

# **VALIDACIÓN DEL MÉTODO PARA MEDICIÓN DE DENSIDADES DE MATERIALES COMPACTADOS MEDIANTE EL USO DEL DENSÍMETRO ELÉCTRICO**



Proyecto Final de Graduación  
para optar por el grado de  
Licenciatura en Ingeniería en Construcción

# Abstract

The measurement of densities and moisture content field is a slow and laborious process, and sometimes there is not given the importance that deserves. This is a reality in which projects of general interest are develop, as building of roads or fillers where buildings of great importance will be the foundations, where quality control is carried inefficiently benefit the archaic and dangerous of current methods for measuring these parameters. This project was make out to validate the measurement of densities and moisture in field with the use of an electrical densimeter (EDG) using as benchmark the test of cone of sand (ASTM D 1556).

To carry out with this goal 5 soils were characterized by the same amount of material of sources extraction. Beginning from the test were obtained data about particle size (ASTM C 136 and C 117), Atterberg limits (ASTM D 4318), soil classification (ASTM D 2487), and compaction using modified effort (ASTM D 1557). This to determine parameters required by the EDG.

A procedure was create for compacting the materials simulating the conditions of field, as well as the mold and the mallet to be able to carry out the test. Beginnings from this there were created the models of soils who allowed that the EDG should do the measurements in field. This procedure was used to generate the field measurements, due to the shortage of projects where the materials used for the investigation were used.

The results were compared by means of two statistical methods; the first one it is the established one for the ASSHTO Materials Reference Laboratory (AMRL), and the second one is an analysis of average by means of a paried test, obtaining that the test of the EDG is not so exact respect with the standard.

Key words: density, moisture content, compactation, electrical densimeter.

# Resumen

La medición de densidades y contenido de humedad en campo es un proceso lento y laborioso, y en ocasiones no se le da la importancia que merece. Esta es una realidad en la cual se desarrollan proyectos de interés general, como la construcción de caminos o rellenos donde se cimentarán obras de gran importancia, donde el control de calidad es llevado ineficientemente merced a lo arcaico o peligrosos de los métodos actuales para medir estos parámetros. Este proyecto se ejecutó con el fin de validar la medición de densidades y humedades en el campo con el uso de un densímetro eléctrico (EDG) usando como parámetro de comparación la prueba de cono de arena (ASTM D 1556).

Para cumplir con esta meta se caracterizaron 5 suelos de la misma cantidad de fuentes de extracción de materiales. A partir de las pruebas se obtuvieron datos sobre granulometría, (ASTM C 136 y C 117), límites de Atterberg (ASTM D 4318), clasificación de suelos (ASTM D 2487) y compactación usando esfuerzo modificado (ASTM D 1557). Esto para determinar parámetros requeridos por el EDG.

Se creó un procedimiento para compactar los materiales simulando las condiciones de campo, así como el molde y el mazo para poder llevar a cabo la prueba. A partir de esto se crearon los modelos de suelo que permitieron que el EDG pudiera realizar mediciones en campo. Se usó este procedimiento para generar las mediciones de campo, debido a la escasez de proyecto donde se usaran los materiales utilizados para la investigación.

Los resultados se compararon mediante dos métodos estadísticos: el primero es el establecido por el ASSHTO Materials Reference Laboratory (AMRL), y el segundo es un análisis de medias por medio de una prueba pareada, obteniéndose que la prueba del EDG no es tan precisa respecto al patrón usado.

Palabras clave: densidad, contenido de humedad, compactación, densímetro eléctrico.

# **VALIDACIÓN DEL MÉTODO PARA MEDICIÓN DE DENSIDADES DE MATERIALES COMPACTADOS MEDIANTE EL USO DEL DENSÍMETRO ELÉCTRICO**

DAVID SEGURA CALDERÓN

Enero del 2010

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA  
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

# Contenido

PREFACIO .....	1
RESUMEN EJECUTIVO .....	2
INTRODUCCIÓN .....	7
MARCO TEÓRICO .....	9
METODOLOGÍA .....	22
RESULTADOS .....	38
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	55
LIMITACIONES.....	66
CONCLUSIONES .....	67
REFERENCIAS.....	70
APÉNDICES .....	72
ANEXOS .....	72

# Prefacio

En un mundo donde el tiempo es un factor importante para el avance de la sociedad, así como la calidad de los servicios y productos que se ofrecen; es importante estar a la vanguardia de los avances tecnológicos que permiten mantener éstos estándares. El Instituto Tecnológico de Costa Rica tiene un rol de pionero en investigación y aplicación de la tecnología en las diferentes ramas de la ingeniería. Es por esta razón que el laboratorio de suelos de la Escuela de Ingeniería en Construcción (CECO), con el fin de agilizar las labores de medición de densidad en el campo adquirió en tiempo reciente un densímetro eléctrico (EDG), con el fin de reemplazar la prueba de cono de arena en sitio, pues ésta requiere de mucho tiempo para su realización, lo cual trae inconvenientes para el cliente que hace uso de los servicios del laboratorio y para el laboratorio mismo, pues debe invertir mucho tiempo y recursos realizando éstas pruebas.

La exactitud (teóricamente) del densímetro eléctrico es similar a la del densímetro nuclear (sin los riesgos que la radiación conlleva), claramente superior a la del cono de arena; mas el equipo necesita una base de datos que represente de la manera más fiel las características de los suelos que se espera encontrar en el campo.

Una ventaja adicional del sistema que se desea instalar es que no requiere de permisos especiales para su uso, pues su funcionamiento no perjudica o pone en peligro al personal que lo utiliza, tal como es el caso del densímetro nuclear.

Para su funcionamiento, este equipo requiere que se genere una base de datos de suelos que caractericen las condiciones de campo esperadas en los materiales, esto para que en el momento de realizar las mediciones se pueda ligar uno de estos modelos a las condiciones presentes, donde el aparato genera

la información necesaria de las capas del suelo compactado mediante resistividad eléctrica por correlación a la base de datos de los diferentes tipos de suelo.

El equipo puede usarse en cualquier tipo de suelo; pero por las condiciones de mercado se espera que este método se use básicamente en proyectos carreteros o rellenos de gran tamaño.

Con este método se controlará rápidamente el cumplimiento de las especificaciones establecidas en los carteles de licitación de los proyectos en los que se use. Cuando el cliente contrata un ensayo de este tipo busca obtener un resultado que le permita inmediatamente tomar decisiones en el sitio, de tal forma que el error en la compactación de un material, si es que existe, no se presente en las actividades posteriores, lo cual es algo que la aplicación del densímetro eléctrico puede llegar a solventar.

El EDG (Electrical Density Gauge) actualmente no tiene una norma que defina el procedimiento para realizar la prueba adecuadamente, por lo que el fin de éste proyecto fue la de validar el método de medición de humedades y densidades en campo usando como patrón de comparación la prueba de cono de arena.

Finalmente deseo expresar mi profunda gratitud a toda persona o empresa involucrada con este proyecto, que bien con una palabra de aliento, con una cuota de esfuerzo, con ayuda material, o bien con un aporte de conocimiento, brindaron su colaboración en esta investigación. Nombrar a algunos sería injusto, porque todos los que participaron de este proyecto se convirtieron en los pilares del mismo. Doy gracias a Dios por poner tantos ángeles de luz que soportaron y ayudaron a sacar adelante este proyecto. Gracias a todos.

**David Segura Calderón**

# Resumen ejecutivo

En ingeniería comúnmente es necesario crear estratos de suelos artificiales, por muchos motivos; tales como la reducción de esfuerzos que deben soportar los estratos naturales de suelo, mejorar la capacidad de drenaje de una zona, o para crear una superficie apta para la construcción de una obra. Pero sin importar la obra o motivo de colocar o reemplazar suelos o mezclas de agregados en un lugar determinado, es necesario controlar los parámetros de humedad y grado de compactación logrados con el material para asegurar la calidad del proceso de compactación, la durabilidad del proyecto, y así evitar problemas de asentamientos, por ejemplo.

Actualmente existen muchos métodos para la medición de humedad y grado de compactación en campo, cada método con sus ventajas y problemas asociados. Entre estos métodos destacan el cono de arena, balón o globo de hule, y densímetro nuclear. Cada uno de estos procedimientos posee una norma en la cual se estipulan los pasos y lineamientos a seguir para obtener una medición correcta, y que a la vez permite que la prueba sea reproducible en cualquier proyecto que se desee analizar.

El Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) adquirió recientemente un densímetro eléctrico (EDG) para la medición de humedades y grado de compactación en campo. El equipo tiene el inconveniente de que no posee una norma que establezca los procedimientos y estipulen los pasos a seguir durante la realización de la prueba para obtener buenos resultados. Es por esta razón que el presente proyecto pretendió validar la prueba con el EDG, comparándola con una prueba normada respetada a nivel internacional, como lo es el cono de arena. Con esto se esperó determinar la verdadera exactitud de las mediciones del EDG respecto al método normado del cono de arena, para determinar si los datos que se obtienen de la prueba son confiables y de esta manera poder usar el equipo

adquirido en investigaciones realizadas por este centro.

## Objetivo general

- Validar el ensayo de compactación in situ utilizando el densímetro eléctrico (método no normalizado) del Laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) mediante métodos de comparación de resultados con el método del cono de arena (ASTM D-1556)

## Objetivos específicos

- Investigar sobre el funcionamiento y exámenes previos realizados a suelos con el equipo de densímetro eléctrico, para definir los suelos más convenientes para desarrollar el proyecto según los tipos de suelo presentes en Costa Rica.
- Identificar los sitios donde se extraen materiales usados para compactación (en proyectos carreteros o de relleno) y realizar el muestreo de dichos materiales en cada uno de ellos (ASTM D-75)
- Realizar los ensayos para la clasificación de los materiales muestreados con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM D-2487)
- Obtener la densidad seca máxima y la humedad óptima en el laboratorio para cada uno de los materiales clasificados mediante la prueba de Próctor Modificado (ASTM D-1557)
- Desarrollar un método que permita simular las condiciones de campo, a fin de aplicar la prueba del cono de arena y la del densímetro eléctrico para obtener la información física necesaria (densidad húmeda y humedad en sitio), para crear un modelo para cada tipo de suelo.

- Crear los modelos de suelo con base en los resultados de ensayo.
- Comparar, mediante chequeos de compactación en campo o un método que permita simular las condiciones de campo en el laboratorio, los resultados del método de cono de arena y del densímetro eléctrico
- Realizar un estudio estadístico de los resultados obtenidos de las pruebas efectuadas con el cono de arena y el densímetro eléctrico, a fin de determinar la variación de los datos en cada método y así determinar cuál presenta una menor dispersión entre sus resultados.
- Validar el método del densímetro eléctrico a fin de que el laboratorio de suelos del CIVCO pueda aplicar dicho servicio para fines de investigación y extensión.

## Alcances y limitaciones

El proyecto tuvo la peculiaridad de tener que realizar investigación en diversos campos con el fin de lograr los objetivos planteados inicialmente, pues el conocimiento acerca del funcionamiento del equipo era reducido.

El primer paso fue contactar a la empresa fabricante del EDG (la compañía Humboldt) y recopilar la información acerca de experiencias previas con el uso del equipo y características de su funcionamiento. Los materiales usados debían cumplir con tres características; la primera es que las fuentes de material fuesen accesibles para muestrear y obtener la cantidad de material necesario para realizar las pruebas necesarias (aproximadamente 1 m<sup>3</sup>); la segunda es que los materiales no fueran provenientes de una misma fuente, para tener variedad de suelos y una mayor posibilidad de realizar pruebas de campo y probar el funcionamiento del EDG. La tercera razón fue usar los tajos con mayor frecuencia y disposición de materiales.

Además se dieron una serie de consejos para iniciar la investigación, específicamente se recomendó la construcción de un molde y un mazo necesarios para compactar los materiales y generar los modelos de suelo.

Se contactaron 5 empresas que extraen materiales para compactar y se muestreó un suelo o mezcla de agregado de cada una. Las fuentes de materiales se nombraron

alfabéticamente conforme se muestrearon, con el fin de respetar la confidencialidad de las empresas.

Para la construcción de los modelos de suelo fue necesario realizar una serie de pruebas para completar la información requerida de cada suelo, para posteriormente poder hacer pruebas de campo.

Específicamente a todos los suelos se les realizó pruebas de granulometría (ASTM D 422), determinación de los límites de Atterberg (ASTM D 4318), clasificación usando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), siguiendo el procedimiento de la norma ASTM D 2487, donde se obtuvieron los resultados mostrados en el siguiente cuadro:

Tajo	Descripción	Símbolo
A	Grava mal graduada contaminada con limos	GM
B	Grava mal graduada contaminada con limos	GP-GM
C	Grava bien graduada contaminada con limos	GW-GM
D	Grava mal graduada contaminada con limos	GM
E	Grava bien graduada limpia	GW

De igual forma a cada material se le determinó la densidad seca máxima y la humedad óptima mediante la prueba de proctor modificado (ASTM D 1557), tal como se muestra en el CUADRO B.

Tajo	$\rho_{SMAX}(kg/m^3)$	% W <sub>OPT</sub>
A	1900	18.2
B	2052	10.5
C	1625	21.1
D	1955	12.3
E	2035	11.5

Los datos mostrados en los cuadros anteriores son requeridos por el EDG para completar los modelos de suelo y poder realizar las mediciones en campo.

Un modelo de suelo (SOIL MODEL) es la construcción de una serie de datos requeridos por el EDG para que con esa información el equipo

pueda realizar las mediciones en los proyectos en los cuales se use el mismo material con el que se creó el modelo de suelo.

Para este fin fue necesario crear un molde para compactar los materiales y simular condiciones de campo. Se analizaron diferentes opciones para la escogencia del mismo (molde de madera, concreto y plástico). Finalmente se decantó por un molde de Rib-lock de 16 pulgadas (40.64 cm) de diámetro, cortado en tramos de 25 cm para garantizar una altura razonable a la hora de clavar los dardos en el suelo. El diámetro mínimo del molde a usar es de 15 pulgadas (38,1 cm) para garantizar la separación mínima de los dardos.

Para cada modelo de suelo se compactaron como mínimo de 5 moldes variando el contenido de humedad e inicialmente en cinco capas, pero la experiencia en el proceso mostró que los resultados mejoraban si se compactaban en tres capas (Recomendación del personal del MOPT que posee un equipo similar). No obstante el equipo necesita 3 como mínimo y 16 como máximo para maximizar un factor de ajuste interno de las mediciones (FIT), el cual debe ser mayor a 0.7 (recomendablemente). En los moldes con el suelo compactado se hizo la prueba con el EDG y posteriormente, justo en el centro de ésta, se hizo la del cono de arena. Las mediciones del EDG necesitan de los resultados del cono de arena en el punto respectivo para completar la información del modelo. Una vez ingresados estos datos en el EDG se pueden hacer mediciones en campo.

