DEL SUELO POR MEDIO DEL EQUIPO KC-16.	31
Capítulo 4: Conclusiones.	32
4.1 PUNTOS IMPORTANTES EN LA INTERPRETACIÓN DEL MODELO MATEMATICO.	32
4.2 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.	32
4.3 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO	33
Bibliografía.	35
Curriculum Vitae	¡Error! Marcador no definido.



Índice de Tablas

Tabla 2.1: Puntos de prueba resistividad – humedad para suelo 1.	14
Tabla 2.2: Puntos de prueba resistividad – humedad para suelo 2.	14
Tabla 2.3: Análisis comparativo del comportamiento experimental vs comportamiento teórico (suelo 1)..	18
Tabla 2.4: Análisis comparativo del comportamiento experimental vs. Comportamiento teórico (suelo 2).	18
Tabla 2.5: Humedades teóricas en suelos de prueba para resistividades establecidas.	21
Tabla 3.1: Profundidad media del tirante.	25
Tabla 3.2: Datos granulometría muestra sondeo S1.	25
Tabla 3.3: Datos granulometría muestra sondeo S2	26
Tabla 3.4: Datos granulometría muestra sondeo S3	27
Tabla 3.5: Composición granulométrica de muestras de sondeos 1, 2 y 3.	28
Tabla 3.6: Datos de la prueba de peso volumétrico seco máximo.	30
Tabla 3.7: Comparativo de humedad obtenida por el método tradicional y prueba con quipo KC-16, franja norte altura del relleno promedio 7.00 m.	31



Índice de Figuras

Figura 1.1: Curva típica humedad – resistividad. .	4
Figura 2.1: Componentes del equipo de prueba KC-16	10
Figura 2.2: Gráfica de relación resistividad – humedad suelo uno. .	16
Figura 2.3: Gráfica de relación resistividad – humedad suelo dos. .	16
Figura 2.4: Gráfica comparativa entre la curva experimental vs curva teórica para suelo	17
Figura 2.5: Gráfica comparativa entre la curva experimental vs. curva teórica para suelo	20
Figura 2.6: Gráfica teórica para suelos ensayados 1 y 2.	21
Figura 3.1: Localización sitio de estudio.	23
Figura 3.2: Ubicación de los sondeos.	24
Figura 3.3: Gráfica curva granulométrica suelo S1.	26
Figura 3.4: Gráfica curva granulométrica suelo S2	27
Figura 3.5: Gráfica curva granulométrica suelo S3	28
Figura 3.6: Curva de compactación suelo de estudio.	29



DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS A TRAVÉS DE PRUEBAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Capítulo 1: Modelación Matemática

El presente trabajo, comprende la primera etapa de esta investigación, con el objetivo de determinar la humedad del suelo a través de pruebas de resistividad eléctrica, en etapas posteriores del proyecto se determinará densidad y constantes de capacidad de carga en base a estas pruebas eléctricas; partiendo de un modelo matemático y validado experimentalmente.

El modelo matemático se establece mediante la solución de la ecuación diferencial propuesta, bajo ciertos criterios, tomando en cuenta el análisis de los elementos que influyen en el comportamiento de la relación humedad-resistividad en los suelos, las condiciones físicas del mismo, así como el conocimiento previo de conceptos y/o definiciones que se involucran.

Se le denomina **resistencia eléctrica** a la oposición al flujo de electrones al moverse a través de un conductor, consultado en https://es.wikipedia.org/wiki/Resistencia_el%C3%A9ctrica enero 2017, todos los materiales presentan oposición a este flujo eléctrico, unos en mayores proporciones que otros; dentro de los elementos que conducen con mayor facilidad el flujo conocemos los metales, pasando por diferentes elementos que presentan mayor resistencia hasta llegar a los aislantes que no permiten el flujo eléctrico como es el caso de los polímeros.

El fenómeno que es objeto del presente estudio, es el comportamiento de resistividad eléctrica en la masa de suelos, dirigiendo al análisis y entendimiento de la su estructura, así como la influencia de cada una de las partes que lo componen para la comprensión y el correcto planteamiento del modelo que represente apegado a la realidad.

La masa de suelo está compuesta por los volúmenes de sólidos y volúmenes de vacíos, subdividida en tres fases: sólida, líquida y gaseosa. La fase sólida representada por las partículas minerales clasificadas por gravas, arenas y finas (arcillas y limos); la fase



líquida y gaseosa, pertenecen ambas al volumen de vacíos, representadas por los canales huecos entre las partículas.

Los suelos en estado seco, sólo presentan dos fases (sólida y gaseosa), debido a que el total del volumen de vacíos está ocupado por el aire. La resistividad eléctrica que presenta el suelo bajo esta condición, se debe totalmente a sus propiedades de composición mineralógica y a su grado de compactación del suelo consultado en: <https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html> Enero de 2017.

Los suelos en estado natural, por lo general presentan cierto porcentaje de contenido de agua, ω , respecto al peso seco, reflejando variaciones en el grado de saturación de agua, $G\omega$, en rangos mayores a cero por ciento para un suelo húmedo, hasta el cien por ciento para el suelo saturado. Esta variación en el grado de saturación de agua en el suelo, refleja

en cambios en la resistividad, debido a que el agua es un conductor de electricidad al incrementarse dentro de la masa de suelo, disminuye la oposición al flujo eléctrico.

Considerando la hipótesis del presente trabajo de investigación, es el principio para proponer la ecuación diferencial para establecer el modelo matemático que explica este fenómeno, la resistividad de un suelo es inversamente proporcional a su contenido de humedad.

Los factores que influyen en el fenómeno humedad-resistividad de los suelos son Consultado en: <https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html> Enero de 2017:

- Composición propia del terreno.
- Estado higrométrico (Contenido de humedad del suelo).
- Compactación.
- Sales solubles.
- Estratigrafía.
- Granulometría.
- Temperatura.



Los tres primeros son los de mayor influencia para el estudio del fenómeno humedad-resistividad y son los que se pueden controlar para normalización de la prueba paramétrica de laboratorio y/o campo; respecto a las otras variables del fenómeno como sales solubles, estratigrafía, granulometría y temperatura, se desprecia por la casi nula influencia, por la metodología de prueba diseñada.

1.1 PLANTEAMIENTO DE LA ECUACIÓN DIFERENCIAL.

Considerando una nada de suelo en estado suelto, se establece que la variación de la resistividad eléctrica, R , respecto al contenido de humedad, ω , es inversamente proporcional al contenido de humedad en un tiempo dado, expresado de la siguiente manera:

$$\frac{dR}{d\omega} \propto \frac{1}{\omega} \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.1.0}$$

La ecuación 1.1.0 es una proporción, no una igualdad, introduciendo la constante de proporcionalidad, K , la escribimos de la siguiente manera:

$$\frac{dR}{d\omega} = K \frac{1}{\omega} \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.1.1}$$

1.1.1 Solución de la ecuación diferencial.

La ecuación diferencial propuesta (Ec. 1.1.1), es una ecuación diferencia de primer orden y primer grado, misma que se puede expresar de la forma $A(R) dR + B(\omega) d\omega = 0$, por el método de separación de variables, se obtiene:

$$dR - K \frac{1}{\omega} d\omega = 0 \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.1.2}$$

Resolviendo la ecuación 1.1.2 mediante la integral, se obtiene:

$$\int dR - K \int \frac{1}{\omega} d\omega = 0$$



Integrando ambos términos se deduce:

$$R - K \ln |\omega| + C_1 = 0$$

Despejando R de la expresión anterior se obtiene:

$$R = K \ln |\omega| + C \quad \text{.....Ecuación 1.1.3}$$

La ecuación 1.1.3 corresponde a la solución de la ecuación diferencial propuesta, considerando que el objetivo principal de este estudio es el de establecer una metodología para determinar la humedad en campo a partir de pruebas de resistividad eléctrica, la expresión matemática requerida, es la humedad en función de la resistividad y la obtención de los parámetros K y C, constante de proporcionalidad y la constante de integración y la definición e interpretación de ambos.

1.1.2 Obtención e interpretación física de los parámetros K y C.

Los parámetros de proporcionalidad, K, y el de la integración, C, son los que caracterizarán la curva de humedad – resistividad para cada suelo en particular, se obtienen por medio de dos valores de pares ordenados de coordenadas (ω , R) de la curva de la gráfica de la figura 1.1.

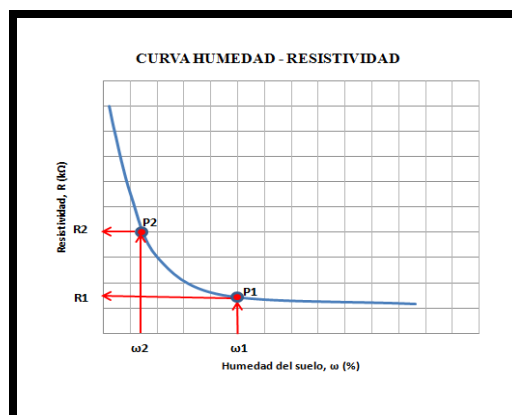


Figura 1.1: Curva típica humedad - resistividad.



La figura 1.1 representa una curva típica del comportamiento de la humedad – resistividad del suelo, mediante la cual se determinan las coordenadas (ω_1 , R_1) y (ω_2 , R_2) para los puntos P_1 y P_2 respectivamente y con el conocimiento de la ecuación 1.1.3 se determinan las constantes K y C características de los suelos.