Por escasez de proyectos activos en los cuales se utilizaran los materiales muestreados en la investigación durante el periodo en que ésta se desarrolló, se usó el mismo procedimiento para crear los modelos de suelos que para crear los sitios de trabajo (JOB SITE). En los puntos compactados se trató de mantener los parámetros de compactación y humedad de los diferentes moldes en un rango de variación muy pequeño, para simular las condiciones de campo, con la salvedad de que se hicieron con controles de laboratorio.

De igual forma que en los modelos de suelo se hizo la prueba con el EDG, en el centro del área que abarco la base para los dardos del EDG se hizo el cono de arena. En este momento fue posible comparar los resultados de las dos mediciones. Para cada suelo se realizaron las pruebas teniendo el problema que en el TAJO A

hubo una variación en la granulometría del material, pues al muestrear por segunda ocasión el material varió.

Los resultados de las pruebas fueron evaluados por el método de la AASHTO MATERIALS REFERENCE LABORATORY (AMRL), el cual permite determinar el grado de confiabilidad de los datos del EDG usando como patrón de medición el cono de arena. Se obtuvieron los siguientes resultados:

CUADRO C: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE EDG Y CONO DE ARENA				
Tajo	Z (%w)	Punt (%w)	Z(ps)	Punt (ps)
A	22,71	0,00	5,64	0,00
B	1,56	3,00	0,14	5,00
C	8,25	0,00	14,20	0,00
D	9,56	0,00	1,90	3,00
E2	5,86	0,00	0,16	5,00
E1	4,03	0,00	12,44	0,00

También se hizo un análisis del comportamiento de la media de los datos a través de una prueba de varianza pareada

CUADRO D: PROBABILIDAD DE QUE LA MEDIA DE COMPACTACIÓN Y HUMEDAD SEAN IGUALES ENTRE LAS PRUEBAS		
Tajo	P (%w)	P (% Comp.)
A	0,005	0,001
B	0,066	0,730
C	0,000	0,000
D	0,000	0,019
E-2	0,000	0,573
E-1	0,000	0,000

Donde:

P(%w): probabilidad de que las medias de los porcentajes de humedad obtenidas con cada método sean iguales

P(%Comp): probabilidad de que las medias de los grados de compactación obtenidas con cada método sean iguales

Z: Valor estadístico para la determinación de las calificaciones.

Punt.: puntuación asignada por el método estadístico.



Del análisis de los resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Para la investigación se logró caracterizar y evaluar el desempeño de 5 materiales utilizados para procesos de compactación en construcción general, utilizando diversas pruebas de laboratorio que permitieron determinar la información base para el resto de la investigación.
- El molde más efectivo fue el cilíndrico, ya que hubo una distribución más eficiente de los golpes y, por ende, de los esfuerzos, similar a la prueba proctor modificado, y permitió aprovechar mejor el material disponible.
- Se logró desarrollar un procedimiento para la elaboración de modelos de suelo, que consistió en cinco pasos:
  1. Cálculo del peso del suelo a compactar y la cantidad de agua a añadir (1,5 para materiales drenantes y 2% para materiales arcillosos con alta capacidad de absorción de agua).
  2. Compactar el suelo en tres capas.
  3. Realizar la prueba con el EDG y el cono de arena seguidamente (puede ser realizado también en campo).
  4. Completar el modelo de suelo con los resultados del cono de arena.
  5. Ajustar el modelo de suelo para obtener un FIT adecuado.
- El equipo presentó la desventaja de depender de otra prueba para poder funcionar (requiere parámetro de densidad y humedad de otros métodos de medición para poder completar los modelos de suelo e indirectamente los JOB SITES)
- Si se obtiene un FIT menor a 0.7 el EDG realiza las mediciones de campo pero advierte que las mediciones desplegadas puede que no sean tan acertadas como se requiere.
- A lo largo de la investigación no se pudo controlar efectivamente la energía de compactación usada en el laboratorio, lo cual influyó en los resultados obtenidos.
- A pesar de ser apto para realizar mediciones en cualquier tipo de suelo o mezcla de agregado grueso y fino, el EDG mostró una mayor precisión con materiales arenosos y drenantes (limpios o medianamente contaminados).
- El EDG es recomendable para realizar controles de compactación en campo en proyectos de gran envergadura y que garanticen la utilización de materiales cuyas características físicas y mecánicas se mantengan estables a lo largo del proyecto, pues la elaboración de los modelos de suelo es laboriosa y exige un control estricto del proceso.
- Si los dardos del EDG no pueden ser clavados en el material compactado, la prueba no se puede realizar y se debe usar otro método para la medición de la densidad y humedad en campo.
- Los proyectos a evaluar deben mantener un adecuado control sobre el material a usar, se debe asegurar que no variará significativamente a lo largo del trayecto así como la calidad del agua, pues la medición puede verse afectada.
- El EDG es sensible a variaciones en la granulometría del material, minerales conductores y salinidad del agua, por lo que se debe verificar que estos parámetros son normales y/o no alteradores de las funciones del equipo a la hora de analizar un material.
- La evaluación de las pruebas por medio del método de la AMRL mostró que las pruebas fueron correctamente ejecutadas, mas al comparar ambos métodos de medición de humedad y grado de compactación en sitio, éstos muestran variaciones.
- Siguiendo el procedimiento desarrollado para comparar estas dos pruebas se demostró que en este caso los métodos no brindaron resultados comparables entre sí, por lo que el EDG no mostró ser confiable en sus resultados respecto a los brindados por el cono de arena.
- El densímetro eléctrico EDG resulta impráctico en aquellas regiones donde las fuentes de materiales son muy variables ya que el tiempo invertido en la creación de un modelo de suelo para un tipo de material es considerable y no permite al cliente tomar decisiones inmediatas en cuanto a un proceso de compactación se refiere, lo cual es una desventaja ante equipos sofisticados como el densímetro nuclear.
- Para la creación de un modelo de suelo, se deben realizar al menos 3 pruebas de suelo y

máximo 16. Entre más pruebas se realicen, el FIT será aún más cercano a uno, siempre y cuando dichas pruebas sean precedidas por un método de compactación adecuado.

•  
Algunas de las limitaciones más importantes que se presentaron en la investigación son:

- La cantidad de material para la realización de las pruebas fue limitada, por lo que no se pudo planear las pruebas para repetir ciertos puntos donde existió duda de los resultados obtenidos.
- Los equipos usados en las pruebas no fueron calibrados, por lo que las mediciones hechas arrastran un grado de incertidumbre mayor a las asociadas a ellos (especialmente las balanzas).
- La disposición de espacio para almacenaje de materiales en el CECO es muy limitado, por lo que implica almacenaje y desalmacenaje continuo, lo que complica la logística de movilización de equipo y materiales para la realización de las pruebas. Esto genera un gasto excesivo de tiempo
- En general no se tuvo control sobre la manera de extracción de los materiales. De haberlo tenido aseguraría tener un mayor criterio sobre las posibles variaciones en el material que podrían afectar las mediciones del EDG.
- El EDG depende de mediciones de un método ajeno a él para determinar los parámetros de humedad y grado de compactación necesarios para completar los modelos de suelo, lo que implica que arrastra las incertidumbres asociadas al método usado para éste fin (cono de arena y equipos de medición utilizados en esta investigación)
- En el mercado nacional no se encontraron los materiales convenientes para la fabricación de un molde adecuado para compactar los suelos. Se escogió la mejor opción disponible y que mejor se adaptó a los objetivos y alcances de la investigación planteada.
- No se contó con el tiempo ni los medios necesarios para realizar un estudio más detallado sobre la composición química de los suelos y de salinidad del agua usada, por lo que, a pesar de no ser un tema planteado entre los objetivos, es un factor a considerar en investigaciones futuras acerca del funcionamiento del EDG.

- No existió un procedimiento guía para desarrollar la investigación de una forma más certera, por lo que muchas de las cosas realizadas en la investigación fueron erradas y tuvieron que ser retomadas hasta lograr resultados acordes a lo esperado. Los procedimientos enviados por los fabricantes del equipo fueron confusos y ocasionaron atrasos innecesarios en el proyecto.
- No se contó con proyectos en campo activos donde se utilizaran los materiales que fueron usados en la investigación, y que permitieran desarrollar las pruebas de campo tal como se planteó en los objetivos, por lo que se hicieron estas pruebas en el laboratorio bajo condiciones controladas.

# Introducción

El control de la densidad y humedad en el campo es importante para asegurar la calidad de los trabajos realizados y garantizar la durabilidad y seguridad de las obras. Para el desarrollo de este proyecto fue necesario consultar variada información acerca de los materiales y pruebas necesarias (basadas en los métodos establecidos por las normas ASTM), para alcanzar los objetivos planteados. Temas como granulometría, medición de densidades, plasticidad, clasificación de suelos, definiciones varias sobre estadística e información sobre el EDG, son ampliadas en secciones posteriores.

La medición de densidades y contenido de humedad en campo es un proceso lento y laborioso, y en ocasiones no se le da la importancia que merece. Ésta es una realidad en la cual se desarrollan proyectos de interés general, como la construcción de caminos o rellenos donde se cimentarán obras de gran importancia, donde el control de calidad es llevado ineficientemente merced a lo arcaico o peligrosos de los métodos actuales para medir estos parámetros.

Este proyecto se ejecutó con el fin de validar la medición de densidades y humedades en el campo con el uso de un densímetro eléctrico (EDG), usando como parámetro de comparación la prueba de cono de arena (ASTM D 1556).

En los últimos años se han venido utilizando los métodos nucleares como la principal prueba para la obtención de los grados de compactación en campo. El laboratorio del CIVCO, al no contar con dichos equipos, se ha visto en la obligación de utilizar el método del cono de arena el cual representa el método más rudimentario para medir compactación en campo aún estando debidamente normalizado por la American Standards for Testing and Materials (ASTM D-1556).

Aunado a esto, el método del cono de arena es un procedimiento que puede presentar ciertas fuentes de error dependiendo de la

granulometría del suelo a analizar, pues para materiales arenosos y saturados puede presentar problemas por derrumbe de las paredes del hoyo excavado. No obstante la norma ASTM D 1556 asegura que los resultados obtenidos con ésta prueba son validos, precisos y aceptados internacionalmente, siempre y cuando la prueba sea realizada adecuadamente, por lo que es un buen parámetro de comparación para éste proyecto.

El proyecto tuvo la peculiaridad de tener que realizar investigación en diversos campos, con el fin de lograr los objetivos planteados inicialmente, pues el conocimiento acerca del funcionamiento del equipo fue reducido. El primer paso fue contactar a la empresa fabricante del EDG (la compañía Humboldt) y recopilar la información acerca de experiencias previas con el uso del equipo y características de su funcionamiento.

## Objetivo general

- Validar el ensayo de compactación in situ utilizando el densímetro eléctrico (método no normalizado) del Laboratorio del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO) mediante métodos de comparación de resultados con el método del cono de arena (ASTM D-1556)

## Objetivos específicos

- Investigar sobre el funcionamiento y exámenes previos realizados a suelos con el equipo de densímetro eléctrico, para definir los suelos más convenientes para desarrollar el proyecto según los tipos de suelo presentes en Costa Rica.
- Identificar los sitios donde se extraen materiales usados para compactación (en proyectos carreteros o de relleno) y realizar el

- muestreo de dichos materiales en cada uno de ellos (ASTM D-75)
- Realizar los ensayos para la clasificación de los materiales muestreados con base en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (ASTM D-2487)
  - Obtener la densidad seca máxima y la humedad óptima en el laboratorio para cada uno de los materiales clasificados mediante la prueba de Próctor Modificado (ASTM D-1557)
  - Desarrollar un método que permita simular las condiciones de campo, a fin de aplicar la prueba del cono de arena y la del densímetro eléctrico para obtener la información física necesaria (densidad húmeda y humedad en sitio), para crear un modelo para cada tipo de suelo.
  - Crear los modelos de suelo con base en los resultados de ensayo.
- Comparar, mediante chequeos de compactación en campo o un método que permita simular las condiciones de campo en el laboratorio, los resultados del método de cono de arena y del densímetro eléctrico
  - Realizar un estudio estadístico de los resultados obtenidos de las pruebas efectuadas con el cono de arena y el densímetro eléctrico, a fin de determinar la variación de los datos en cada método y así determinar cuál presenta una menor dispersión entre sus resultados.
  - Validar el método del densímetro eléctrico a fin de que el laboratorio de suelos del CIVCO pueda aplicar dicho servicio para fines de investigación y extensión.

# Marco teórico

## Caracterización de suelos

### Granulometría

Este análisis es, a grandes rasgos, la determinación del rango de tamaños de las partículas presentes en un suelo, expresado como porcentajes del peso seco total. Se usan generalmente dos métodos para encontrar la granulometría de un suelo:

1. Análisis por tamizado: Consiste en hacer pasar la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas que tienen aberturas progresivamente más pequeñas. previamente el suelo debe ser secado en un horno y luego todos los grumos disgregados en partículas pequeñas, antes de ser pasado por las mallas por medio de vibración. Las porciones retenidas en las mallas se recolectan por separado para determinar la masa retenida en cada malla.
2. Análisis hidrométrico: Se basa en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua. Cuando un espécimen de suelo se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos.

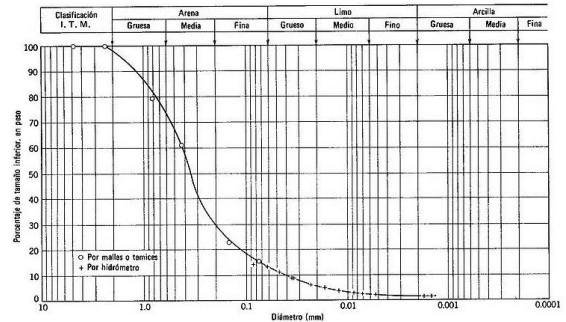


Figura 1: Curva granulométrica característica.

### Plasticidad

En mecánica de suelos este término se puede definir como “la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse”<sup>1</sup>

Gracias a investigaciones sobre el tema se ha determinado que esta propiedad en suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares que influyen sobre el dipolo del agua y la unen a su estructura molecular.

Albert Mauritz Atterberg, investigador sueco, desarrollo un método para medir la plasticidad en suelos arcillosos de forma cuantitativa, alterando controladamente el contenido de humedad en los arcillosos. De esta forma estableció los estados de consistencia de los suelos finos. Esos límites son:

- Límite líquido (LL): es la frontera entre el estado líquido y plástico, se describe como un líquido viscoso
- Límite plástico (LP): es la división entre el estado plástico y semisólido, y tiene un contenido de humedad que le permite que se deforme pero que no se agriete..

<sup>1</sup> Juárez Badillo. R. Mecánica de suelos Tomo 1

- Límite de contracción (LC): es la frontera entre el estado semisólido y sólido. En este punto el material falla al deformarse.