Sustituyendo los valores de los puntos P_1 y P_2 en la ecuación 1.1.3 tenemos el siguiente sistema de ecuaciones.

$$\begin{aligned} R_1 &= K \ln \left| \omega_1 \right| + C \\ R_2 &= K \ln \left| \omega_2 \right| + C \end{aligned}$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones anterior mostrado determinan los valores de las constantes K y C , de la ecuación 1.1.3.

$$\begin{aligned} K &= \frac{R_1 - R_2}{\ln \left| \frac{\omega_1}{\omega_2} \right|} \\ C &= R_1 - \frac{R_1 - R_2}{\ln \left| \frac{\omega_1}{\omega_2} \right|} \ln \left| \omega_1 \right| \end{aligned}$$

El parámetro del suelo denominado constante de proporcionalidad, K , es la constante de conductividad eléctrica del comportamiento de la mezcla suelo – agua, para los diferentes rangos de variación del contenido de humedad del suelo, ω , trasladados al rango de variación del grado de saturación de agua, $G\omega$.

La interpretación física de la constante de integración, C , se determina mediante el análisis matemático de la ecuación 1.1.3.

Aplicando la propiedad de logaritmos a la ecuación 1.1.3 la expresamos como:

$$R = \ln \left| \omega \right|^K + C \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.1.4}$$



El valor de la constante de proporcionalidad, K , de acuerdo al análisis de la gráfica de la figura 1.1 y las ecuaciones para determinarla presentada en la tabla 1.2, se deduce que siempre será negativa ($K < 0$), por lo tanto la ecuación 1.1.4 la podemos escribir como:

$$R = \frac{1}{\ln |\omega|} \cdot K + C \quad \dots\dots\dots \text{Ecuación 1.1.5}$$

La ecuación 1.1.5 trasladándola a un problema de límites cuando la humedad tiende a valores muy altos es decir a la humedad de saturación la expresamos como:

$$\begin{aligned} R &= \lim_{K \rightarrow \alpha} \left[\frac{1}{\ln |\omega|} \cdot K + C \right] \\ R &= \left[0 + C \right] \\ R &= C \end{aligned}$$

La constante de integración, C , de acuerdo al análisis matemático representado la exprecion anterior, se concluye que es la resistividad eléctrica para un suelo en saturación.

1.1.3 Simplificación de la ecuación para determinar la humedad en función de la resistividad.

El objetivo de este proyecto, es la de determinar la humedad de los suelos en campo mediante una metodología y prueba de laboratorio mediante el método indirecto, a través de pruebas de resistividad eléctrica, razón por la cual la ecuación 1.1.3, solución de la ecuación deferencial propuesta, se debe expresar la humedad como función de la



resistividad eléctrica, despejando el contenido de humedad de la expresión 1.1.3 representada de la siguiente manera:

$$R = K \ln |\omega| + C \quad \text{..... Ecuación 1.1.3}$$

Despejando la expresión $\ln (\omega)$ de la ecuación 1.1.3, queda de la siguiente manera:

$$\ln |\omega| = \frac{R - C}{K} \quad \text{..... Ecuación 1.1.6}$$

Considerando que el logaritmo natural de su base **e** es igual a uno, ($\ln \mathbf{e} = 1$), multiplicando el miembro derecho de la ecuación 1.1.6 no se altera, obteniendo la ecuación 1.1.7.

Considerando la propiedad de logaritmo $\ln (A) = \ln (A)^n$, la ecuación 1.1.7, y con la equivalencia de los logaritmos de ambos miembros de la igualdad se expresa como:

$$\ln |\omega| = \frac{R - C}{K} \ln \mathbf{e} \quad \text{..... Ecuación 1.1.7}$$

Considerando la propiedad de logaritmo $\ln (A) = \ln (A)^n$, la ecuación 1.1.7, y con la equivalencia de los logaritmos de ambos miembros de la igualdad se expresa como:

$$\omega (R) = \mathbf{e}^{\frac{R - C}{K}} \quad \text{..... Ecuación 1.1.8}$$

En la ecuación de humedad en función de la resistividad, obtenida e identificada como 1.1.8, se substituyen las constantes de proporcionalidad, K, del suelo y la constante de integración, C, o resistividad del suelo en estado de saturación mismas que se muestran en



la *Tabla 1.2*, se obtiene la ecuación general los suelos para determinar la humedad en función de lecturas de resistividad eléctrica, como se muestra a continuación.

$$\omega (R) = e^{\frac{R}{R - R_1} \ln \left| \frac{\omega_1}{\omega_2} \right| + \ln \left| \omega_1 \right| - \frac{R_1}{R - R_1} \ln \left| \frac{\omega_1}{\omega_2} \right|}$$

Ecuación 1.1.9 denominada, ecuación de Irma Paz.

Donde: $\omega (R)$ es la humedad de una muestra de suelo suelta en función de la resistividad, medida en porcentaje (%).

R lectura de resistividad eléctrica para la muestra de suelo, medida en kilo Ohms ($k\Omega$).

R_i Resistividad eléctrica, correspondiente al punto, P_i , medida en Kilo Ohms, ($k\Omega$).

ω_i Humedad del suelo correspondiente al punto, P_i , medida en porcentaje, (%).



Capítulo 2: Diseño de Prueba Paramétrica y Validación Experimental.

En el diseño de la prueba para la validación de la ecuación 1.1.9 deducida en el capítulo anterior, se toma en consideración las variables que intervienen el comportamiento humedad – resistividad para el suelo clasificándolas como: internas, la naturaleza y composición mineralógica del suelo, contenido de humedad, grado de acomodo o compactación del suelo; así como las variables externas sales solubles, estratigrafía, granulometría y temperatura consultado en <https://www.ruelsa.com/notas/tierras/pe70.html> Enero de 2017.

Las variables que tienen mayor influencia para este análisis de este fenómeno son las denominadas variables internas, de estas tres variables la que corresponde a las características de la naturaleza del suelo permanece constante para el análisis experimental del mismo, la humedad es la variable que interviene directamente en el análisis del fenómeno y la que respecta al grado de acomodo, la prueba se realizara con suelo completamente suelo; bajo estas consideraciones, al ensayar un mismo suelo en estado suelto variando el contenido de humedad y manteniendo constante el estado suelto del suelo, la resistividad es la segunda variable, analizando solo la variación de la resistividad con respecto a variación de la húmeda.

2.1 PROTOTIPO DE PRUEBA.

El equipo de prueba para validación de la ecuación 1.1.9, denominado KC-16, está compuesto de cinco partes como se muestra en la figura 2.1; descritos a continuación:

- a) Base es un elemento cilíndrico, de 10.16 cm (4”) de diámetro y 12.07 cm (4 ¾”) medidas a paños interiores, con espesor de pared y base de 1.27 cm (1/2”) y bisel exterior para acoplamiento de anillo superior y anillo de prueba.
- b) Anillo superior, cilindro sin fondo de 10.16 cm (4”) de diámetro y 5.72 cm (2 ¼”) de altura, con espesor de paredes de 1.27 cm (1/2”) con bisel interior para acoplamiento con la base y bisel exterior en la parte superior para acoplamiento de la tapa.



- c) Tapa, cilindro con diámetro interior de 11.43 cm (4 ½”) con espesor de 1.27 cm (1/2”) y muesca perimetral inferior de 0.635 x 0.635 cm (1/4” x 1/4”) para ensamble en parte alta del anillo superior.
- d) Anillo de prueba, cilindro con tapa superior, con diámetro interior de 10.16 cm (4”) espesor de paredes de 1.27 cm (1/2”) y espesor de tapa de 2.54 cm (1”) provisto de dos orificios con separación de 6.35 cm (2 ½”) repartidos simétricamente sobre la cuerda mayor (línea de diámetro).
- e) Puntas de prueba, varillas de 20.32 cm (8”) con indicador de penetración a 3.81 cm (1 ½”) medidos desde la parte superior.

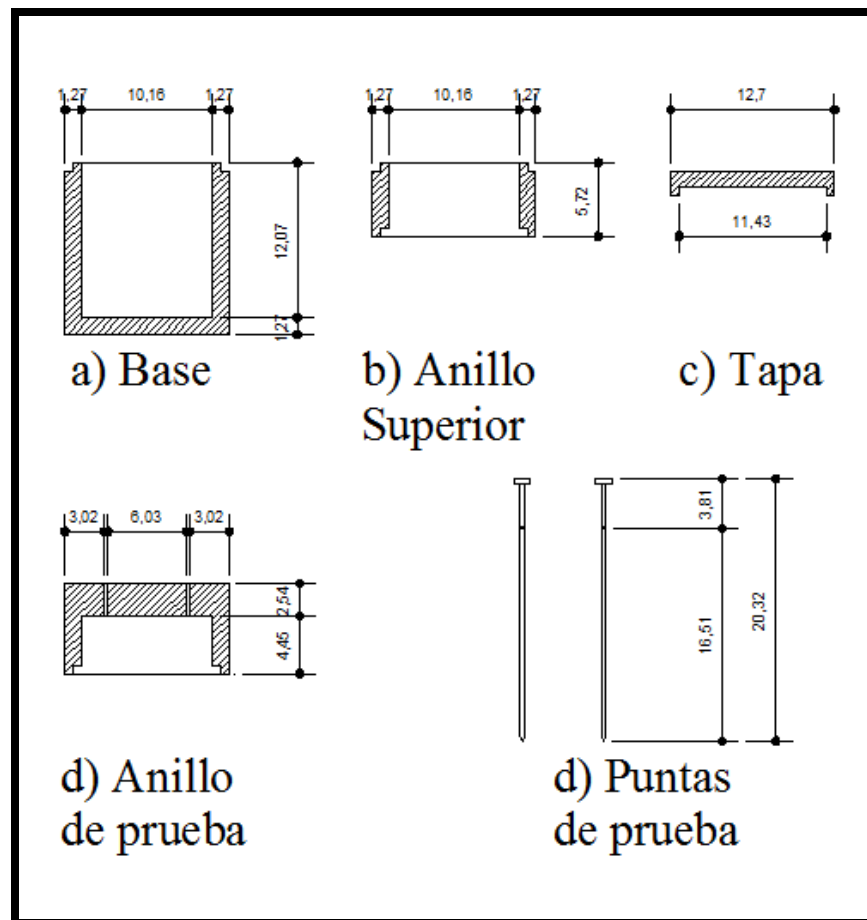


Figura 2.1: Componentes del equipo de prueba KC-16.