En la figura 2 se muestran las posiciones de los límites entre los estados de consistencia de los suelos finos, y se observa que para determinarlos lo primordial es ir variando el contenido de humedad y verificar el comportamiento que presenta el suelo al adicionar o quitar agua a su estructura.

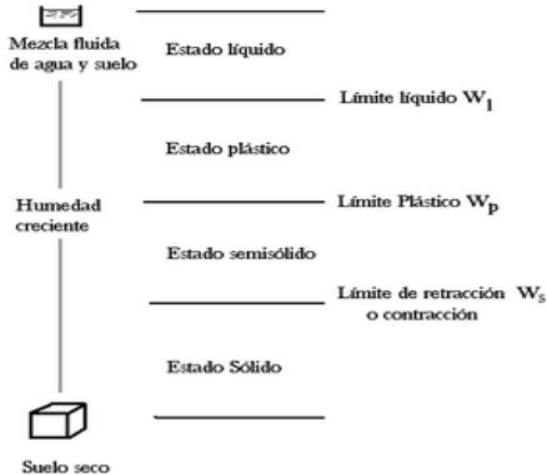


Figura 2: Representación gráfica de los límites de Atterberg

Los límites en sí son la determinación de la humedad del suelo para lograr que se comporte de las siguientes maneras:

El límite líquido (LL) es la humedad a la cual el suelo amasado logra cerrar una ranura trapezoidal contra una goma dura en 25 golpes (Usando la Copa Casagrande).

El límite plástico (LP) es la humedad a la cual el suelo amasado empieza a desmoronarse al tratar de hacer rollitos de suelo de un diámetro de 3mm y de 0.5 a 1 cm de largo, realizando el procedimiento con la mano y sobre una superficie lisa (vidrio).

El límite de retracción se alcanza cuando el suelo alcanza un volumen mínimo al secarse a partir de un estado de saturación. Esto se explica debido a que en el proceso de retracción los poros del suelo se hacen más pequeños y la tensión capilar del agua presente en su estructura aumenta.

A partir de los límites desarrollados por Atterberg se pueden calcular algunas relaciones que logran describir factores y efectos que se

presentan en los suelos finos al variar el contenido de humedad de un suelo.

Una de estas relaciones es el índice plástico, el cual es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico

$$IP = LL - LP$$

Este índice representa la variación en humedad que puede presentar un suelo que se conserva en el estado plástico.

## Sistemas de clasificación de suelos

Dada la enorme gama de suelos existentes en la naturaleza se dificulta la clasificación de los mismos.

Los primeros sistemas de clasificación de suelos se basaban únicamente en características granulométricas, tales como: la clasificación internacional (basada en un procedimiento sueco de clasificación de suelos preexistente), la clasificación M.I.T. (Desarrollado en el Massachusetts Institute of Technology) y la clasificación alemana basada en la teoría original de Kopecky (1936).

Es importante que se establezca la diferencia entre clasificación y descripción, la clasificación sitúa a un suelo en un limitado número de grupos basándose en la graduación y en las características de plasticidad de una muestra de suelo alterada, y la descripción debe considerar no solo el tamaño de las partículas, si no también detalles como el color, olor, plasticidad, sedimentación, etc.

Estos sistemas fueron muy cuestionados debido a que no estaban enfocados a las propiedades mecánicas del suelo y no resultaban del todo útiles para fines ingenieriles.

A partir de estos precedentes el doctor Arturo Casagrande en la Universidad de Harvard realizó estudios para generar un sistema de clasificación de suelos, que concluyó en 1942 con el Sistema de Clasificación de Aeropuertos, donde por primera vez se reconocen las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos de tamaños de partícula menores a la abertura de la malla N° 200 (75µm).

Este sistema parte de las siguientes premisas:

1. Los suelos son separados por la malla N° 200 (0.0075mm), siendo denominada la fracción retenida pero menor a 3'' como "gruesa" y la fracción pasando como "fina"
2. La fracción gruesa a su vez se divide en gravas (retenido en malla N° 4 (4,76mm)) y arenas (pasando malla N° 4).
3. La fracción fina se subdivide en grupos tomando en cuenta las características de plasticidad, las cuales están ligadas a las propiedades mecánicas e hidráulicas que caracterizan al suelo (Nota: la compresibilidad aumenta con el límite líquido, permaneciendo los demás valores constantes)
4. Los suelos finos, cuyo origen no sea volcánico y tengan límites líquidos menores a 100 se subdividen en: baja a media compresibilidad ( $LL < 50$ ) y de alta compresibilidad ( $LL > 50$ )

De éstas premisas y los estudio realizados por el Doctor Arturo Casagrande en la Universidad de Harvard, se generó un carta de plasticidad, donde se representa gráficamente la relación del límite líquido contra el índice de plasticidad en un plano de ejes coordenados. Al realizar esta representación grafica se notó que los suelos finos no tienen un comportamiento antojadizo, sino que se agrupan en conjuntos de suelos con características mecánicas e hidráulicas muy similares. De esta manera se trazaron líneas frontera (obtenidas empíricamente) entre suelos con comportamientos similares y obedeciendo los criterios de compresibilidad mencionados anteriormente. Tal y como se muestra en la figura 4, se denominan línea A la que divide los limos de las arcillas y material orgánico y Línea B la que divide a los suelos entre de alta o baja compresibilidad, tomando como frontera un  $LL = 50$ .

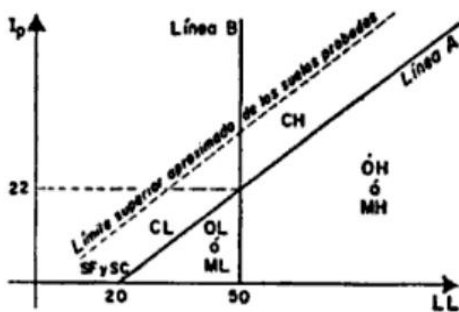


Figura 4: Carta de plasticidad del sistema de clasificación de para aeropuertos

De ésta figura surgen los siguientes grupos de suelos:

- Arcillas (C, de la palabra del inglés Clay), situadas sobre la línea A
- Limos (M, de la palabra del sueco Mo), situadas bajo la línea A
- Para los suelos con alto contenido de materia orgánica que se sitúan bajo la línea A también se les denomina con la letra O

Para designar un suelo como de alta compresibilidad se usa la letra "H" (del inglés high) y "L" para los de baja compresibilidad (del inglés low)

## Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

A partir del sistema de clasificación de suelos para aeropuertos tratado anteriormente, surge este sistema que presenta ligeras variaciones en el procedimiento respecto al sistema de aeropuertos.

Entre estas variaciones destaca que un suelo es considerado como grueso si más del 50% es retenido en la malla N° 200 y fino si lo contrario es lo que sucede.

Además, en la clasificación se pueden usar símbolos dobles cuando la distribución de partículas que componen un suelo lo sitúa claramente entre las fronteras establecidas en este sistema de clasificación.

A partir de éste precedente se obtiene la siguiente división de suelos, para la parte gruesa:

1. Gravos (G): >50% del material es retenido en la malla 200 y si > 50% de la parte gruesa es retenida en la malla N° 4
2. Arenas (S): <50% del material es retenido en la malla 200 y si < 50% de la parte gruesa es retenida en la malla N° 4

Las arenas y gravas se dividen en cuatro grupos:

1. Materiales bien graduados, limpios de materiales finos, se designan como: GW, SW. La presencia de finos es tan reducida que se supone no afectan las características de resistencia de la parte gruesa y mucho

menos reducir su capacidad de drenaje. (Contenido de finos debe ser menor al 5%). Además deben cumplir con que:  $1 < C_c < 3$  y  $C_u > 4$ .

Donde:  $C_c$  es el coeficiente de curvatura y  $C_u$  el coeficiente de uniformidad

2. Material mal graduado, limpios de materiales finos, se nombran como: GP, SP. Son materiales con superioridad de un solo tamaño de partículas, o bien con una gama poco amplia de tamaños entre las partículas que lo componen.
3. Material con cantidad significativa de finos no plásticos en su composición, se designan como: GM, SM. El contenido de finos afecta tanto su resistencia como su capacidad de drenaje y su capacidad esfuerzo deformación (el contenido de finos es  $> 12\%$ ). Es esperable que los límites de Atterberg localicen estos materiales bajo la línea A de la carta de plasticidad, pues su índice de plasticidad es menor a 4
4. Material con cantidad significativa de finos plásticos en su composición, se designan como: GC, SC. El porcentaje de finos es mayor a  $12\%$  y éstos son de alta plasticidad, por lo tanto se localizan sobre la línea A de la carta de plasticidad y su índice de plasticidad es esperable que sea mayor a 7.

De igual manera, para los suelos finos la clasificación establece ciertos grupos designados con letras mayúsculas. Cada uno de los suelos se subdivide en dos subgrupos dependiendo del límite líquido, teniendo como frontera  $LL=50$ , lo cual los designa como de alta o baja compresibilidad, según sea el caso, tal como se muestra en la figura 4

- **Limos inorgánicos: (M)**

Los limos de baja plasticidad se encuentran bajo la línea A. con  $LL < 50\%$  y la porción sobre la línea A, con  $IP < 4\%$ . Por su parte los limos de alta plasticidad se encuentran bajo la línea A pero con  $LL > 50\%$ .

- **Arcillas inorgánicas: (C)**

Las arcillas de baja plasticidad se encuentran sobre la línea A y tienen como característica que su  $LL > 50\%$  y su  $IP > 7\%$ . En su lugar, las de alta plasticidad son, por ejemplo, las formadas por descomposición química de las cenizas volcánicas, y tiene como característica que su límite líquido es extremadamente grande, mayor a  $50\%$ .

- **Limos y arcillas orgánicas: (O)**

Ocupan de ordinario las mismas zonas que los limos de alta y baja compresibilidad en la carta de plasticidad, pero tienen en su estructura un alto grado de materia orgánica, lo que provoca que en las arcillas el límite líquido crezca, mas no así el límite plástico, desplazándolos hacia la derecha de la carta de plasticidad.

Los suelos que se declaran como totalmente orgánicos son denominados como turba "Pt" (del inglés peat). Los límites líquidos de estos suelos oscila entre el  $300\%$  y  $500\%$  y su índice plástico de ordinario se encuentra entre  $100\%$  y  $200\%$ .

Las variaciones introducidas a la carta de plasticidad en este sistema son:

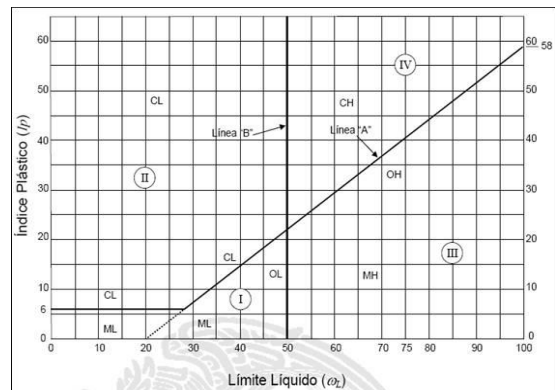


Figura 5: Carta de plasticidad usada en el sistema SUCS



## Compactación

Se define compactación como: “la reducción de de la relación de vacíos mediante la aplicación de energía; que por medio de la reorientación de las partículas, fractura de los granos y seguida por una reorientación y la flexión o distorsión de las partículas y capas absorbidas”.<sup>2</sup>La compactación es importante debido a que aumenta la resistencia del suelo y disminuye la capacidad de deformación.

La energía de compactación varía según el tipo de suelo, pues según sea la clasificación de éste así será su comportamiento en este proceso. En suelos cohesivos la compactación se logra por distorsión y reorientación de las partículas, las cuales son resistidas por las fuerzas de cohesión. En un suelo granular la compactación se logra por reorientación de las partículas y de forma secundaria, por fractura de los granos, estas fuerzas son resistidas por el rozamiento entre las partículas del suelo. En ambos casos al aumentar el contenido de humedad el esfuerzo de compactación se hace más efectivo; pero esto es cierto hasta que los suelos alcanzan el punto de saturación, a partir del cual el esfuerzo neutro impide que se siga disminuyendo la relación de vacíos.

Esto se demuestra en un experimento donde se preparan de 6 a 8 muestras, a las cuales se les aplica un esfuerzo de compactación igual en un molde con volumen determinado, pero se les varía el contenido de humedad. Al graficar los resultados de éste experimento se obtienen una curva como la mostrada en la figura 6:

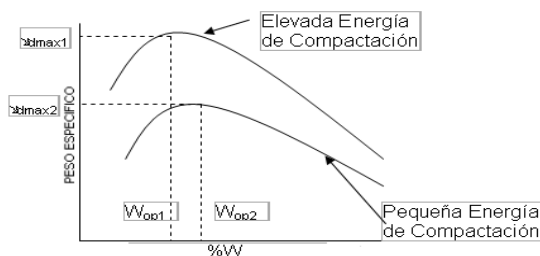


Figura 6: Gráfica de peso específico contra humedad.

Si se logra compactar el suelo perfectamente, hasta producir que éste se sature con diferentes contenidos de humedad se obtendría la curva de

saturation total la cual representa los pesos específicos teóricos y esta siempre por encima de la curva experimental.

Para obtener los pesos específicos se usan las siguientes fórmulas:

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

Describe la curva experimental

$$\rho_d = \frac{S_s}{1 + wS_s} \rho_0$$

Describe la curva de saturación total

Donde:

$\rho_d$ : es la densidad seca del material

$\rho_m$ : densidad húmeda del material

$\rho_0$ : densidad húmeda del material

$\%w$ : porcentaje de humedad del material

$S_s$ : saturación del material

## Tipo de Suelo

Un factor importante sobre la compactación de un terreno, es el tipo de suelo, pues cada uno tiene sus propias características intrínsecas, tales como: la cantidad y tipo de minerales arcillosos, la granulometría, la forma de las partículas del suelo y la densidad de sólidos, los cuales tienen gran influencia en la forma de las curvas de compactación de cada uno de ellos para una misma energía de compactación. Por ejemplo las curvas en forma de campanas son características de los suelos arcillosos; por otro lado, una curva más pronunciada es típica de las arenas. La figura 7 muestra cinco curvas típicas de compactación para diferentes tipos de suelo.

<sup>2</sup> Juárez Badillo. R. Mecánica de suelos Tomo 1

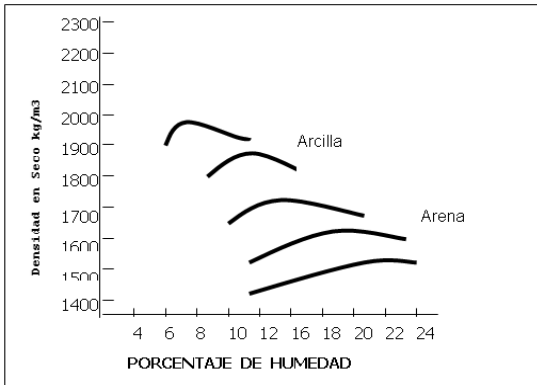


Figura 7: Gráfica de Densidad contra porcentaje de humedad.

## Beneficios de la Compactación

El proceso de compactación de suelos ofrece múltiples beneficios desde el punto de vista de ingeniería, pues aumenta al máximo las prestaciones de éste. La mayoría de estos beneficios se dan especialmente por el reacomodo de partículas, la disminución de los espacios vacíos y escurrimiento del agua.

Por ejemplo, cuando el acomodo de las partículas de suelo es disperso, es decir cuando su estructura tiene vacíos, estos espacios dan cabida al paso de agua y la retención de aire, lo que genera una estructura débil, pues no puede soportar cargas o, en otros casos, el agua soporta la carga en forma temporal, mas luego emigra creando nuevamente una estructura frágil, que a su vez puede presentar problemas de deformaciones, hundimientos o grietas que pueden producir derrumbes o asentamientos repentinos en las diferentes masas de suelo.

Es por este motivo que la compactación constituye un factor importante para mejorar los suelos en diversos aspectos, tales como aumentar la capacidad de soporte de carga, impedir asentamientos, reducir el drenaje del agua y disminuir la expansión o contracción del suelo.

Para mantener un estándar al realizar esta prueba se usa el procedimiento desarrollado por R.R. Proctor, quien fue el primero en proponer los conceptos de humedad óptima y peso específico máximo. Existen dos procedimientos con esta denominación:

- Proctor normal (ASTM D 698). (ver figura 7) consiste en aplicar 25 golpes con un pisón de 5.5 libras desde una altura de 12", a tres capas de suelo dentro de un molde de 4" de diámetro. La energía aplicada es de 12400 lb/ft<sup>3</sup>, una energía comparable con la que se aplica con equipos de compactación ligera.

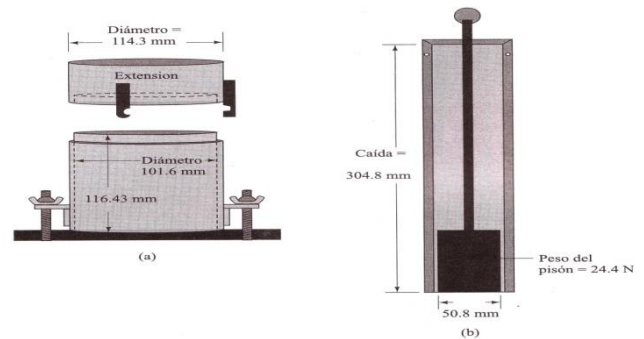


Figura 8: Equipo de prueba Proctor Estándar. (a) Molde (b) Pisón

- Proctor modificado (ASTM D 1557): en esta prueba se aplican 56 golpes con una masa de 10 libras desde una altura de 18" a cinco capas de igual espesor dentro de un molde de 4" o 6", según sea indicado en la norma ASTM D 1557, a partir de la distribución de partículas presentada por el suelo a analizar. La energía aplicada equivale a 56200 lb/ft<sup>3</sup>, lo cual se compara a la energía aplicada por equipos de compactación pesada.

Es el Proctor modificado la prueba de uso más común, pues la energía de compactación es mayor y se asemeja más a lo que se puede encontrar en campo.

La ecuación que describe la energía aplicada al suelo durante esta prueba es:

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

Donde:

- E<sub>e</sub>: Energía específica
- N: Número de golpes por capa
- n: numero de capas
- W: peso del pisón
- h: altura de caída libre del pisón
- V: volumen del suelo compactado.

Estas pruebas tienen la limitación del tamaño de partícula máximo (2cm), por lo que para suelos o materiales con tamaños de partícula mayores se deben realizar ensayos piloto a escala natural.

## Chequeo de compactación en campo

### Cono de arena

Ésta es la prueba que fue usada como patrón de comparación para determinar si los resultados presentados por el EDG son válidos. se seleccionó como prueba patrón por el bajo riesgo presentado al que la realiza, conocimiento de la misma y confiabilidad de los resultados por tener un procedimiento normado y avalado internacionalmente.

El chequeo de compactación en campo está normado por la prueba de cono de arena (ASTM D 1556) y es aplicado en general sobre una superficie de material compactado. Por medio del uso de una arena de granos redondeados (normalizada para esta prueba), de la cual se conoce su densidad, se realiza una excavación cilíndrica y por diferencia de pesos y volúmenes (del cono metálico usado, así como del hoyo en el suelo y los pesos de arena usados en la prueba) y relacionándolos con la densidad de la arena se puede determinar la densidad del material en el sitio, así como la humedad del material al momento de realizar la prueba. Ver figura 9.

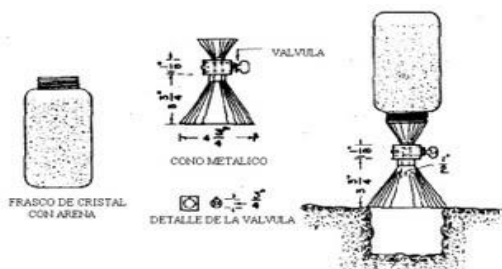


Figura 9: Diagrama de ejecución de la prueba de cono de arena

### Método del Globo de Hule

Este procedimiento es muy similar al método del cono de arena, y se basa en el mismo principio. Igualmente se determina el lugar en el cual se requiere realizar la prueba, se hace un agujero, cuyas medidas variarán según el tamaño del equipo utilizado, sin embargo la profundidad también estará en el rango entre los 10 y 15 cm.

Al material que se extrae del agujero se le determina su peso húmedo y su contenido de agua. Para determinar el volumen del hoyo, se introduce un globo de hule que se va llenando con agua, mediante una válvula de aire, la cual está conectada a un recipiente calibrado, y de ahí se puede leer el volumen en forma directa. El peso específico seco del suelo compactado se calcula utilizando la misma ecuación del método del cono de arena.

Una desventaja de este método es que, si se encuentra en suelos rocosos y de gran aspereza, el globo podría tener problemas al contacto con dichos suelos, y tener perforaciones o rasgaduras que impidan el funcionamiento correcto del mismo. Ver figura 10.

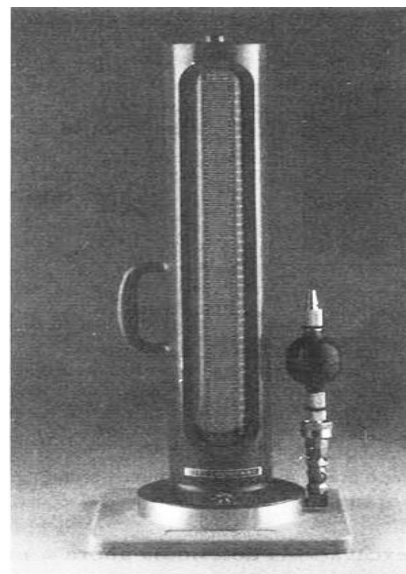


Figura 10: Recipiente calibrado utilizado para el método del globo de hule.

## Método Nuclear (Norma ASTM D2922)

Este método se vale de los avances de la tecnología para poder obtener resultados de densidad en forma rápida y directa, disminuyendo los tiempos de pesaje, así como cualquier otro factor de error, ya sea humano o de calibración de los instrumentos.

Los densímetros nucleares operan en agujeros taladrados o desde la superficie del terreno. El instrumento mide el peso de suelo húmedo por volumen unitario y también el peso del agua presente en un volumen unitario de suelo.



Figura 11: Densímetro nuclear

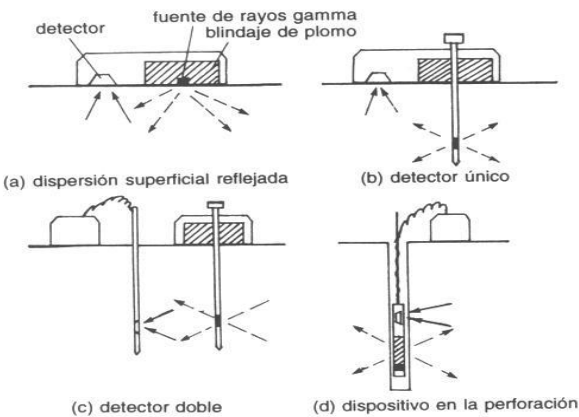


Figura 12: Mecanismo de funcionamiento de los diferentes tipos de densímetros nucleares.

## Método Eléctrico (Humboldt)

El presente equipo fue el objeto de la investigación que se realizó, a fin de determinar si los resultados que éste presenta son exactos y comparables tomando como patrón la prueba del cono de arena; a fin de utilizar el equipo para mediciones en campo.

El densímetro eléctrico producido por esta empresa es el aparato objeto sobre el cual se basa la presente investigación. Ver figura 13

**Electrical Density Gauge**



Figura 13: densímetro eléctrico Humboldt (EDG)

La investigación sobre este tipo de mediciones ha llevado a que algunas compañías desarrollen equipos para medir densidades mediante impulsos eléctricos enviados al suelo compactado. Debido a que el equipo estudiado en este proyecto es el desarrollado por la compañía Humboldt, se hablara en general del funcionamiento y características de este equipo.

El EDG (Electrical Density Gauge) mide y muestra la densidad húmeda y seca, contenido de humedad gravimétrico y grado de compactación. Además es capaz de entregar mediciones comparables a aquellas logradas con los métodos tradicionales, como las nucleares y cono de arena.

Este equipo utiliza radiofrecuencia de punto a punto (entre los dardos hincados en el suelo), asegurando positivas mediciones a la profundidad de los electrodos. (4", 6", 8", 10" y 12" de altura es la medida estándar de los dardos).

No es indispensable asegurarse que el suelo sea homogéneo; se puede confiar en la onda de radio frecuencia para penetrar los materiales del suelo desde la superficie y de esta manera

determinar el contenido de humedad y el grado de compactación. .

El EDG y en general los equipos de medición eléctrica tienen ciertas ventajas sobre los otros métodos de control de compactación y contenido de humedad:

- No requieren de un personal altamente calificado y especializado para poder realizar las pruebas. Además no requiere de los permisos por parte de las entidades de salud y seguridad social para poder usarlo.
- El procedimiento a seguir para realizar la prueba es simple, seguro y permite obtener resultados rápidamente. El equipo es compacto y fácil de trasladar de un punto a otro.

## Modelos de suelo (SOIL MODEL)

Un modelo de suelo es un conjunto de datos sobre un material en específico, generados con el fin de que el EDG tenga la capacidad de realizar mediciones en campo. Debe contener un número de mediciones que se encuentre entre 3 y 16 mediciones completas. Los datos requeridos por el EDG son:

- Clasificación del material según el método SUCS.
- Densidad seca máxima
- Contenido de humedad óptimo

Para que un modelo de suelo sea exitoso es necesario que cumpla con los siguientes requisitos:

- Las densidades secas obtenidas en los puntos de material compactado deben ser cercanas a la densidad seca máxima característica del material.
- Las humedades se deben variar en rangos de 1.5% para materiales arenosos y 2% para materiales con gran capacidad de retención de agua en su estructura.

- El factor de ajuste interno (FIT) del comportamiento de los datos debe ser igual o mayor a 0,7 (recomendablemente)
- El material con el que se elabora el modelo de suelo debe coincidir en granulometría y fuente de extracción de proveniencia con el que se usará en el proyecto en el cual se realizarán las mediciones.
- El agua con el que se elaboran las pruebas para generar el modelo de suelo debe ser la misma que se usará en el campo, y se debe analizar si tiene sales o minerales disueltos que puedan afectar las mediciones.
- Se debe tener un método normado y respetado internacionalmente para realizar las mediciones en el mismo sitio donde se hizo la prueba con el EDG, pues las mediciones del EDG necesitan ser completadas con datos de densidades húmedas y contenido de humedad de cada punto realizado.

### Factor de ajuste interno

El EDG internamente analiza los resultados de las pruebas que componen el modelo de suelo; revisa simultáneamente el grado de variación entre los datos y la recta de ajuste que traza el equipo. Entre mejor sea el ajuste tanto en las densidades así como en los contenidos de humedad mayor será el valor de FIT, provocando que las mediciones sean más certeras y confiables. Ver figura 14.

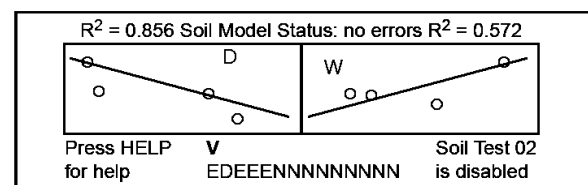


Figura 14: gráfico de FIT del EDG.

## Sitios de trabajo

Son el conjunto de mediciones realizadas en campo (en un proyecto) asociado a modelo de suelo previamente elaborado. Para que los resultados sean satisfactorios es necesario que el modelo de suelo esté correctamente elaborado.

El EDG es usado únicamente en suelos y mezclas de agregados. Puede ser empleado en proyectos tales como: terraplenes y rellenos, bases, sub-bases y sub-rasantes de caminos (que no sean estabilizadas con cementantes o químicos), pero en general en todos los suelos compactados se podría utilizar el equipo con la salvedad de que no sean materiales estabilizados. Dado que el EDG no posee una norma avalada internacionalmente para realizar la prueba es necesario comprender y diferenciar lo que es un método normado, de uno que no lo es.

## Método normalizado

Es aquel método que cuenta con un procedimiento reconocido internacionalmente, elaborado por un ente reconocido, que brinda resultados confiables acerca de una prueba en específico.

El procedimiento debe permitir que la prueba sea repetible y sus resultados reproducibles bajo las diferentes posibles condiciones de trabajo en las que se va a aplicar.

## Método no normalizado

Son prácticas que no cuentan con los lineamientos establecidos para un método normado.

El Instituto de Normas Técnicas de Costa Rica (INTECO), establece que para que un método no normado pueda ser utilizado debe comprobarse que los resultados obtenidos siguiendo las prácticas brinden resultados confiables. Esto puede lograrse siguiendo uno o algunos de los siguientes lineamientos:

- Calibración, utilizando patrones de referencia o materiales de referencia
- Comparación con resultados obtenidos con otros métodos
- Comparaciones interlaboratorios
- Evaluación de la incertidumbre de los resultados, basada en el conocimiento científico de los principios teóricos del método y en la experiencia práctica.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> INTE-ISO/IEC 17025 - 2005

# Conceptos estadísticos básicos.

A continuación se definen algunos conceptos básicos sobre estadística que fueron usados en ésta investigación. Su definición permitirá una mejor comprensión de los resultados e interpretación que se le dio a los mismos para la obtención de conclusiones.

## “Validación

Confirmación mediante el suministro de evidencia objetiva de que se han cumplido los requisitos para una utilización o aplicación específica prevista.

## Exactitud de una medición

Proximidad entre el resultado de una medición y el valor verdadero del mesurando.