2.1.1 Procedimiento de prueba.

Procedimiento para el ajuste de un suelo a la curva humedad resistividad:

a) Equipo:

Equipo KC-16, provisto de base, anillo superior, tapa, anillo de prueba y par de punas de prueba.

Marro con mazo de plástico.

Charola de 30 x 40 cm para homogenizar la muestra.

Óhmetro eléctrico con opción de Ohms, (con pinzas caimán de preferencia).

Atomizador de agua de 1 lt de capacidad.

Cucharon de 5 cm de salida máximo.

Brocha de 2.54 cm (1")

b) Material:

Tres kg de suelo de prueba seco, separado en dos bolsas de 1.5 kg cada una, previamente cribados por la malla de 1/2".

Agua.

c) Procedimiento de prueba:

1. Verter una de las bolsas de suelo sobre la charola, agregar 90 ml (90 gr) de agua, equivalente a un contenido de humedad de 6%.
2. Colocar el anillo superior sobre la base del suelo y preceder al llenado del cilindro hasta la mitad de la altura del anillo superior (14.61 cm).
3. Colocar la tapa sobre el anillo superior y hacer tres giros de 180° para acomodar el suelo a una misma compacidad.
4. Colocar el cilindro con la muestra de suelo, retirar el anillo superior y la tapa, enrazando el suelo de la muestra hasta el borde superior del bisel de la base, limpiar con la brocha el borde del bisel.
5. Colocar el anillo de prueba sobre la base.
6. Introducir las puntas de prueba en la masa de suelo, por los orificios del anillo de prueba, con el marro hasta la marca indicada.
7. Tomar la lectura de resistividad sobre las puntas de prueba.



8. Repetir el proceso para la segunda muestra incorporando 135 ml de agua (0.09%).
9. Registrar los valores de humedad correspondientes los de resistividad e identificarlos como un par ordenado de coordenadas (R_1, ω_1) y (R_2, ω_2).
10. Determinar la ecuación particular del suelo ensayado, sustituyendo en la ecuación 1.1.9 los valores de las coordenadas indicado en el paso 9.

2.1.2 Ecuación particular de un suelo a través de prueba de laboratorio.

Como ya se describió en el primer capítulo del presente documento, la ecuación que rige el comportamiento humedad-resistividad para un suelo determinado se puede construir partiendo de la ecuación 1.1.9 y el par ordenado obtenido en las pruebas de laboratorio, por medio de la sustitución, la ecuación particular quedaría de la siguiente manera:

$$\omega(R) = e^{aR - b} \quad \text{..... Ecuación 2.1.0}$$

Donde:

a Es el resultado de sustituir (R_1, ω_1) y (R_2, ω_2), en $\frac{R}{R - R_1} \ln \left| \frac{\omega_1}{\omega_2} \right|$.

b Es el resultado de sustituir (R_1, ω_1) y (R_2, ω_2), en

$$\ln \left| \omega_1 \right| - \frac{R_1}{R - R_1} \ln \left| \frac{\omega_1}{\omega_2} \right|.$$

2.1.3 Determinación de humedad en campo para pruebas de terracerías.

El equipo de laboratorio KC-16 está diseñado para determinar los contenidos de humedad de los suelo en procedimientos de movimiento de tierras y compactación en obras civiles en general, previo al análisis del suelo en laboratorio con el procedimiento descrito en 2.1.1 y la obtención de la ecuación particular des suelo humedad - resistividad como se describe en el punto 2.1.2.



El procedimiento para obtener la humedad en función de las lecturas de resistividad, es similar al procedimiento de laboratorio descrito en 2.1.1, con la diferencia del conocimiento de la ecuación particular del suelo en estudio, se requiere una única lectura de resistividad bajo las condiciones de humedad y homogenización del suelo en el sitio, y por sustitución en la ecuación particular, se obtiene el contenido de humedad del suelo.

Procedimiento para determinar el contenido de humedad de un suelo en campo:

1. Tomar una muestra en campo de aproximadamente 2.00 kg.
2. Cribar el suelo por la maya 1/2".
3. Las partículas de suelo menores a 1.27cm colocarlo en una charola y disgregar los grumos.
4. Colocar el anillo superior sobre la base del suelo y preceder al llenado del cilindro hasta la mitad de la altura del anillo superior (14.61 cm).
5. Colocar la tapa sobre el anillo superior y hacer tres giros de 180° para acomodar el suelo a una misma compacidad.
6. Retirar el anillo superior y la tapa, enrazando la muestra hasta el borde superior del bisel de la base, limpiar con la brocha el borde del bisel.
7. Colocar el anillo de prueba sobre la base.
8. Introducir las puntas de prueba en la masa de suelo, por los orificios del anillo de prueba, con el marro hasta la marca indicada.
9. Tomar la lectura de resistividad sobre las puntas de prueba, registrar el valor de resistividad en campo obtenido, R_c .
10. El valor de la humedad de la muestra de suelo, ω_c , se obtiene sustituyendo en la ecuación particular 2.1.0 el valor de resistividad eléctrica, R_c , obtenido en campo.

2.2 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.

Las pruebas presentadas para la validación experimental, corresponden al estudio de dos suelos de la ciudad de Nogales, Sonora:

El suelo, S1, corresponde a una muestra obtenida de un poso a cielo abierto, el predio donde se realizó el sondeo, se encuentra ubicado por la Calle Hermosillo entre Calzada de los Doctores y Calle Cananea; a los costados del Arroyo las Chimeneas, el suelo



está constituido por depósitos de arenas mala graduadas, SP, dispuestas en estratos de 15 a 30 cm, de consistencia suelta a semi-compacta.

El suelo, S2, corresponde a una muestra obtenida para determinación del peso seco volumétrico máximo, suelo del lugar para relleno de plataforma con espesor de 12.00 m a 2.00 m, predio ubicado en Calle Industrial entre Av. Luis Donaldo Colosio y Calle Playa

Cochorit, el material de relleno, es del norte de la ciudad constituido por arenas bien graduadas, SW, con contenido representativo de gravas.

Las pruebas de validación para cada suelo, se realizó en las siguientes etapas:

1. Pruebas de laboratorio, de acuerdo la metodología planteada en el punto

2.1.1 del procedimiento de prueba de laboratorio, considerando los siguientes puntos, la primer prueba se determinó con la humedad natural de la muestra, agregando humedad y repitiendo el procedimiento de prueba hasta obtener cinco puntos para el suelo uno y seis para el suelo dos, mostrados en la tabla 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1: Puntos de prueba resistividad – humedad para suelo 1.

R (k Ω)	ω (%)
57.1	4.63
45.1	6.38
23.5	11.00
5.88	16.30
3.42	17.67

Tabla 2.2: Puntos de prueba resistividad – humedad para suelo 2.

R (k Ω)	ω (%)
163.00	3.31
106.00	4.80
86.40	5.92
55.60	8.25
41.30	9.76
20.00	12.50

2. Para cada uno de los suelos en estudio, se determinó la ecuación particular, con los puntos de resistividad humedad (45.10, 6.38), (5.85, 16.30) y



(106.14, 4.80), (40.30, 9.76) para el suelo uno y suelo dos respectivamente, de la forma de la ecuación 2.1.0.

$\omega (R) = e^{-0.0239 R + 2.931}$	 Ecuación particular para el suelo 1.
$\omega (R) = e^{-0.0108 R + 2.7127}$	 Ecuación particular para el suelo 2.

3. Los puntos experimentales de coordenadas resistividad - humedad, para ambos suelos en prueba, se graficaron considerando la variable independiente la resistividad (eje de las abscisas) y la variable dependiente la humedad (eje de las ordenadas)

La grafica de los puntos correspondientes al suelo uno, de acuerdo a los presentados en la tabla 2.1:

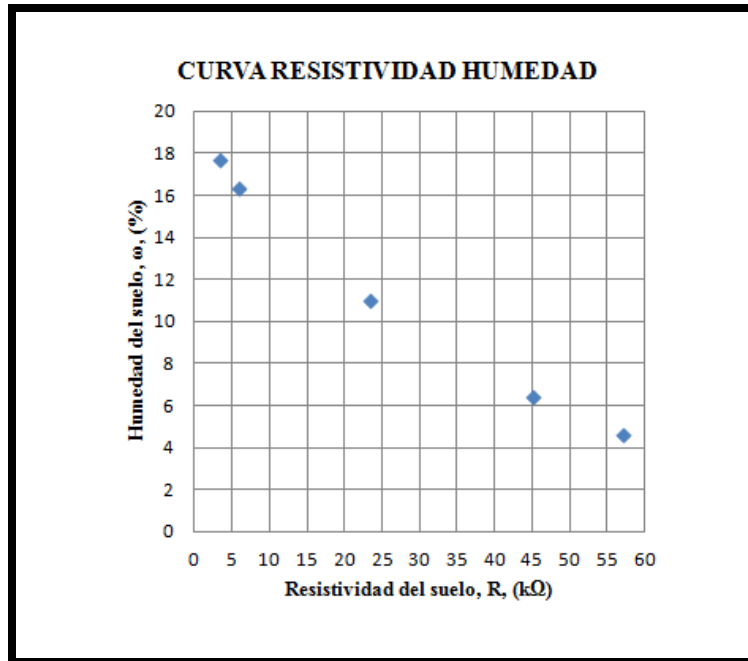


Figura 2.2: Gráfica de la relación resistividad - humedad para el suelo uno.