## Repetitividad (de los resultados de las mediciones)

Proximidad entre los resultados de mediciones sucesivas del mismo mesurando, realizadas bajo las mismas condiciones de medición (aplicación de un mismo procedimiento, a un mismo objeto, por el mismo operador, en intervalos cortos de tiempo, con el mismo equipamiento instrumental, en el mismo lugar).

## Reproducibilidad

Proximidad entre los resultados de mediciones de un mismo mesurando, realizadas bajo distintas condiciones de medición<sup>4</sup>.”

## Pruebas de hipótesis.

---

<sup>4</sup> Organismo de Acreditación Argentino, Guía para la validación de métodos de ensayo.

Una hipótesis es: “una proposición sobre los parámetros de una o más poblaciones”<sup>5</sup>  
 La hipótesis tiene varios fines según sea el caso analizado:

1. Determinar si el parámetro ha cambiado
2. Verificar una teoría o modelo
3. Probar el cumplimiento de una o varias especificaciones.

## Hipótesis nula

Es la hipótesis que se desea probar, con el fin de ser aceptada o rechazada.

## Hipótesis alternativa

Al ser rechazada la hipótesis nula, permite que el parámetro tome varios valores posibles.

Al analizar las hipótesis se puede incurrir en dos errores debido a que la confiabilidad de las hipótesis nunca va a ser absoluta, pues dependen de un grado de confiabilidad asignado.

Estos errores son:

- Error tipo I: “es el rechazo de la hipótesis nula cuando esta es verdadera”
- Error tipo II: “Aceptación de la hipótesis nula cuando esta es falsa”<sup>6</sup>

	Se acepta hipótesis	Se rechaza hipótesis
Hipótesis es verdadera	Decisión correcta	Error tipo I
Hipótesis es falsa	Error tipo II	Decisión correcta

La probabilidad de cometer estos errores siempre está presente en estas pruebas por lo que es necesario calcular la probabilidad de cometerlos. La probabilidad de cometer el error tipo I se designa como  $\alpha$  y la de cometer el error tipo II como  $\beta$

$$\alpha = P(EI) = P(\text{rechazar } H_0 / H_0 \text{ es verdadera})$$

<sup>5</sup> Montgomery. D. Estadística aplicada a la ingeniería.

<sup>6</sup> Montgomery. D. Estadística aplicada a la ingeniería.

$$\beta = P(EII) = P(\text{aceptar } H_0 / H_0 \text{ es falsa})$$

Donde:

$H_0$ : es la hipótesis nula.

EI: Error tipo I

EII: Error tipo II

## Variabilidad

El fin de la estadística es describir el comportamiento de conjuntos de datos e interpretarlos. Trata de identificar irregularidades que puedan existir en los datos y trata de describirlos a través de un valor (como el promedio por ejemplo). Además, trata de establecer la medida en que los datos se concentran o dispersan de este valor, es decir trata de describir las desviaciones respecto al valor representativo calculado para describir el comportamiento del grupo de valores. Esto se realiza porque la validez de un valor representativo depende de si los datos individuales se concentran o dispersan alrededor de él.

## Media

Es el promedio aritmético de los datos. Si el número de datos se considera de tamaño  $n$  (muestra), compuesto por datos  $x_1, x_2, \dots, x_n$ , entonces la media de la muestra se calcula como:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

Este valor tiene la característica de que su precisión es mayor que la precisión asociada que tiene cada dato por separado.

## Desviación estándar.

La fórmula que describe este valor es

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$$

La desviación estándar representa cuánto se alejan (en promedio) los datos de la media aritmética del conjunto. Tiene la característica que mide la variabilidad de los datos en las unidades de los datos de interés

## Varianza

La varianza es el cuadrado de la desviación estándar, y tiene el inconveniente de que mide la variabilidad de los datos en unidades elevadas al cuadrado de las que originalmente poseen los datos de interés.

Si la varianza es pequeña, la variabilidad de los datos es pequeña, pero si la varianza es grande la variabilidad también lo será.

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$$

## Análisis de medias

Si existen dos poblaciones con medias  $\mu_1$  y  $\mu_2$  y varianzas  $S^2_1$  y  $S^2_2$ , es necesario probar la hipótesis nula de  $\mu_1 - \mu_2 = \delta$ , donde  $\delta$  es una constante. Si las poblaciones tienen un comportamiento normal, el estadístico se puede calcular como

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - \delta}{\sqrt{\frac{\Gamma_1^2}{n_1} + \frac{\Gamma_2^2}{n_2}}}$$

Donde:  $\bar{x}_i, \Gamma_i^2$  y  $n_i$  representan los promedios, varianzas y tamaño de las muestras de las poblaciones, respectivamente, “z” es el estadístico utilizado para la obtención de la probabilidad de que la hipótesis planteada se cumpla.

A partir del cálculo del estadístico se revisa la hipótesis nula y las correspondientes hipótesis alternas

CUADRO 1: REVISIÓN DE HIPÓTESIS NULA.	
Hipótesis alterna	Rechaza hipótesis nula si
$\mu_1 - \mu_2 < \delta$	$Z < -Z_{\alpha}$
$\mu_1 - \mu_2 > \delta$	$Z > Z_{\alpha}$
$\mu_1 - \mu_2 \neq \delta$	$Z < -Z_{\alpha/2}$ $Z > Z_{\alpha/2}$

Es necesario evaluar la hipótesis respecto a un nivel de confianza para el análisis de las medias. Se debe elegir un valor “ $\alpha$ ” que representa la probabilidad de que la hipótesis nula no se cumpla, es decir de que no sea cierta.

El valor “z” calculado representa la probabilidad de que la hipótesis nula sea cierta, por lo que al compararlo con el “z” surgido del valor de confiabilidad escogido, si es menor se rechaza la hipótesis nula.

## Pruebas pareadas

Cuando los datos de los experimentos son recopilados en pares ( $x_{11}, x_{21}$ ), ( $x_{12}, x_{22}$ )... ( $x_{1n}, x_{2n}$ ) bajo condiciones homogéneas, pero aun así pueden presentarse diferencias entre los pares, es posible hacer una prueba pareada para eliminar o disminuir los efectos de los elementos que pueden estar distorsionando las medidas.

Se supone que las mediciones tienen una distribución normal, y que las diferencias ( $D_j$ ) entre cada par de observaciones se comportan de igual manera.

$$\mu_D = E(x_1 - x_2) = E(x_1) - E(x_2) = \mu_1 - \mu_2$$

Con estos supuestos se puede analizar el comportamiento de las medias y realizar las mismas hipótesis

Donde  $E(x_1 - x_2)$ , es la diferencia entre los pares de datos recolectados.

$$H_0 : \mu_D = 0$$

$$H_1 : \mu_D \neq 0$$

Con esta prueba se obtiene un estadístico para la descripción de las probabilidades de que se cumpla o no la hipótesis nula.



$$T_0 = \frac{\bar{D}}{\frac{S_D}{\sqrt{n}}}$$

Donde:  $\bar{D}$ ,  $y$ ,  $S_D^2$  son la media y la varianza de las diferencias.

$$\bar{D} = \sum_{j=1}^n D_j$$

$$S_D^2 = \frac{\sum_{j=1}^n D_j^2 - \frac{\left[ \sum_{j=1}^n D_j \right]^2}{n}}{n-1}$$

En este caso si  $t_0 > t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$  ó  $t_0 < -t_{\frac{\alpha}{2}, n-1}$ ; se debe rechazar la hipótesis nula.

## **Método basado en el procedimiento de la ASSHTO Materials Reference Laboratory (AMRL)**

Basada en la Norma ASTM C 670 (Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for construction Materials<sup>1</sup>)

Es una norma utilizada para determinar si dos pruebas realizadas por un mismo técnico con un mismo material y condiciones son comparables entre sí; además permite analizar las variaciones que se presentan en los resultados y si la forma de llevar a cabo la prueba es la correcta o no.

El método usa índices para calificar estos parámetros y se basan en el supuesto de que las diferencias son menores a éste índice. Es comúnmente usado para la comparación de pruebas entre laboratorios y de esta manera tener puntos de referencias externos para poder evaluar el desempeño.

# Metodología

## Metodología general

La forma en que se desarrollaron los objetivos necesarios para realizar este proyecto son:

- Recopilación de información
- Análisis de suelos y mezclas de agregados utilizados en el proyecto
- Generación de modelos de suelos
- Comparación entre métodos de medición de densidades en suelos.

## Recopilación de información

Para obtener la información requerida; se establecieron primeramente los campos de estudio que se relacionan a los alcances del proyecto para lo cual se definieron las siguientes etapas a fin de recolectar la información:

### Recolección de material bibliográfico

Se consultaron los libros y material impreso y digital existente para generar un marco teórico, así como procedimientos normalizados para las pruebas de laboratorio a realizar.

### Entrevistas con expertos en diversos temas

A lo largo del proceso de investigación se realizaron diversas consultas a profesionales en diversos campos, por ejemplo sobre el uso del

equipo (personeros del MOTP y Humboldt), sobre estadística (Ingeniero Esteban Lemaitre), entre otros.

### Determinación de fuentes de extracción de material usado para compactación

En este punto se consultaron a expertos en geotecnia relacionados especialmente con proyectos carreteros y rellenos de gran tamaño. Asimismo se consultó la biblioteca interna del Centro de Investigaciones en Vivienda y Construcción (CIVCO)

### Información del equipo

Se consultó a la empresa fabricante cuáles son los parámetros a tener en cuenta respecto el uso del EDG, así como los materiales recomendados para generar la base de datos necesaria para este equipo y de esta manera buscar las fuentes de extracción mencionadas en el punto anterior. Se mantuvo contacto con ésta empresa a lo largo de la investigación, debido a que ésta trabaja para la normalización del procedimiento de uso del EDG en conjunto con la ASTM.

### Visitas a campo

Mediante entrevista a los encargados de las fuentes de extracción, se recopiló información sobre las características del material proporcionado, así como su tratamiento y colocación en campo.

# Caracterización de los materiales

Se realizaron consultas a expertos en geotecnia, así como a la empresa fabricante del densímetro eléctrico (Humboldt); para determinar los tipos de suelos más adecuados para realizar la investigación.

Una vez reunida esta información, se contactaron las empresas con explotaciones de agregados y materiales para compactación en el Valle Central, por motivos de cercanía, volumen de material usado, capacidad de control y facilidad de comunicación. Se seleccionaron 5 de ellas para obtener una muestra representativa de los materiales y desarrollar la investigación.

Al tener los contactos con las empresas seleccionadas, se procedió a firmar notas de confidencialidad y colaboración de resultados con las mismas. Es por esta razón que se denominó a las empresas como: Tajo A, Tajo B y así sucesivamente. Es relevante destacar que tres tajos se ubican en la provincia de Cartago, uno en Alajuela y el último en San José.

Todas las pruebas ejecutadas en el laboratorio de Suelos de la Escuela de Ingeniería en Construcción (CECO) se hicieron apegados a la normativa ASTM, tal como es indicado en el procedimiento de cada prueba, para permitir reproducibilidad de los procedimientos usados. El orden de las pruebas se muestra a continuación.

## Muestreo de suelos (ASTM D-75)

Se hicieron visitas a los lugares donde se encuentran los centros de operación de los tajos seleccionados, para realizar el muestreo del material seleccionado; para lo cual el procedimiento fue el siguiente:

### Revisión del plantel

Se revisó visualmente las instalaciones y el tipo de material que se extrae en el tajo, para determinar la uniformidad del proceso de extracción y uniformidad del material.

## Consultas del material a muestrear

Se realizaron consultas al personal encargado del manejo del tajo acerca del tipo de materiales que se extrae en éste, para determinar cuáles eran los más aptos para realizar las pruebas requeridas.

Para este proyecto se buscó que los materiales fueran de una granulometría con baja presencia de partículas gruesas (Límite de 1½ pulgadas), esto para asegurar en el material una adecuada trabajabilidad. No obstante, para proyectos reales se debe muestrear el apilamiento destinado al proyecto a analizar sin importar el tamaño de partícula. Es por esta razón que se buscó analizar materiales destinados a la construcción de bases.

## Acción de muestreo

Debido a que en los tajos las zonas de apilamientos de materiales destinados a comercialización están dentro de las rutas de circulación de maquinaria pesada (cargadores, vagonetas, palas mecánicas, entre otras.), el muestreo de los tajos se realizó mediante un mezclado del apilamiento mediante el uso de un cargador; una vez hecho esto se cargó el vehículo destinado al transporte del material. El mezclado permite que el material muestreado contenga una cantidad representativa de todos los tamaños de partículas presentes en el apilamiento y elimina el efecto de segregación que se presenta en estos montículos

## Cantidad de material

Para efectos de realizar la totalidad de pruebas necesarias para el proyecto, se muestreo una cantidad de material que se encontraba entre 0.8 m<sup>3</sup> y 1 m<sup>3</sup> por cada material muestreado.

Siguiendo el procedimiento citado se logró obtener una muestra representativa del material. Esto permitió realizar las pruebas subsecuentes con un material muy similar o idéntico al que se puede encontrar en el campo, lo cual fue importante, pues el EDG es sensible a los cambios en la granulometría de los materiales.

## Cuarteo (ASTM C-702)

La muestra obtenida de cada tajo se mezcló y homogenizó para colocarla en sacos de nylon; esto por limitación de espacio y orden del laboratorio.

De la totalidad de sacos, se seleccionaron 4 al azar y se esparcieron sobre una lona. El material se mezcló y se formó un rectángulo que se partió en cuartos, dos de estos cuartos resultantes (en diagonal) son eliminados del proceso. La acción mencionada es realizada hasta obtener la cantidad de material necesaria para las pruebas a realizar.

El procedimiento descrito permitió mantener una granulometría con poca variación al seleccionar una muestra del total del material tomado de las fuentes de extracción de materiales para compactar.

## Granulometría (Finos – Gruesos) (ASTM C-136, ASTM C-117)

El análisis granulométrico de los materiales usados fue importante, porque permitió determinar la distribución de los tamaños de partículas en los suelos usados; como ya se mencionó, éste es un factor que puede alterar las mediciones del EDG. El conocer y tener control sobre él permite una mayor certeza de los resultados de las pruebas. Además es un factor importante en el proceso de clasificación de suelos.

El proceso de cuarteo se realiza hasta tener entre 100kg y 150 kg de material; éste material se tamiza en la malla N° 4 (4.75 mm de apertura). Se deben deshacer los grumos de material con un mazo de hule. El retenido en esta malla se denomina como la parte gruesa del mismo (grava) y la parte del material que pasa es llamada parte fina del suelo (arena y finos).

Para realizar esta actividad se deben tener todas las bandejas o utensilios para retención temporal de los materiales previamente pesados y limpios.

## Lavado de la porción gruesa del suelo.

Del total del material retenido en la malla N° 4 se requieren entre 8kg y 12 kg. este peso se obtiene mediante el uso de un divisor, con el cual la muestra se va partiendo en mitades representativas del total del material analizado.