La grafica de los puntos correspondientes al suelo dos, de acuerdo a los presentados en la tabla 2.3:

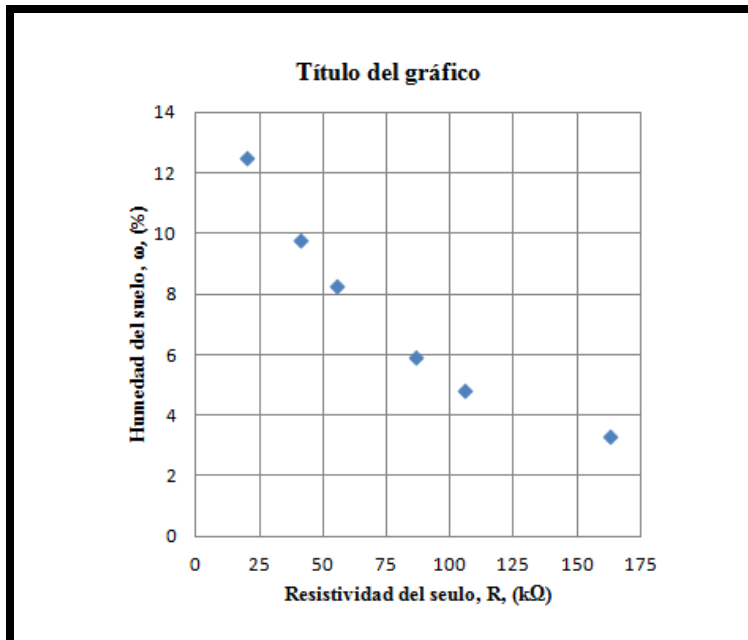


Figura 2.3: Gráfica de la relación resistividad humedad para el suelo dos.



2.2.1 Comparación de curva experimental y curva teórica.

La validación del modelo matemático establecido, se realiza a través del análisis comparativo para cada caso de estudio, de los resultados experimentales de laboratorio respecto al comportamiento teórico en base a las ecuaciones particulares establecidas para cada uno de los suelos.

Resultados del análisis comparativo para el suelo 1.

Tabla 2.3: Análisis comparativo del comportamiento experimental vs comportamiento teórico (suelo 1)

Resistividad (k Ω)	ω (%) Experimental	ω (%) Teórica.
57.1	4.63	4.79
45.1	6.38	6.38
23.5	11.00	10.69
5.88	16.30	16.30
3.42	17.60	17.29

Los datos de la primer columna, R (k Ω), corresponden a la medidas de resistividad eléctrica de la experimentación del suelo 1, la segunda columna, ω (%) experimental, corresponde a los contenidos de humedad en el suelo medidos en laboratorio y las datos de la columna número tres, ω (%) teórica, es el contenido de humedad calculado por medio del modelo matemático a partir de la ecuación particular del suelo 1.

Los resultados de mostrados en la gráfica de la figura 2.3, ilustran mediante la inspección visual el ajuste que casi perfecto de los puntos obtenidos por medio del procedimiento experimental de laboratorio de acuerdo a la metodología descrita en el punto 2.2 de este capítulo y la línea de los resultados de la ecuación particular para este suelo.

El análisis objetivo para determinar o medir la aproximación, es por medio del cálculo valor de correlación, R^2 , que para este caso de estudio se determinó en $R^2= 0.9991$, concluyendo que en este caso experimental del suelo probado en la relación a su comportamiento resistividad – humedad es muy aceptable.

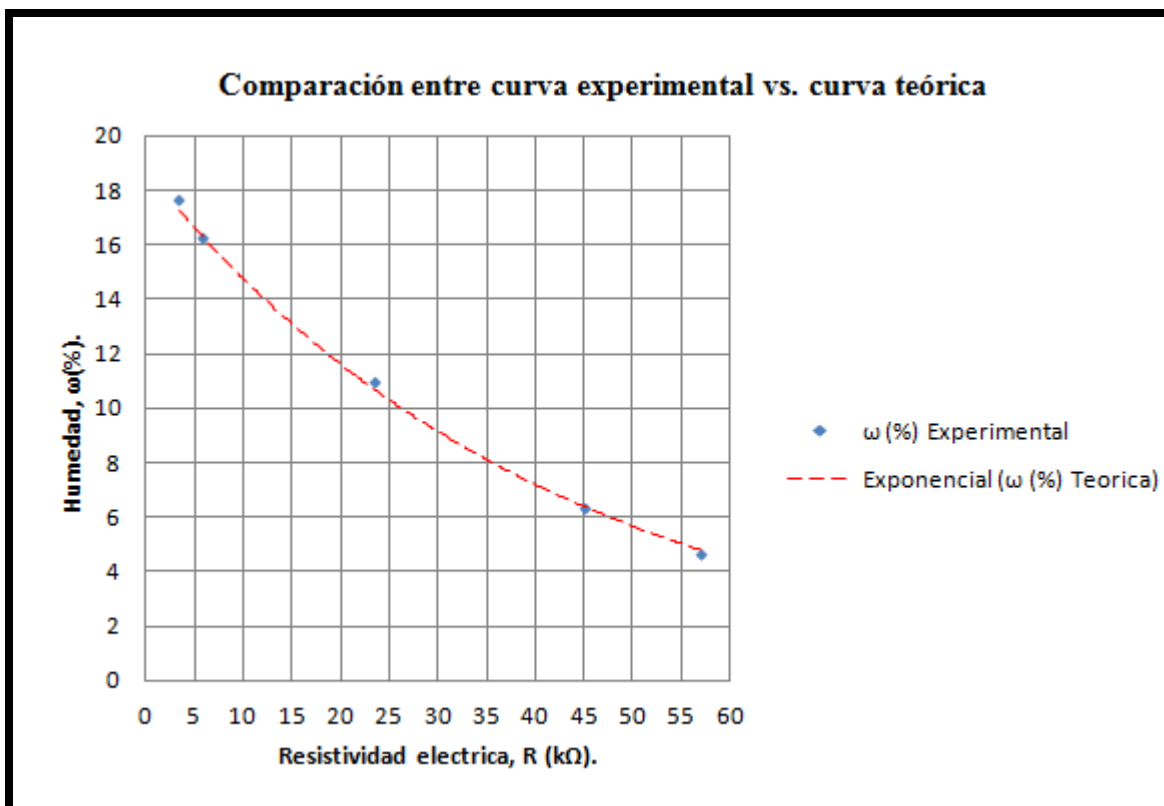


Figura 2.4: Gráfica comparativa entre la curva experimental vs. Curva teórica para suelo 1.

2.2.2 Resultado del análisis comparativo para el suelo 2.

Tabla 2.4: Análisis comparativo del comportamiento experimental vs. Comportamiento teórico (suelo 2)

R (kΩ)	ω (%) Experimental	ω (%) Teórica
163.00	3.31	2.59
106.00	4.80	4.80
86.40	5.92	5.93
55.60	8.25	8.27
41.30	9.76	9.66
20.00	12.50	12.15

Los datos de la primer columna, R (kΩ), corresponden a la medidas de resistividad eléctrica de la experimentación del suelo 2, la segunda columna, ω (%) experimental, corresponde a los contenidos de humedad en el suelo medidos en laboratorio y las datos de



la columna número tres, ω (%) teórica, es el contenido de humedad calculado por medio del modelo matemático a partir de la ecuación particular del suelo 2.

Los resultados de mostrados en la gráfica de la figura 2.4, ilustran mediante la inspección visual el ajuste que casi perfecto de los puntos obtenidos por medio del procedimiento experimental de laboratorio de acuerdo a la metodología descrita en el punto 2.2 de este capítulo y la línea de los resultados de la ecuación particular para este suelo.

El análisis objetivo para determinar o medir la aproximación, es por medio del cálculo valor de correlación, R^2 , que para este caso de estudio se determinó en $R^2 = 0.9801$, concluyendo que en este caso experimental del suelo probado en la relación a su comportamiento resistividad – humedad es muy aceptable.

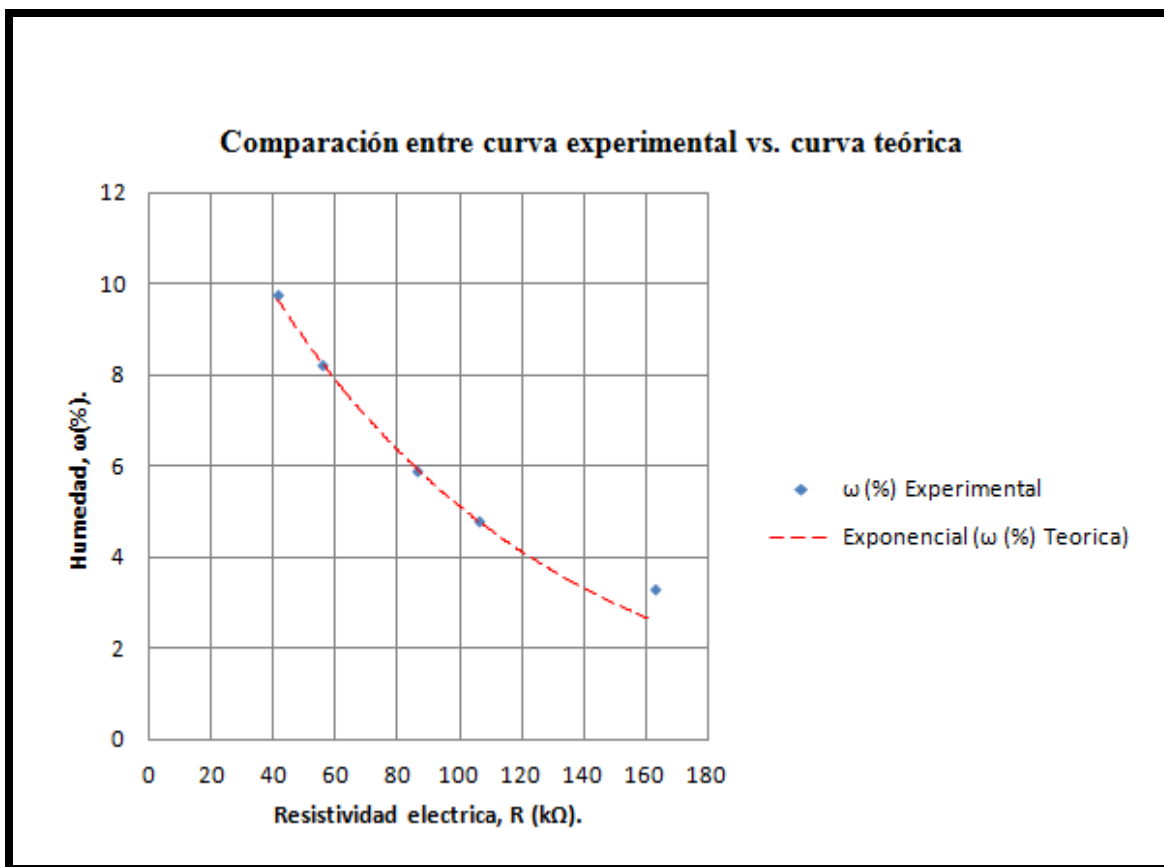


Figura 2.:5 Gráfica comparativa entre la curva experimental vs. Curva teórica para suelo 2.

2.2.3 Comparación entre las curvas teóricas de los suelos ensayados.

Ecuaciones particulares de los suelos, se denomina así a la expresión matemática obtenida de la ecuación de Irma Paz, ecuación 1.1.9, mediante la metodología de prueba descrita en el punto 2.1.1 procedimiento de prueba, del presente capítulo.

Cuervas teóricas, es la representación gráfica en el plano cartesiano, de los valores obtenidos de humedad en función de la resistividad eléctrica propuesta, considerando el eje de las abscisas para la resistividad eléctrica y el eje de las ordenadas la humedad respectiva.

El análisis comparativo de los suelos ensayados, se realizó con las gráficas obtenidas de las ecuaciones particulares de ambos suelos, descritas en punto 2.2 validación experimental. Los valores presentados en la tabla 2.5, son calculados por sustitución de las ecuaciones particulares de los suelos 1 y 2, para valores determinados de resistividad.

Tabla 2.5: Humedades teóricas en suelos de prueba para resistividades establecidas.

Resistividad electrica ($k\Omega$)	Humedad teorica, ω (%). Suelo 1	Humedad teorica, ω (%). Suelo 1
250	0.05	1.01
200	0.16	1.74
180	0.25	2.16
160	0.41	2.68
110	1.35	4.59
80	2.77	6.35
60	4.47	7.88
30	9.16	10.90
20	11.63	12.14

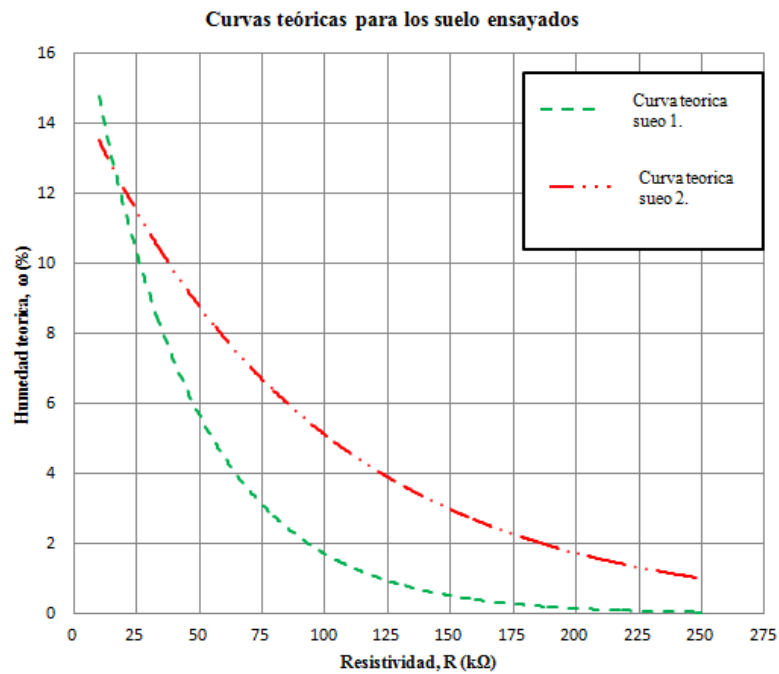


Figura 2.6: Gráfica teórica para suelos ensayados 1 y 2.



Capítulo 3: Caso Real de Utilización del Equipo KC-16 en Campo.

El equipo de prueba KC-16, por no ser una prueba estandarizada a la fecha, ha sido probado utilizado en trabajos de control de calidad de campo en compactaciones de otros métodos de pruebas convencionales.

El desarrollo del presente capítulo, es en referencia al trabajo de control de calidad en el relleno compactado, para la construcción de una plataforma de estacionamiento de la planta maquiladora AVEN, trabajo que se hace mención en el capítulo anterior.

El área de estudio, se encuentra ubicada en el centro geográfico de la mancha urbana de la ciudad de Nogales, Sonora, en la Calle Industrial esquina con Playa Cochorit, Colonia Obrera, el predio en estudio tiene las siguientes colindancias: al noreste con Calle Playa Cochorit, al sur oeste con resto del terreno de Planta AVEN, al noroeste con Calle Industrial y al sur este con límites de la colonia los Tápiros. El terraplén estaba constituido por un relleno suelto a medianamente compacto producto del proceso natural de consolidación y/o compactación obtenida mediante el bandeo producto del material para el acomodo por medio del tractor en el tiempo que se realizó, aproximadamente 8 años, la consistencia del suelo, se determinó mediante sondeos a base de posos a cielo abierto, el origen del material de relleno utilizado para esta terracería, es de producto de corte de obras construidas alrededor del predio.

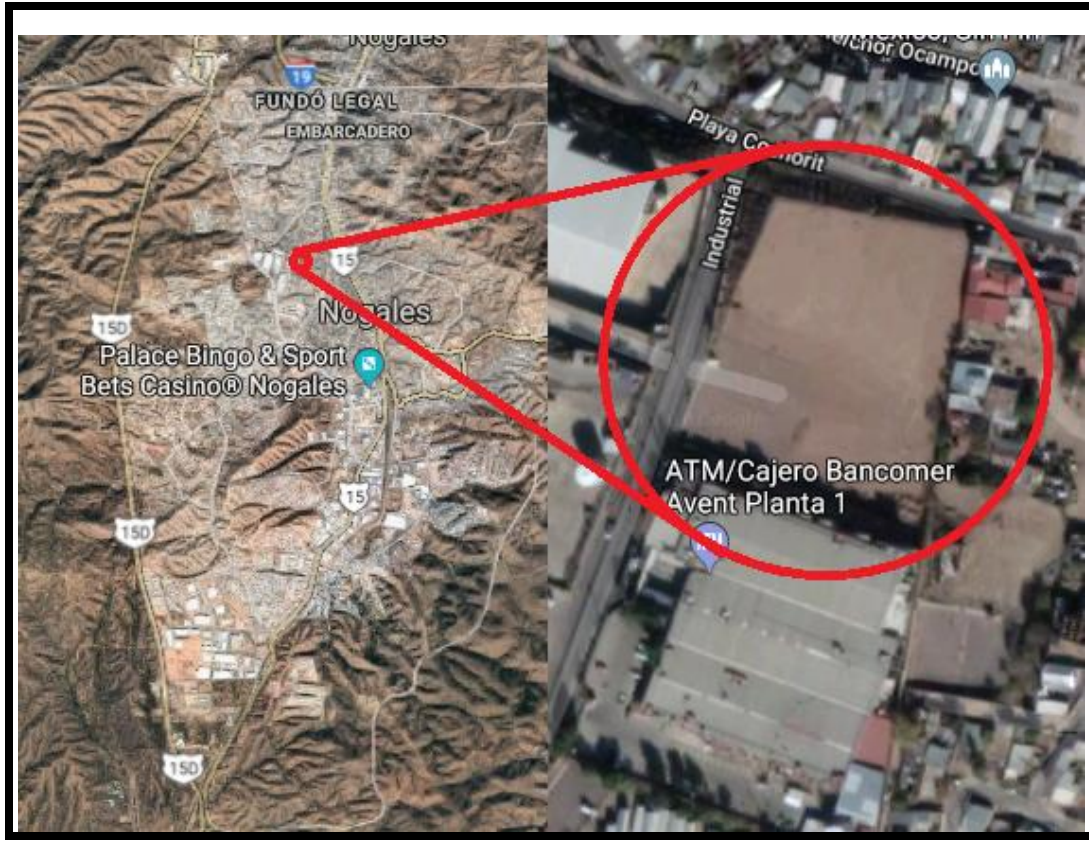


Figura 3.1: Localización del sitio de estudio. [Ref. 1]

3.1 DESCRIPCIONES DE TRABAJOS DE CAMPO.

Los trabajos posteriores a la etapa inicial de sondeo y dictamen del estado del relleno, se realizó en tres sondeos ubicados en el centro geométrico de las franjas paralelas de este a oeste como se muestra en la figura 3.2, muestras extraídas de la capa intermedia del tirante del relleno profundidades mostradas en la tabla 3.1, estas muestras obtenidas con la finalidad de caracterización del suelo.