Una vez obtenida la cantidad de material requerida, se deposita la muestra en una bandeja previamente pesada y se pesa junto a la muestra de suelo. Este material se pone en un horno a una temperatura constante de  $110^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$ , (hasta lograr peso constante) durante 24 horas. Transcurrido este periodo se saca la muestra del horno, se deja enfriar y se pesa. Ésta prueba se realiza para materiales que estén sucios o bien tengan trazas de finos adheridos a su superficie. Con los datos obtenidos se calcula el porcentaje de humedad que contiene el material como (%w):

$$\% w = \frac{W_w}{W_{ms}} = \frac{W_{mt} - W_{ms}}{W_{ms}}$$

Donde:

Ww: peso del agua

Wmt: peso del material en estado natural

Wms: Peso del material seco

Seguidamente se coloca el material en una bandeja donde se deja reposando sumergido en agua durante algunos minutos y se deshacen los grumos presentes. Mediante un aspersor y usando la malla N° 4 se lava la totalidad de la muestra.

Una vez terminado el lavado se vuelve a poner la muestra en un horno a  $110^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$  (hasta lograr peso constante) durante 24 horas y se vuelve a pesar para determinar la cantidad de muestra perdida en el lavado.

## Lavado de la porción fina del suelo.

Para realizar esta prueba a partir del porcentaje pasando la malla N° 4, se requieren alrededor de 500 g de este material. De igual forma que en la parte gruesa, se usa un divisor mecánico (en este caso para finos), hasta obtener la cantidad necesaria o muy cercana.

Se pone la muestra en una bandeja (previamente pesada) y se introduce en un horno durante 24 horas a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  (hasta lograr peso constante). Luego de este lapso se enfría y pesa la muestra; esto para determinar el contenido de humedad de la parte fina del material, de igual forma que se hizo para la parte gruesa.

Seguidamente se hace el lavado de los finos y luego se coloca el material en un recipiente metálico y se le añade agua; con la palma de la mano y mediante movimientos circulares se fricciona el material contra las paredes y el fondo del recipiente.

El agua turbia resultante de éste procedimiento se cola por las mallas Nº 20 y Nº 200. Éste procedimiento se realiza hasta que el agua resultante sea clara y limpia.

El material retenido en la malla Nº 20 es devuelto a la muestra, así como el retenido en la malla Nº 200, y la muestra resultante del lavado es colocada en una bandeja donde será secada a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  (hasta lograr peso constante) durante 24 horas y se pesa.

## Análisis mecánico del material

Este análisis es, a grandes rasgos, la determinación del rango del tamaño de las partículas presentes en un suelo, expresado como porcentaje del peso seco total.

Una vez lavadas y secas en un horno las muestras (tanto la parte gruesa como la fina), son mezcladas en una bandeja y se tamizan por las siguientes mallas:

Malla	Apertura (mm)
3''	75
2''	50
1.5''	38
1''	25
¾''	19
3/8''	9,5
Nº 4	4,75
Nº 10	2
Nº 20	0,84
Nº 40	0,43
Nº 100	0,149

Nº 200	0,075
Charola	-

Se debe corroborar que el porcentaje de error entre los pesos no sobrepase el 0.3%. Posteriormente se calcula el porcentaje retenido en cada malla:

$$\% \text{ Ret} = \frac{\text{Peso}_{\text{retenido en malla}}}{\text{suma de pesos retenidos}}$$

Una vez calculados los porcentajes retenidos se calculan los porcentajes retenidos acumulados, sumando al retenido en cada malla el de las anteriores.

Seguidamente se calcula el porcentaje pasando, como se muestra seguidamente:

$$\% \text{ Pasando} = 100 - \% \text{ retenido acumulado}$$

La curva granulométrica se obtiene de expresar en el eje de las abscisas las aberturas de las mallas usadas en el tamizaje (en milímetros usando escala logarítmica) y en el eje de las ordenadas el %Pasando en escala normal.

## Límites de Atterberg (ASTM D-4318)

La determinación de las humedades que caracterizan estos límites es importante pues permiten determinar si los finos que contienen el material son altamente absorbentes o lo contrario a esto. Permite determinar el comportamiento del los materiales al adicionarles agua; además es un parámetro importante para la clasificaciones de suelos que requiere el EDG para completar la información del suelo analizado

## Límite Plástico (LP)

Del material pasando la malla Nº 4 y mediante el uso del divisor para finos se fracciona el material hasta obtener aproximadamente 1500g.

Este material es molido ligeramente con la ayuda de un mortero y un recipiente de porcelana y se tamiza en la malla Nº 40. Se recomienda obtener un peso cercano a los 500g de material pasando dicha malla.

Se toman 200g de material y se le adiciona agua hasta lograr una consistencia del material que soporte 50 golpes o más en la Copa Casagrande a un ritmo de 2 golpes por segundo, logrando que la abertura se cierre ½ pulgada (1.27 cm), buscando en el suelo una consistencia pastosa. Al lograr esto se toma una fracción de 50 gramos, que a su vez se divide en tres porciones, que son pesadas y colocadas en cápsulas previamente pesadas.

Sobre un vidrio de superficie porosa se trata de formar rollitos de 3 milímetros de diámetro y de una longitud entre 5 y 10 mm. La cantidad de rollitos que se pudo formar con estas características se pone en la cápsula correspondiente a esa porción y se seca en un horno a 110 ° C ± 5° C durante 24 horas. Con las porciones restantes se realiza el mismo procedimiento. Se pesan las muestras secas y se calcula el porcentaje de humedad que posee el suelo en las tres muestras y se promedian. Este promedio representa el límite plástico del material.

## Límite líquido (LL)

De los 150g restantes de los 200g usados en la prueba para la determinación del límite plástico del suelo, se les continúa agregando agua en cantidades controladas. Se debe lograr quedar en los siguientes parámetros de golpes con la Copa Casagrande para que la abertura de 2 mm entre los taludes creados con el separador se cierren:

40	–	30
golpes		
30	–	25
golpes		
25	–	20
golpes		
15	–	20
golpes		

Una vez que se logró el número de golpes dentro de cada rango establecido (que cierre en ½” la abertura), se toma una muestra del suelo de la copa Casagrande, precisamente en el tramo de ½ pulgada (1.27 cm) que se cerró por los golpes y se coloca en una cápsula (con peso determinado) y se mete al horno a 110 ° C ± 5° C por 24 horas.

Se pesan las cápsulas con el material seco, se determina la humedad correspondiente a cada rango de golpes, y se genera un grafico donde en el eje de las abscisas se grafica el número de golpes y en el eje de las ordenadas el porcentaje de humedad (en escala logarítmica); en este grafico se determina la humedad para la cual la abertura se cierra con 25 golpes, y ese valor de humedad representa el límite líquido del suelo analizado.

## Índice de plasticidad (IP)

Este valor se obtiene mediante la resta del límite líquido menos el límite plástico. Este valor se utilizó para ingresar, junto con el LL, en la carta de plasticidad, para determinar el tipo de material fino que contiene el suelo (Limos, arcillas, turbas etc.).

$$IP = LL - LP$$

## Clasificación de suelos (ASTM D-2487)

La clasificación de los materiales según el sistema SUCS permite ingresar estos datos a las bases de datos del EDG, por lo que es uno de los datos más importantes obtenidos del análisis de los materiales usados en el proyecto. Además, con la clasificación de los materiales es posible hacer algunas inferencias sobre su capacidad de drenaje, y algunas propiedades mecánicas.

Como se mencionó en el Marco Teórico, existen varios sistemas de clasificación, más para fines de este proyecto se clasificaron los suelos siguiendo el procedimiento del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos mostrado seguidamente.

La metodología de clasificación consiste en la determinación de los límites del tamaño de tamices calibrados (mallas) cuyas aberturas varían desde 10.16 cm. (4 pulg.) hasta 0.075mm. El proceso de clasificación siguió los siguientes pasos:

- Descartar que el suelo sea una turba (Pt).

Mediante una inspección preliminar se debe constatar que el material a usar no contenga

materia orgánica en abundancia, o bien que presente características que hagan evidenciar esta situación, como por ejemplo un olor a descomposición de material orgánico, o un color negro intenso.

- Determinar si el suelo es FINO o GRANULAR:

El porcentaje de finos (pasando malla N° 200) que contiene el suelo analizado se determina mediante dos procedimientos.

1. Primeramente con la actividad de lavado que se mencionó anteriormente (tanto el de gruesos hecho por la malla N° 4 y el de finos por la malla N° 200).
2. Mediante el análisis mecánico del suelo se analiza la cantidad de la muestra que pasa ésta malla.

Los pesos de los materiales de la pérdida del lavado y el retenido en la charola se suman y se calcula el porcentaje de material que pasa la malla N° 200.

Una vez determinado este valor se analiza y clasifica al suelo siguiendo los siguientes criterios:

El criterio que establece el SUCS es:

- Si el % pasando la malla N° 200 < 50% el suelos es Granular
- Si el % pasando la malla N° 200 ≥ 50% el suelo es Fino

En el caso de las muestras analizadas es necesario determinar si es una Grava (Grave) o una Arena (Sand). Para lograr esta diferenciación se debe determinar la cantidad de material retenido en la malla N° 4 en la prueba de análisis mecánico del suelo.

El sistema SUCS establece que:

- Si el porcentaje de material retenido en la malla N° 4 es mayor al 50% el material se clasifica como Grava (G)
- O por el contrario, si el porcentaje de material retenido es menor o igual al 50% el suelo se clasifica como Arena (S)

Una vez clasificado el material como arena o grava, se precede a determinar la cantidad de finos (pasando malla N° 200) que éste contiene en su granulometría.

Este dato se obtiene del análisis mecánico del suelo; el porcentaje de material que pasa la malla N° 200 establece tres rangos de clasificación, según sea el contenido de finos en un suelo.

- Pasando malla N° 200 < 5%: para éste caso la muestra de material analizada se clasifica como LIMPIO.
- %5 ≤ Pasando malla N° 200 ≤ 12%: para este caso la muestra de material analizada se clasifica como INTERMEDIO (medianamente contaminado con finos).
- Pasando malla N° 200 > 12%: si el contenido de finos es mayor al 12% el material se considera como SUCIO (contaminado con finos).

Seguidamente se debe determinar el tipo de finos que están presentes en la granulometría de la muestra de suelo analizada.

Con los porcentajes de humedad que representan al Límite Plástico (LP) y al Límite Líquido (LL), se calcula el índice de Plasticidad (IP). Con estos datos se ingresa en la carta de plasticidad.

En esta grafica la “línea B” es la frontera entre los finos de baja y alta plasticidad. La “línea A” la separación entre limos y arcillas, por lo que se puede determinar el tipo de finos con los que está contaminado el material (Arcilla o limos de baja o alta plasticidad).

Las características o propiedades mecánicas se ven influenciadas en gran medida por la distribución del tamaño de las partículas del suelo, por lo que es necesario estimar, con ayuda de la curva granulométrica, si existe concentración de tamaños de partículas en ella.

Esto se logra con el cálculo del coeficiente de uniformidad (Cu) y el coeficiente de curvatura (Cc) de la siguiente manera:

El coeficiente de uniformidad se calcula

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

como  $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ ; donde D60 es el diámetro de las partículas en el cual el 60% del material pasa; de igual manera D10 es el diámetro de las partículas del suelo por el cual pasa un 10% del total de la muestra analizada.

El coeficiente de curvatura se calcula como

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

, donde de igual manera la

formula indica los diámetros a los cuales el subíndice muestra el porcentaje que debe estar pasando.

El método del sistema de clasificación de suelos SUCS tiene los siguientes criterios, a partir de éstos coeficientes, que permiten describir la granulometría de un suelo y definirlo como bien o mal graduado.

Coeficiente de uniformidad:

- $C_u < 3$ : se considera que el suelo es “muy uniforme”
- $C_u \leq 4$ : se dice que el suelo es “uniforme”.
- $C_u > 6$ : indica que el suelo es “bien graduado”, esto si se está hablando de una arena
- $C_u > 4$ ; muestra que el suelo es “bien graduado” si el suelo que se está analizando es una grava.

Coeficiente de curvatura:

- $1 < C_c < 3$ : se considera que el suelos es bien graduado, esto aplica tanto para arenas y gravas
- $C_c > 4$ : indica que el suelo analizado es uniforme.

Para que un suelo sea clasificado como bien graduado, es indispensable que tanto el  $C_u$  como el  $C_c$  lo denoten como tal. Si uno de los coeficientes no lo caracterice así, el material es clasificado como “Pobre (mal graduado)”

## Proctor modificado (ASTM D-1557)

La determinación de la densidad seca máxima y la humedad óptima de cada material analizado para éste proyecto fue de trascendental importancia, pues el EDG usa estos valores para presentar los resultados de grado de compactación, además de que son datos importantes para la generación de los modelos de suelo y de los sitios de trabajo, requeridos para comparar los dos métodos de medición estudiados en este proyecto.

Del total de material tamizado por la malla N° 4 para la prueba de granulometría, la parte del

material que pasa por esta malla es guardado y pesado para cálculos posteriores.

El material que es retenido en la malla N° 4 (y luego de haber tomado la muestra requerida para la prueba de granulometría del material), es tamizado por las mallas

Malla	Abertura (mm)
2"	25 mm
$\frac{3}{4}$ "	19 mm

El material retenido en la malla 2" es desechado y no se considera en los cálculos posteriores.

El material retenido en la malla  $\frac{3}{4}$ " así como el pasando esta malla son colocados en bandejas previamente pesadas con el fin de determinar certeramente la cantidad de cada tamaño de partícula del material.

Estos pesos son requeridos para determinar la cantidad de material correspondiente a finos y gruesos que componen el punto de proctor modificado, tal como se muestra:

CUADRO 3: ENSAYO DE COMPACTACIÓN EN LABORATORIO		
Material	Tipo de material	Porcentaje (%)
Retenido malla 2"	Se elimina este material	
Retenido malla $\frac{3}{4}$ "	Grueso	Peso sumado de estas mallas entre el total del peso de la muestra
Pasando malla $\frac{3}{4}$ "		
Pasando malla N° 4	Fino	Peso de pasando malla N° 4 entre total del peso de la muestra.

Para esta prueba en específico se prepararon puntos del material a evaluar con un peso de 7500 g, los cuales están compuestos por las cantidades de material que representan los porcentajes antes descritos en el cuadro anterior.

El porcentaje de finos es tomado completamente del material pasando la malla N° 4, y en el caso de la parte de gruesos que compone el punto, se toma del material pasando la malla  $\frac{3}{4}$ ".



Una vez definido la cantidad de finos y gruesos por cada punto, se prepararon seis de estos para realizar el ensayo, buscando lograr un punto de humedad óptima, dos puntos con humedades sobre la óptima y dos bajo la misma; dejando un punto extra en caso de un error en un punto determinado.