Figura 3.2: Ubicación de los sondeos. [Ref. 1]



Tabla 3.1: Profundidad media del tirante

Identificación del Sondeo	Altura de la capa de relleno.	Ptofundidad de extracción de la muestra.
S1	12.20 m.	6.00 m.
S2	7.60 m.	3.60 m.
S3	8.20 m.	3.90 m.

3.2 TRABAJOS PRELIMINARES DE LABORATORIO.

Para las pruebas para caracterización del suelo de estudio, se realizaron la clasificación del suelo de acuerdo al sistema unificado de clasificación de suelos, SUCS y obtención del peso volumétrico seco máximo, γ_{dmax} , considerando la metodología establecida en los manuales de métodos y muestreos de pruebas M-MMP-1-02 y M-MMP-1-09 respectivamente.

3.2.1 Clasificación del suelo.

Los resultados de clasificación de los suelos para los sondeos S1, S2 Y S3, se muestran en las siguientes tablas y graficas:

Tabla 3.2: Datos granulometría muestra sondeo S1.

Malla No.	G R A V A S						A R E N A S						FINOS
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10	20	40	60	100	200	PASA 200
Día. (mm.)	50.8	38.1	25.4	19.05	9.52	4.76	2	0.84	0.42	0.25	0.149	0.074	-----
Ret. Parc. (gr)	0	0	20	41	72	128	200	281	206	97	67	51	37
Ret. Parc. (%)	0.00%	0.00%	167%	3.42%	6.00%	10.67%	16.67%	23.42%	17.17%	8.08%	5.58%	4.25%	3.08%
Ret. Ac. (%)	0.00%	0.00%	167%	5.08%	11.08%	21.75%	38.42%	61.83%	79.00%	87.08%	92.67%	96.92%	100.0%
% Pasa	100%	100%	98.33%	94.92%	88.92%	78.25%	61.58%	38.17%	21.00%	12.92%	7.33%	3.08%	

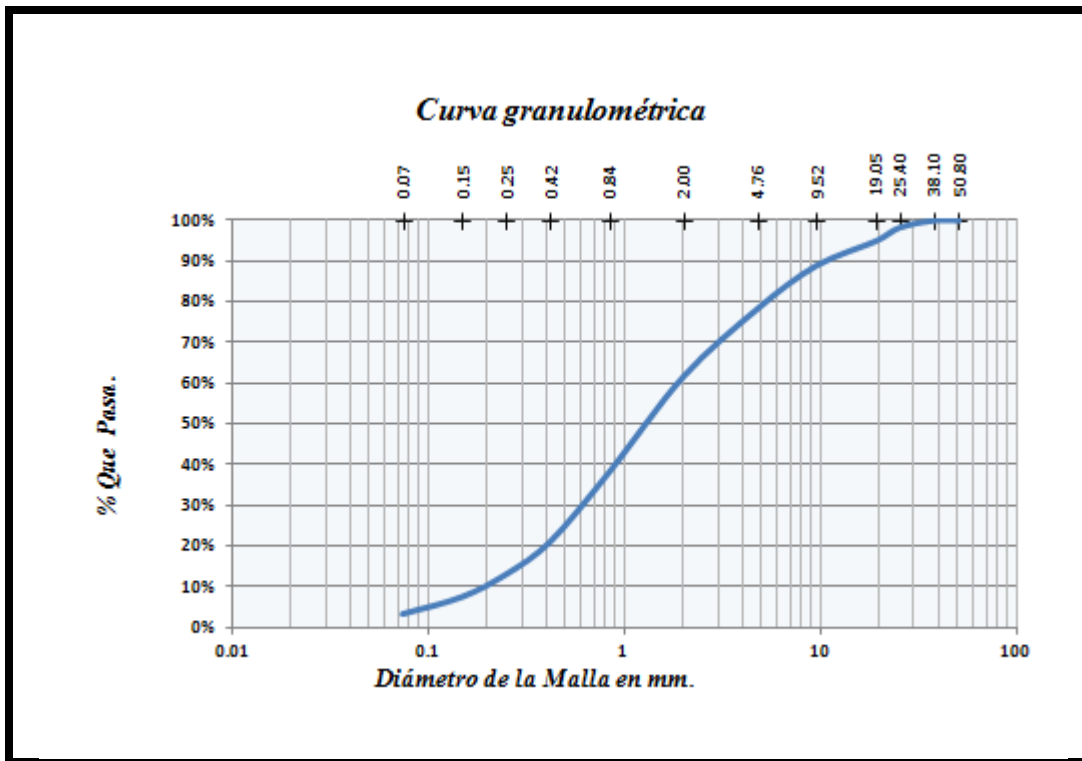


Figura 3.3: Gráfica de la curva granulométrica del sondeo S1.

Tabla 3.3: Datos granulometría muestra sondeo S2.

Malla No.	G R A V A S						A R E N A S						FINOS
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10	20	40	60	100	200	PASA 200
Día. (mm.)	50.8	38.1	25.4	19.05	9.52	4.76	2	0.84	0.42	0.25	0.149	0.074	-----
Ret. Parc. (gr)	0	0	20	41	72	128	200	281	206	97	67	51	37
Ret. Parc. (%)	0.00%	0.00%	167%	3.42%	6.00%	10.67%	16.67%	23.42%	17.17%	8.08%	5.58%	4.25%	3.08%
Ret. Ac. (%)	0.00%	0.00%	167%	5.08%	11.08%	21.75%	38.42%	61.83%	79.00%	87.08%	92.67%	96.92%	100.0%
% Pasa	100%	100%	98.33%	94.92%	88.92%	78.25%	61.58%	38.17%	21.00%	12.92%	7.33%	3.08%	

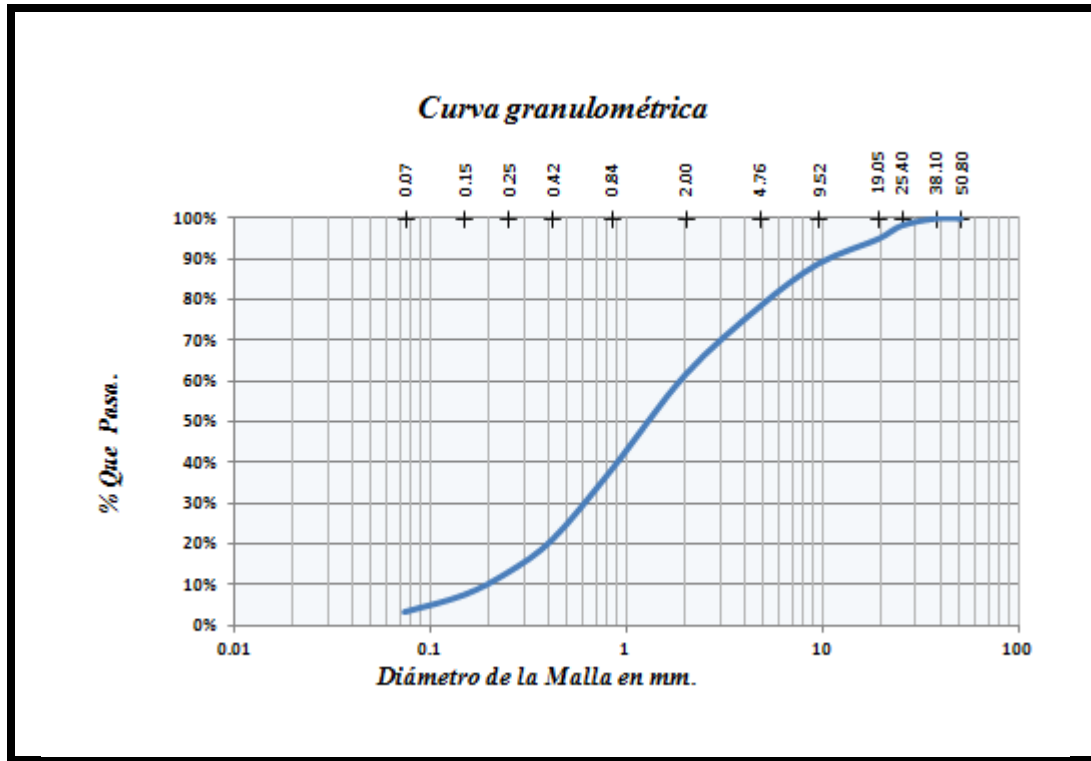


Figura 3.4: Gráfica de la curva granulométrica del sondeo S2.

Tabla 3.4: Datos granulometría muestra sondeo S3.