El material se debe mantener a humedad natural (la que contiene en el momento del muestreo). Para lograr este cometido se guardan los puntos del material en bolsas plásticas debidamente etiquetadas y cerradas adecuadamente. Cada punto se compone de una fracción fina y una gruesa almacenados por separado.

Según la distribución de finos y gruesos en un material, la norma establece tres procedimientos para realizar la prueba. Para este proyecto se utilizó el procedimiento "D" tipificado en la norma ASTM D 1557.

Para iniciar la prueba del proctor modificado se deben corroborar previamente las medidas del molde a usar por medio de un Vernier.

- Se realizan tres medidas diametrales en tres puntos diferentes del molde y se promedian.
- Se realizan tres medidas de la altura en tres lugares diferentes y se promedian.
- Con las medidas tomadas se debe recalcular el volumen del molde para el cálculo de las densidades.

De igual manera se debe revisar el funcionamiento del mazo a usar (que el interior del mazo este limpio y el movimiento de caída se dé libremente; sin trabarse).

Ejecución de la prueba:

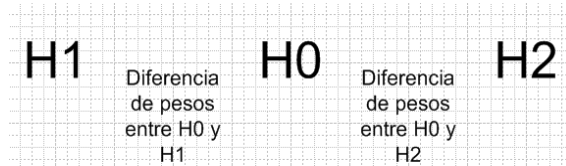
1. Se toma un punto del material (porción de materiales finos y gruesos descritos anteriormente) y se mezcla en una bandeja hasta que el material se vea homogéneamente distribuido.
2. Al primer punto del material se le adiciona agua (de manera controlada) hasta lograr que el material se encuentre en un punto cercano a la humedad óptima. (se dice que esto se logra cuando el material forma un grumo con la fuerza de la mano y no se desintegra fácilmente). Con la cantidad de agua determinada agregada al primer punto, y en base al procedimiento de clasificación de

suelos realizada previamente, se tienen dos rangos para aumentar o disminuir la humedad en los puntos posteriores. (Nota: los porcentajes que describen estos rangos, deben ser calculados respecto a los 7500g que componen el punto).

- Materiales granulares: 1,5%-2%
  - Materiales con gran presencia de finos en su granulometría: 2%-3%
3. Luego de añadir el agua correspondiente, según sea el caso presentado, se mezcla el material hasta lograr que este se observe con una distribución de la humedad uniforme; se deja reposar el material por un periodo de 10 minutos, los cuales se deben respetar para lograr una estabilización interna de la humedad del material.
  4. Se toma una muestra de aproximadamente un kilogramo de material de cada punto, se coloca en una bandeja previamente pesada, se pesa la bandeja con la muestra y se introduce en un horno durante 24 horas a una temperatura de secado de  $110^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , para posteriormente pesarlo y determinar el contenido de humedad de cada punto realizado.
  5. Se coloca el material en el molde de 6" de diámetro y 4" de altura, procurando lograr alturas de capas que permitan llenar el molde con 5 estratos de 0.8" cada uno aproximadamente.
  6. A cada capa se le aplican la cantidad de 56 golpes. Estos golpes se inician cerca del borde del molde y se van acercando al centro del mismo, creando un patrón de distribución similar a una espiral. Cuando se golpea el centro se realiza el mismo procedimiento pero a la inversa (del centro a los extremos).
  7. Cuando se han compactado las 5 capas de suelo, se coloca el molde en una bandeja limpia, se quita el collar o anillo protector del borde del molde y se enrasa el material que sobresale a esta línea. El enrasado se debe realizar con una platina o instrumento lo suficientemente rígido y recto como para dejar una superficie plana al finalizar esta actividad. Los vacíos que crea el enrasado se rellenan con material fino sobrante en la bandeja donde está el material preparado al inicio de la prueba.
  8. Se limpia el molde del suelo residual del enrasado y se pesa en la balanza granataria.

- Se extrae del molde el suelo compactado se limpia y prepara para la prueba siguiente.

Para determinar el comportamiento del suelo al quitarle o agregarle agua respecto al punto "óptimo", se realiza un sencillo cálculo para determinar si el peso del molde con el suelo compactado aumenta o disminuye en el desarrollo de la prueba.



Donde:

H0: humedad óptima estimada

H1: humedad menor a la óptima estimada

H2: humedad mayor a la óptima estimada

Usando el peso obtenido en la humedad óptima estimada, se hacen diferencias de peso entre los diferentes pesos obtenidos al variar las humedades de los puntos realizados.

Usando la humedad óptima estimada como parámetro de comparación se debe cumplir que el peso de los puntos subsecuentes debe disminuir; de no ser así es necesario determinar si es necesario realizar más puntos húmedos o secos según sea el caso.

Terminada la fase de laboratorio es necesario realizar los siguientes cálculos para determinar la densidad seca máxima y la humedad óptima.

- Volumen real del molde usado

$$V_{molde} = \left(\overline{D^2}\right) * \frac{\Pi}{4} * \overline{H}$$

Donde D y H, son los promedios de las medidas de diámetro y altura tomadas del molde usado.

- Porcentaje de humedad de cada punto

$$\% w = \frac{W_{MH} - W_{MS}}{W_{MS}} * 100$$

Donde:

$W_{MH}$ : Peso de la muestra húmeda (sin bandeja)

$W_{MS}$ : Peso de la muestra seca (sin bandeja)

- Peso seco de suelo compactado

$$W_{SC} = W_{SC+Molde} - W_{Molde}$$

Donde:

$W_{SC}$ : es el peso seco del suelo compactado

$W_{SC+Molde}$ : Peso del suelo seco compactado más molde.

$W_{Molde}$ : peso del molde

- Densidad húmeda ( $\rho_T$ )

$$\rho_T = \frac{W_{HC}}{V_{molde}}$$

- Densidad seca ( $\rho_s$ )

$$\rho_s = \frac{\rho_T}{1 + \% w}$$

Posteriormente se grafican los valores de densidad seca vrs contenido de humedad, para determinar, mediante este medio, la densidad seca máxima y la humedad óptima del material analizado, los cuales son requeridos por el EDG para su funcionamiento.

## Chequeo de compactación en campo (Cono de arena) (ASTM D-1556)

La realización de esta prueba fue de suma importancia para la elaboración de este proyecto, debido a que fue la prueba normada que por las condiciones de accesibilidad de equipo y conocimiento de la prueba, se usó como patrón de comparación para las mediciones hechas por el EDG. Y no menos importante es el hecho de que el EDG requiere los resultados de densidad húmeda y humedad para cada punto de los modelos de suelos creados para cada material, por lo que esos datos provinieron de la prueba de cono de arena.

La prueba del cono de arena se usa para determinar el grado de compactación de un material en sitio, así como el porcentaje de humedad que presenta éste en el campo.

Primeramente se debe seleccionar un tipo de arena sílica de la cual su densidad sea conocida, pues este dato es trascendental para cálculos posteriores. Se deben pesar 5 bolsas de 5 kg con este material.

Este material se utiliza para llenar el envase del cono de arena a la hora de realizar la prueba.

Se debe ubicar el lugar donde se quiere realizar la prueba, donde coloca la placa con la abertura estándar para esta prueba. El sitio debe estar libre de tránsito de vehículos y se debe evitar realizar la prueba cuando este lloviendo.

Se posicionan las pies sobre la placa (éstos no se deben mover hasta finalizada la prueba). Con un cincel se marca todo el borde de la placa para determinar si ésta se mueve de su ubicación inicial.

Con cincel y mazo se excava el material compactado tratando de hacerlo manteniendo la forma de la abertura de la placa (abertura circular); el material que se extrae se coloca en una bolsa plástica para evitar la pérdida de humedad. La actividad se repite hasta que el hoyo tiene una profundidad de entre 4" y 6". Se debe procurar que el hoyo mantenga una sección lo más constante posible, y que el fondo de la abertura esté lo más plano y libre de material posible.

Una vez concluida la excavación de la abertura se coloca el envase con el cono y se abre la llave para que la arena llene el hoyo. Cuando la arena se deja de mover, se cierra la llave y se pueden retirar los pies de la placa. El sobrante de arena es colocado en una bolsa plástica, y tanto el material extraído como el sobrante de arena son etiquetados siguiendo el orden de las pruebas realizadas.

Terminada esta labor en el laboratorio se deben pesar el material extraído y el sobrante correspondiente a cada punto. Las bandejas en las que se deposita el suelo deben estar previamente pesadas e identificadas. Se introduce el suelo al horno durante 24 horas a una temperatura de secado de  $110^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y se pesa el material seco con la bandeja.

El volumen del cono debe estar calibrado y previamente determinado.

Posterior a esto se deben realizar los siguientes cálculos:

1. Volumen de hueco y cono

$$V_{\text{Hueco+cono}} = \frac{(5000g - \text{Sobrantearena})}{\rho_{\text{arena}}} * 1000$$

2. Contenido de humedad de cada punto

$$\% w = \frac{W_{MH} - W_{MS}}{W_{MS}} * 100$$

3. Volumen del hueco

$$V_{\text{hueco}} = V_{\text{hueco+cono}} - V_{\text{cono}}$$

4. Densidad húmeda ( $\rho_T$ )

$$\rho_T = \frac{W_{SH}}{V_{\text{hueco}}} * 1000$$

5. Densidad seca ( $\rho_S$ )

$$\rho_S = \frac{\rho_T}{1 + \% w}$$

ó

$$\rho_S = \frac{W_{SC}}{V_{\text{hueco}}} * 1000$$

• Grado de compactación

$$\% \text{Compactación} = \frac{\rho_s}{\rho_{\text{smáx}}} * 100$$

De esta forma se determina el grado de compactación en campo.

## Generación de modelos de suelos

### Equipo usado

Debido a que no existe un procedimiento especificado para la realización de esta prueba, fue necesario crear una serie de artefactos para

poder realizar la misma, tal como se amplía a continuación.



Figura 15: Molde de madera creado para construir modelos de suelo.



Figura 16: Mazo creado para compactar los modelos de suelo.



Figura 17: Molde de Rib-lock para compactar.

El primer paso para elaborar los modelos de suelo requeridos por el EDG (Electrical Density Gauge), es construir un molde del tamaño adecuado (mínimo 15" de diámetro) y de un material con baja o nula conductividad de electricidad, y que a la vez no absorba la humedad de los suelos que se vayan a compactar en él.

En este caso se usó un tubo de rib-lock de 16" de diámetro interno, el cual se cortó en tramos de 25 cm de altura. Se elaboraron 6 de estos cilindros y se marcaron internamente de manera que quedarán divididos en 3 secciones de similar altura.<sup>7</sup>

Se construyó un collar para proteger los bordes de la tubería y para permitir un posterior enrazado del material, emulando el procedimiento de la prueba de Proctor.

El suelo, a compactar dentro de los moldes se estibó en un montículo, se homogenizó y cubrió con una lona o membrana que le permita mantener la humedad constante.

Para determinar la cantidad de suelo que debe compactarse en cada molde, se realizó una relación entre el volumen del molde usado en la prueba de proctor modificado y el peso seco máximo obtenido en esta prueba, con el volumen del cilindro de rib-lock, y se determinó el peso de suelo seco necesario para alcanzar un grado de compactación igual o cercano al máximo obtenido en el proctor modificado.

$$W_{SSm\acute{a}x} = \rho_{Sm\acute{a}x} * V_{cilindrorb-lock}$$

Donde:

$W_{SSm\acute{a}x}$ : peso suelo seco máximo

$\rho_{Sm\acute{a}x}$ : Densidad seca máxima del material

Para determinar el peso real de suelo necesario para la prueba, se debe conocer la humedad natural del suelo en el apilamiento que se tiene. Se toma una muestra de entre 1kg y 2kg de material y se determina el porcentaje de humedad que posee el material, tal como se ha descrito en las secciones anteriores.

$$W_{RS} = W_{SSm\acute{a}x} * (1 + \%w_{natural})$$

Donde

$W_{RS}$ : peso real de suelo

<sup>7</sup> Laboratorio de suelos del MOPT

Este peso total se debe dividir en tres porciones idénticas para las tres capas de suelo con que se planeó llenar el molde de rib-lock.

Para determinar la cantidad de agua a añadir, se usa como referencia la humedad óptima obtenida en la prueba de proctor modificado. Por lo tanto, al igual que en esa prueba, se busca que el primer punto a analizar se encuentre muy cercano a la humedad óptima y la densidad máxima.

$$Agua(cc) = \% w_{\text{óptima}} - \% w_{\text{natural}}$$

Para los puntos posteriores se utilizaron dos límites para aumentar o disminuir la cantidad de agua añadida a los materiales.

- Materiales arenosos: de 1% a 1.5%
- Materiales con un gran cantidad de finos en su granulometría: de 2% a 2.5%

Estos porcentajes, al igual que en el proctor modificado, se calculan respecto el peso seco usado como patrón en este caso. Al igual que en el caso del suelo a usar, el agua se debe dividir entre las tres capas a colocar.

Se debe buscar obtener un punto con la humedad óptima, uno sobre y otro debajo de ésta.

Definidos estos parámetros el orden de la prueba es:

- Con una balanza que tenga la capacidad para pesos superiores a 25 kg, se pesa una bandeja lo bastante amplia como para mezclar la totalidad del suelo que compone una capa.
- Luego de esto, se pesa el material e inmediatamente se le adiciona el agua requerida y se mezcla hasta lograr una adecuada distribución de la humedad dentro del suelo.
- El molde debe ser colocado sobre una superficie sólida y rígida, además esta superficie no debe absorber la humedad del material (se puede colocar una lona o material impermeable para evitar el escape y absorción de humedad por el ambiente.).
- Se coloca el material dentro del molde de rib-lock y se compacta hasta lograr que éste llegue a la marca previamente hecha para cada capa.

- El pisón o mazo usado se construyó respetando la relación de áreas que se usa para la prueba de proctor modificado, obteniéndose un diámetro de:  $D_{\text{pisón}}=13.5\text{cm}$ .
- El proceso de compactación se debe llevar a cabo siguiendo el mismo patrón de espiral descrito para el proctor modificado.

## Creación de modelos de suelos en EDG

Una vez compactado el suelo se procede a realizar la prueba con el EDG, como sigue:

1. Encender el EDG y esperar que el sistema inicie
2. Si el modelo de suelo no se ha creado se selecciona la opción SOIL MODELS, se presiona SELECT, y se escoge la opción CREATE A NEW SOIL MODEL; se presiona SELECT. Se le asigna un nombre al nuevo modelo de suelo y se guarda en la memoria interna del equipo.