Malla No.	G R A V A S						A R E N A S						FINOS
	2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	4	10	20	40	60	100	200	PASA 200
Día. (mm.)	50.8	38.1	25.4	19.05	9.52	4.76	2	0.84	0.42	0.25	0.149	0.074	-----
Ret. Parc. (gr)	0	0	0	27	56	104	202	303	201	102	106	66	33
Ret. Parc. (%)	0.00%	0.00%	0.00%	2.25%	4.67%	8.67%	16.83%	25.25%	16.75%	8.50%	8.83%	5.50%	2.75%
Ret. Ac. (%)	0.00%	0.00%	0.00%	2.25%	6.92%	15.58%	32.42%	57.67%	74.42%	82.92%	91.75%	97.25%	100.0%
% Pasa	100%	100%	100.00%	97.75%	93.08%	84.42%	67.58%	42.33%	25.58%	17.08%	8.25%	2.75%	

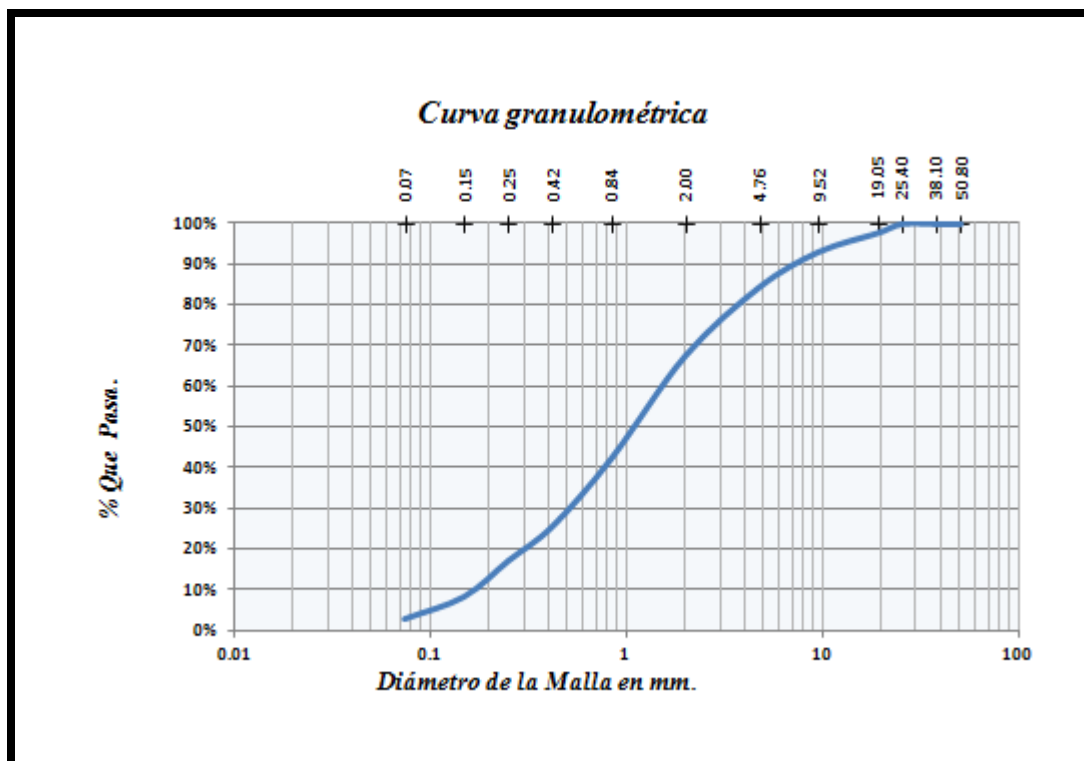


Figura 3.5: Gráfica de la curva granulométrica del sondeo S3.

De acuerdo al análisis visual de campo, y a los resultados obtenidos de las pruebas y curvas granulométricas obtenidas, se determinó que el total del relleno está constituido por material del mismo banco, solo existen pequeñas diferencias en la composición de gravas, arenas y finos de cada una de las muestras obtenidas en los sondeos, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3.5: Composición granulométrica de muestras de sondeos 1, 2 y 3.

Identificación de suelo	Contenido de gravas (%)	Contenido de arena (%)	Contenido de finos (%)	Cu	Cc	Clasificación SUCS
S1	22.21	74.68	3.11	9.50	1.11	SW
S2	20.60	76.81	2.59	8.95	1.01	SW
S3	15.58	81.67	2.75	8.82	1.06	SW

3.2.1 *Peso volumétrico máximo, γ_{dmax} .*

La determinación del peso volumétrico seco máximo, γ_{dmax} , se hizo mediante la prueba AASHTO, para la muestra de suelo extraída del sondeo S1, partiendo de la humedad natural de 2.30% hasta la humedad de 13.50%, el peso volumétrico seco máximo, γ_{dmax} y la humedad óptima, ω_o , se obtuvieron mediante la optimización de la ecuación de la curva de compactación obtenida por medio de regresión, esta ecuación que se ajustó a los puntos de humedad – Peso volumétrico seco, (ω, γ_d) , $\gamma_d(\omega) = -0.2386\omega^3 + 1.2202\omega^2 + 33.337\omega + 1751.40$, con un valor de correlación, R, aceptable ($R=0.9982$).

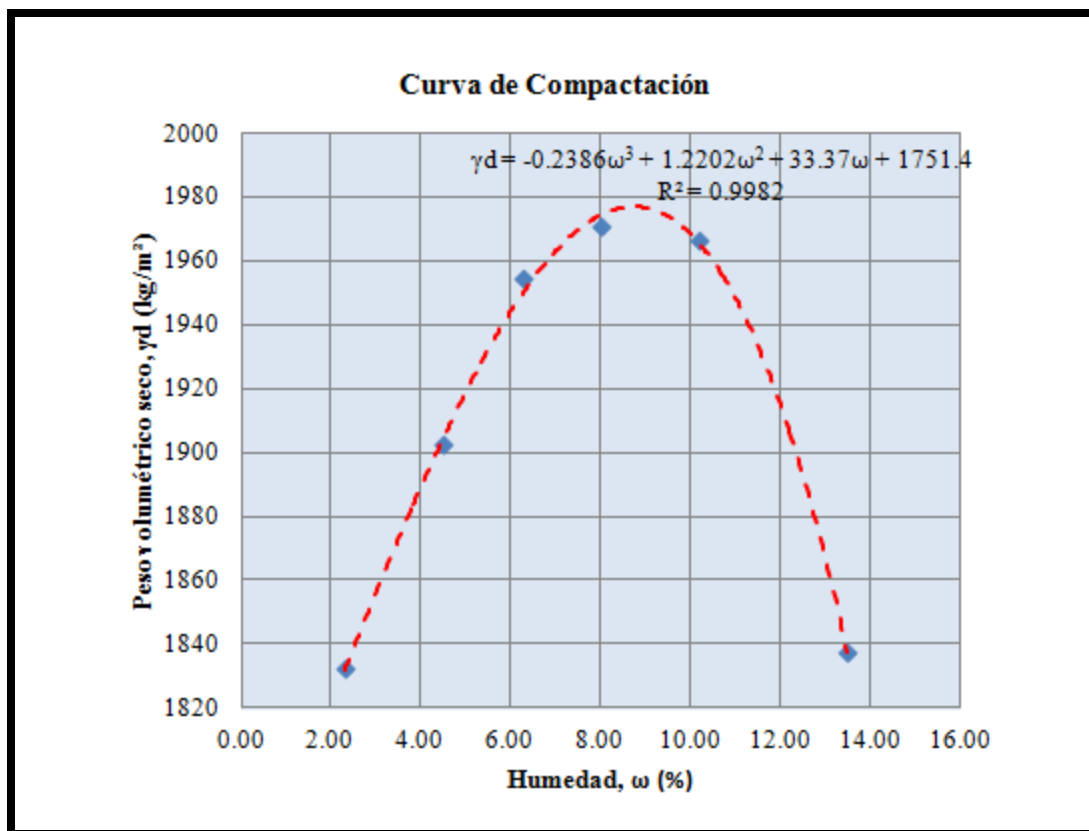


Figura 3.6: Curva de compactación del suelo en estudio



Tabla 3.6: Datos de la prueba de peso volumétrico seco máximo.

ENSAYE	P.V.H.	HUMEDAD	P.V.S.
1	1872.00	2.30	1832
2	1992.00	4.50	1902
3	2084.00	6.3	1955
4	2150.00	8.0	1971
5	2190.00	10.2	1967
6	2124.00	13.5	1837

El procedimiento de optimización para determinar el peso volumétrico seco máximo, γ_{dmax} , y la humedad óptima, ω_o , se realizó por medio de la derivada de la ecuación determinada por regresión de los puntos de coordenadas humedad – peso volumétrico seco:

$$\gamma_d = - 0.2386 \omega^3 + 1.2202 \omega^2 + 33.3700 \omega + 1751.4000$$

Ecuación de regresión 3.1

La derivada de la ecuación 3.1 se obtiene:

$$\frac{d\gamma_d}{d\omega} = - 0.7158 \omega^2 + 2.4404 \omega + 33.3700$$

Ecuación 3.2

Igualando a cero la ecuación 3.2, y despejando la humedad, ω , se obtienen los valores $\omega_1 = - 5.33\%$ y $\omega_2 = 8.74\%$, el valor de ω_2 es el valor que se considera, debido a que se encuentra dentro del dominio de los valores de humedad de un suelo mayores que cero; sustituyendo el valor de la humedad óptima en la ecuación 3.1, se determina el peso volumétrico seco máximo, γ_{dmax} , de 1976.33 kg/m^3 .



3.3 CÁLCULOS DE HUMEDAD DEL SUELO POR MEDIO DEL EQUIPO KC-16.

La humedad del suelo se realizó utilizando el método convencional establecido en el manual y métodos de muestreo de pruebas M-MMP-1-09 y comparándolos con el método descrito en el punto 2.1.3 Determinación de humedad en campo para pruebas de terracerías, descrito en el capítulo dos del presente caso de estudio, mediante el equipo de prueba KC-16, los resultados obtenidos en algunas muestras en el trabajo de control de calidad se muestran a continuación:

Tabla 3.7: Comparativo de humedad obtenida por el método tradicional y prueba con equipo KC-16, franja norte altura del relleno promedio 7.00 m.

Método conveccional (M-MMP-1-04)					Método equipo KC-16		Porcentaje de error respecto al método tradicional.
Muestra	Peso Muestra Humeda W _ω (gr)	Peso Muestra seca W _d (gr)	Peso del agua (gr)	% Humedad (ω)	$\omega(R) = e^{-0.0108 R + 2.7127}$		
					Resistividad	Humedad	
Muestras del 31 de marzo de 2017, capa 1 franja norte:							
C1	150	139	11	7.91%	60.75	7.82%	1.19%
C2	154	143	11	7.69%	62.01	7.71%	0.28%
Muestras del 01 de ABRIL de 2017, capa 2 franja norte:							
C3	175	161	14	8.70%	50.11	8.77%	0.87%
C4	180	165	15	9.09%	47.15	9.06%	0.38%
Muestras del 01 de ABRIL de 2017, capa 3 franja norte:							
C5	200	184	16	8.70%	50.2	8.76%	0.77%
C6	206	189	17	8.99%	46.85	9.09%	1.01%
Muestras del 01 de ABRIL de 2017, capa 4 franja norte:							
C7	197	182	15	8.24%	55.07	8.31%	0.88%
C8	202	186	16	8.60%	53.07	8.50%	1.24%
Muestras del 03 de ABRIL de 2017, capa 5 franja norte:							
C9	183	169	14	8.28%	55.12	8.31%	0.31%
C10	194	178	16	8.99%	51.48	8.64%	3.85%
Muestras del 03 de ABRIL de 2017, capa 6 franja norte:							
C11	215	197	18	9.14%	46.03	9.17%	0.32%
C12	223	204	19	9.31%	45.02	9.27%	0.50%
Muestras del 03 de ABRIL de 2017, capa 7 franja norte:							
C13	211	194	17	8.76%	48.51	8.92%	1.84%
C14	203	187	16	8.56%	50.24	8.76%	2.37%
Muestras del 03 de ABRIL de 2017, capa 8 franja norte:							
C16	211	194	17	8.76%	48.51	8.92%	1.84%
C17	203	187	16	8.56%	50.24	8.76%	2.37%



El porcentaje de humedad promedio por el método tradicional, es de 8.13%, por el método de resistividad a través del equipo de prueba KC-16 es de 8.16% y el peso volumétrico húmedo en las pruebas de compactación fue de 2048 kg/m^3 , el comparativo de los pesos volumétricos secos para los métodos de determinación de la humedad es de 1881.50 kg/m^3 y 1880.88 kg/m^3 , se observa una variación de 0.032% en el cálculo del peso volumétrico seco; comparando el grado de compactación 95.20% para la humedad por método tradicional y de 95.17% para la humedad obtenida por el método de la resistividad dando una variación porcentual respecto a la del método tradicional de 0.0315%, estos rangos de variación son muy pequeños respecto a la exactitud que se utiliza en campo.

Capítulo 4: Conclusiones

4.1 PUNTOS IMPORTANTES EN LA INTERPRETACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.

En el desarrollo del modelo matemático de la ecuación general para determinar la humedad de los suelos a través de pruebas de resistividad, ecuación 1.1.9 denominada ecuación de Irma Paz, mediante la cual se obtiene la ecuación particular de un suelo es necesario determinar la constante de proporcionalidad, K, y la constante de integración C misma que se definen como:

K constante de proporcionalidad que depende la formación y origen del suelo u su coposición mineralógica.

C la constante de integración, es la resistividad del suelo en estado de saturación, de acuerdo al análisis matemático mostrado en la tabla 1.3

4.2 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.

En base a la experiencia, en la utilización del prototipo de prueba KC-16, para obtener la ecuación particular de un suelo, se recomienda que los valores de las humedades para los puntos uno y dos sean del rango $4\% < \omega_1 < 7\%$ y $9\% < \omega_2 < 12\%$.



Considerando que la variación de concentración de sales en el agua ocasionan cambios en las lecturas de resistividad, es importante que el agua con las que se realicen las pruebas de calibración del modelo matemático para un trapajo en particular, se utilice la misma agua que será empleada en los procesos de compactación en campo.

En pruebas experimentales realizadas en suelos para el proceso de determinar la ecuación particular, se observan pequeñas diferencias en la resistividad en los suelos que durante el proceso de prueba mediante la incorporación de humedad respecto al mismo suelo que se le extrae la humedad por un proceso de secado, la curva resistividad – humedad típica para se mueve ligeramente hacia arriba en el caso de proceso de secado debido que la humedad que envuelve a la partícula es la primera que pierde y esto opone mayor resistencia al flujo eléctrico. El proceso de campo empleado para la compactación de suelos es por lo regular mediante la incorporación de agua en material tendido, razón por la cual se recomienda que las pruebas de laboratorio para calibración del modelo de matemático se hagan por incorporación de humedad no por secado.

En los análisis experimentales para suelos, los que son uniformes o mal graduados se observa que oponen menos resistencia dentro de los rangos de humedad a los que se han probado, debido a que en estos suelo las partículas son del mismo diámetro, existe mayor uniformidad en el diámetro que ocupan los vacíos, permitiendo una mejor distribución de la humedad y por lo mismo una menor oposición al flujo eléctrico.

En base al punto expuesto en el párrafo anterior, se puede determinar mediante comparaciones de curvas granulométricas y corvas de resistividad – humedad, la uniformidad de las partículas de suelo y establecer un criterio para clasificarlos como bien o mal graduados a partir de estas gráficas.

4.3 ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO.

El método para determinar humedades expuesto, a pesar de ser un método que a mostrado efectividad en los trabajos en los que se ha utilizado, a la fecha no es un método normalizado por alguna dependencia u organismo de certificación y/o acreditación, se recomienda ser utilizado a la par de cualquier otro método convencional.



Casos experimentales en el campo laboral, el equipo de prueba KC-16 y la metodología de prueba en laboratorio y campo, respecto a métodos tradicionales, el porcentaje de humedad de los suelos a presentado variaciones máximas del orden del 2.50% como máximo, esta variación de la humedad, no ocasiona variaciones importantes en el peso volumétrico seco máximo y el grado de compactación del suelo debido a que no superan el 0.10% en el promedio de las pruebas realizadas.



Bibliografía

[Crespo V. C., 1991 Mecánica de Suelos y Cimentaciones, Lumusa].

[Dennis G. Zill y Warren S, Wright, 2015 Ecuaciones Diferenciales con problemas con valores a la frontera, 8^{va}. Edición CENGAGE Learning]

[Instituto Mexicano del transporte, Método de Muestreo y Pruebas de Materiales, (M-MMP-1-02/03), Parte 1: Suelos y Materiales para Terracerías, Título: 02 Clasificación de Fragmentos de Roca y Suelos]

[Instituto Mexicano del transporte, Método de Muestreo y Pruebas de Materiales, (M-MMP-1-09/06), Parte 1: Suelos y Materiales para Terracerías, Título: 09 Compactación AASHTO]

[Instituto Mexicano del transporte, Método de Muestreo y Pruebas de Materiales, (M-MMP-1-04/03), Parte 1: Suelos y Materiales para Terracerías, Título: 04 Contenido de Agua]

[Juárez B. E. y Rico R. A., 1985 Mecánica de Suelos Tomo I, 10^a edición, Limusa]

[Lambe W. y Whitman R. 2004 Mecánica de Suelos, Limusa]

[Purcell, E. J. y Varberg D. 1990 Calculo Diferencial e Integral, 4^{ta} edición Prentice Hall]

[Rico R. A. y Del Castillo H., La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres Tomo I, 4^{ta} edición Limusa]

Referencias digitales:

[Fuente 1, Imágenes © DigitalGlobe. Datos del mapa © Google INEGI]



Currículum Vitae

Preparación académica.

Preescolar en el jardín de Niños Teresa de Tourniel, en el periodo de 1975 a 1978

Estudios de educación primaria, en la escuela Héroe de Nacozari, en el periodo comprendido de 1978 a 1984.

Estudios de educación secundaria, en la escuela Secundaria Federal No. 1 Plutarco Elías Calles, en el periodo de 1984 a 1987.

Estudios de educación preparatoria, en el Centro de Estudios Técnicos Industriales y de Servicio 128, carrera Técnico en Construcción, en el periodo de 1987 a 1990.

Estudios profesionales Instituto Tecnológico de Nogales, especialidad Ingeniería Civil durante el periodo de 1990 a 1994.

Estudios de Maestría en Ingeniería especialidad en Vías Terrestres, Facultad de Ingeniería Universidad Autónoma de Chihuahua, en el periodo de 1997 a 1999.

Experiencia laboral.

1992-1997 Construcciones y Servicios de Nogales.

1999-2004 TEARBE S. A. de C. V. (empresa constructora)

2004-2018 RBO LABORATORIOS S. de R. L. de C. V. desarrollando el puesto de Director Técnico.

Experiencia docente:

2003-2005 Profesor de Matemáticas en el Cetis 128.

2004 – actual Maestro del Instituto Tecnológico de Nogales, asignado al área de Ciencias Básicas.

Domicilio Permanente: Calle Santa Laura 5-A, Colonia San Carlos
Nogales, Sonora, C.P. 84090

Este caso de estudio fue mecanografiado por Karla Clavero Vázquez.