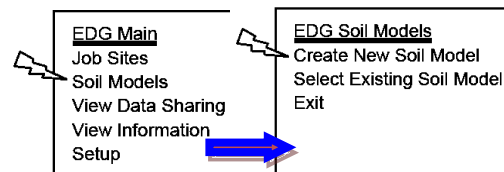


Figura 18: Secuencia de pasos para creación de modelos de suelos

3. Luego se escoge la opción SELECT EXISTING SOIL MODEL y se escoge el modelo de suelo que se creó anteriormente.

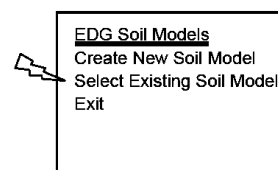


Figura 19: Secuencia de pasos para creación de modelos de suelo

4. Se coloca la base del EDG y se clava un dardo en el suelo compactado en cada ranura que esta tiene.
5. Se coloca la base del sensor de suelo en el centro de la base del EDG y a la vez se unen a este sensor dos prensas metálicas a los

dardos alternando posiciones. Adicional a esto se debe conectar e introducir en el suelo el sensor de temperatura, para una mayor certeza en las mediciones.

- En la pantalla del EDG se selecciona la opción CREATE A NEW SOIL TEST, cuando las prensas metálicas están conectadas a los dardos en la posición A-A, se presiona la tecla EDG, luego se cambian las prensas a los dos dardos restantes (posición B-B) y se vuelve a presionar la tecla EDG. El equipo guarda la medición en su memoria interna y vuelve a la pantalla donde se selecciona nuevamente CREATE A NEW SOIL TEST. La operación se repite hasta terminar las mediciones necesarias.

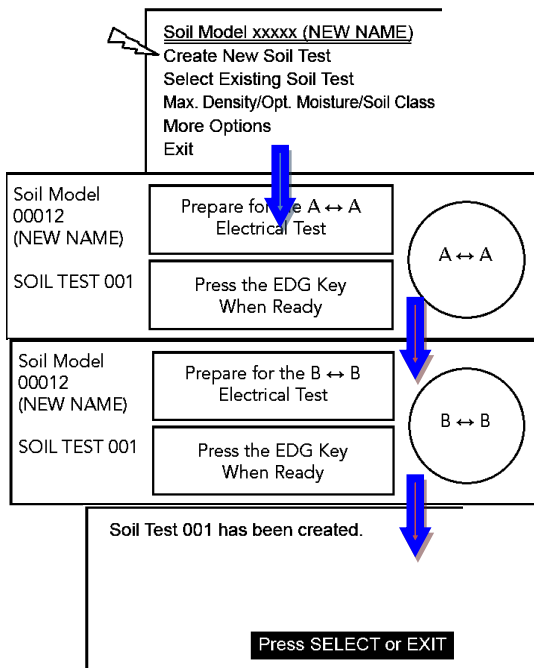


Figura 20: Secuencia de pasos para creación de modelos de suelo

- Luego de realizar la medición con el EDG se realiza la prueba de cono de arena justo en el centro de donde se realizó la medición. Se calculan el contenido de humedad y la densidad húmeda y seca de cada punto medido.
- El equipo necesita que estos datos sean ingresados para completar el modelo de suelo. En la opción SOIL MODELS se escoge la opción (presionando la tecla SELECT.) SELECT AN EXISTING SOIL MODEL, se

selecciona el modelo de suelo correspondiente a los datos a ingresar. Al seleccionar el modelo de suelo correcto, aparecen las mediciones realizadas, se presiona SELECT sobre cada una de ellas y se introducen los valores de densidad húmeda y contenido de humedad de cada punto escogiendo la opción PHYSICAL DATA.

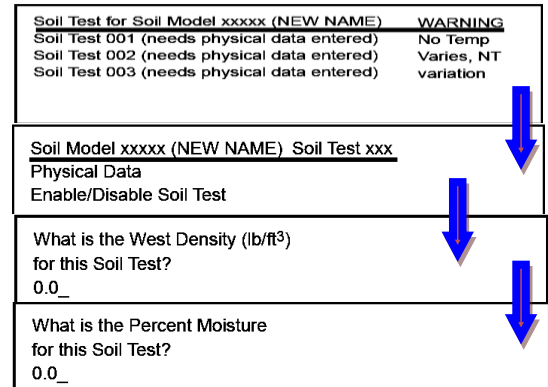


Figura 21: Secuencia de pasos para creación de modelos de suelo

- Para completar el modelo de suelo es necesario llenar los espacios de densidad seca máxima, humedad óptima y clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Esto se hace escogiendo el modelo de suelo correspondiente y seleccionando la opción MAX DENSITY/ OPT. MOISTURE / SOIL CLASSIFICATION.

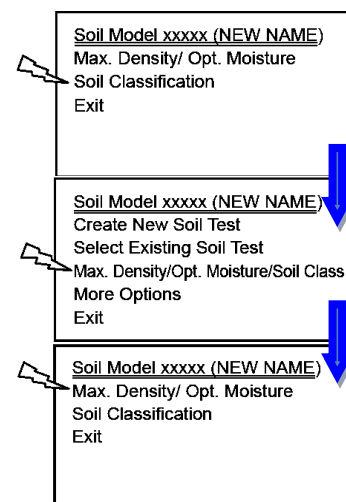


Figura 22: Secuencia de pasos para creación de modelos de suelo

## Factor interno de ajuste (FIT)

Es importante recalcar que el modelo de suelo debe cumplir con un factor de ajuste interno (FIT) mínimo a  $FIT = 0.7$ , para que al momento de ser usado el equipo para medir las densidades en campo de ese suelo en específico y asociarlas a ese modelo de suelo, el equipo pueda dar resultados confiables.

# Creación de sitios de trabajo

Posteriormente se procedió a realizar las pruebas de campo, pero surgió la limitante de no estar en ejecución proyectos en los cuales se estuviera usando el suelo analizado. Es por este motivo que se recurrió a generar los JOB SITES (sitios de trabajo) siguiendo el mismo procedimiento que se uso para generar los SOIL MODELS (modelos de suelo). El suelo se compactó en tres capas, sólo que para este caso se trato de **mantener un contenido de humedad constante** entre los puntos a analizar, para simular las condiciones de compactación en campo.

## Medición con el EDG

1. Encender el EDG y esperar que el sistema inicie
2. Si el sitio de trabajo no se ha creado se selecciona la opción SOIL MODEL y se presiona SELECT. Se escoge la opción CREATE NEW JOB SITE; se presiona SELECT. Se le asigna un nombre al nuevo modelo de suelo y se guarda en la memoria interna del equipo.

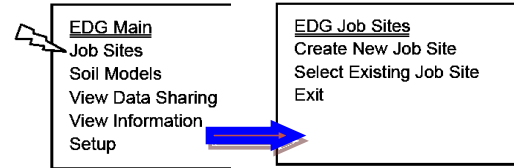


Figura 23: Secuencia de pasos para creación de sitios de trabajo

3. **Luego se escoge la** opción SELECT AN EXISTING JOB SITE y se escoge el modelo de suelo que se creó anteriormente.
4. Se coloca la base del EDG y se clava un dardo en el suelo compactado en cada ranura que esta tiene.
5. Se coloca la base del sensor de suelo en el centro de la base del EDG y a la vez se unen a este sensor dos prensas metálicas a los dardos alternando posiciones. Adicional a esto se debe conectar e introducir en el suelo el sensor de temperatura para una mayor certeza en las mediciones.
6. En la pantalla del EDG se selecciona la opción PERFORM EDG TESTING. Cuando las prensas metálicas están conectadas a los dardos en la posición A-A, se presiona la tecla EDG, luego se cambia las prensas a los dos dardos restantes (posición B-B) y se vuelve a presionar la tecla EDG. El equipo guarda la medición en su memoria interna y vuelve a la pantalla donde se selecciona nuevamente CREATE A NEW SOIL TEST. La operación se repite hasta terminar las mediciones necesarias.

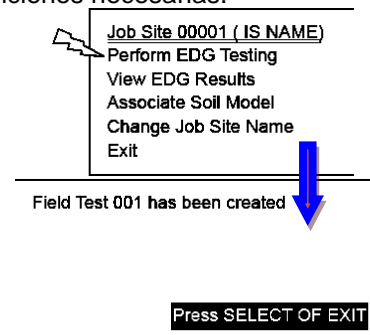


Figura 24: Secuencia de pasos para creación de sitios de trabajo

7. En este momento el equipo está en capacidad de brindar instantáneamente los resultados de compactación y humedad del punto analizado. Para que sea así se debe asociar el JOB SITE al modelo de suelo correspondiente al suelo analizado. Al

ingresar al JOB SITE correspondiente se elige la opción ASSOCIATE TO A SOIL MODEL, donde se escoge el modelo de suelo correspondiente al suelo analizado en el SOIL MODEL.

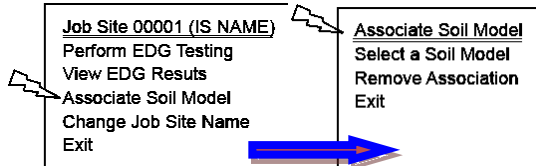


Figura 25: Secuencia de pasos para creación de sitios de trabajo

La prueba del cono de arena se realiza en el centro de donde se hizo la medición con el EDG. El cono de arena se ejecuta tal como se describió anteriormente en esta sección, y se determinan las densidades secas y húmedas de los puntos realizados, así como el contenido de humedad de cada uno de ellos.

## Análisis estadístico

La comparación de los métodos para medir la compactación de suelos consiste en un análisis estadístico.

Primeramente se realizó un análisis de la prueba realizada tanto del EDG como la del cono de arena, y luego entre ambas mediante el procedimiento de análisis estadístico para comparación de pruebas interlaboratorio de la AMRL (AASHTO MATERIALS REFERENCE LABORATORY).

Se siguió el procedimiento a continuación mostrado:

- Revisión de las pruebas por separado

En las pruebas realizadas se miden dos parámetros: densidad y humedad. Para cada uno de ellos se debe calcular la desviación estándar y el promedio de los datos.

### 1. Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}}$$

Donde:

$x_i$ : representa el valor de la medición realizada

$\bar{x}$ : es el promedio de las mediciones hechas

$n$ : es el número de mediciones hechas

### 2. Promedio

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$$

Se debe calcular el valor “Z” para determinar la variación de los datos respecto al valor medio de una medición (estas mediciones constaron de 5 puntos).

$$Z = \left| \frac{x - \bar{x}}{S} \right|$$

A partir del valor absoluto de Z se determina la calificación de cada punto, a partir de los siguientes criterios:

Valor de Z	Calificación
$Z \leq 1$	5
$1 < Z \leq 1.5$	4
$1.5 < Z \leq 2$	3
$2 < Z \leq 2.5$	2
$2.5 < Z \leq 3$	1
$Z > 3$	0

Este procedimiento se hace para los resultados del cono de arena y del EDG para los JOB SITES realizados.

Para determinar si las pruebas con los dos diferentes métodos de medición de densidades son o no comparables, se aplica el procedimiento anterior con las siguientes salvedades:

1. Al calcular “Z” la variable “x” representa los valores de las mediciones del EDG, mientras que los valores de “ $\bar{x}$ ” y “S” son los correspondientes al cono de arena, en la medición correspondiente que se quiere comparar.
2. Se obtiene un único valor de “Z” para cada medición. Se promedian las mediciones del EDG y se comparan con las del cono de arena.



3. Al referirse a mediciones en este procedimiento se habla de comparar en cada caso los valores de grado de compactación y humedad obtenidos en cada método para medición de densidades en suelos.
4. Entre más alta sea la puntuación, indica que la prueba fue ejecutada correctamente y que son comparables los datos analizados.
5. El método desarrollado por la AMRL indica que se debe hacer descarte de datos extremos, más para este caso se cuenta con pocas mediciones, por lo que se decidió no descartar ninguno; mas si se quisiera repetir el experimento, se puede retomar este concepto.

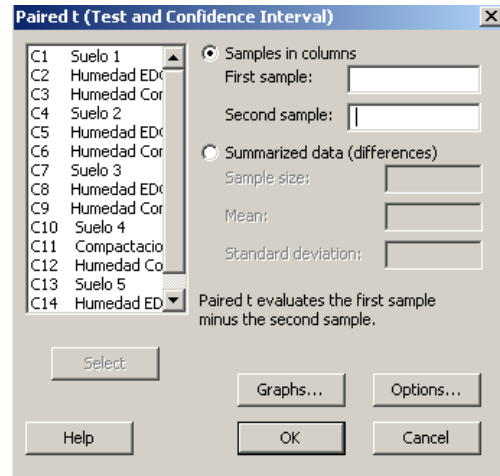


Figura 26: ventana de selección de datos.

## Supuestos que implican dos medias

Se decidió realizar un análisis más profundo acerca de qué tan similares son las medias de los datos medidos por los dos métodos analizados, y a partir de esto evaluar la similitud y tendencia de los resultados obtenidos.

Para este fin se utilizó un software especializado en el ámbito de probabilidades y estadística; este programa es el MINITAB.V.15.

La interface del MINITAB.V.15 es muy similar a las hojas de cálculo (por ejemplo las de Microsoft Excel); simplemente es necesario dar un acomodo a los datos según la prueba a realizar.

## Prueba t-pareada

Para esta prueba se ordenan los datos de la misma manera que si se fuera a realizar una prueba de análisis de medias.

En la barra de herramientas se selecciona la opción **STAT**; en la lista desplegada se escoge la opción **BASIC STATISTICS**, y luego la opción **t - t paired t...** al hacer esto aparece una ventana como la mostrada en la figura 26

En la columna de la izquierda aparecen todas las columnas creadas con los datos ingresados a la hoja de trabajo. Se debe hacer doble clic sobre las que son de interés para realizar la prueba.

Al seleccionar los datos se hace clic sobre la opción **OK**, y se presenta una pantalla con los resultados de la prueba pareada como la mostrada.

Su objetivo es explicar ampliamente cómo se actuó.

Deberán mencionarse sucintamente los procedimientos aplicados. Deberá indicarse el lugar donde se realizó el proyecto o investigación y la época, si ésta tuviera importancia.

La descripción de los materiales y los métodos empleados debe ser lo suficientemente completa como para permitir a un profesional o investigador competente reproducir el trabajo. La organización en esta sección es simple y cronológica. Debe indicarse la finalidad de cada actividad o paso llevado a cabo, los cuales están determinados por los objetivos del trabajo realizado.

# Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a los materiales provenientes de las fuentes de extracción de materiales analizadas para este proyecto.

Las pruebas fueron realizadas siguiendo las normas ASTM estipuladas según la prueba a realizar, por lo que los datos se consideran fidedignos y confiables para el proyecto de investigación realizado.

Los resultados de las pruebas fueron divididos por tajo, debido a que se

muestrearon diferentes fuentes de material. Cabe resaltar que se manejan los tajos por designación por orden alfabético, y no por el nombre del tajo en sí, debido al compromiso adquirido de que la información de las pruebas es confidencial.

Los cuadros se colocaron siguiendo el orden lógico de las pruebas realizadas, para alcanzar los objetivos planteados al inicio de este documento.

## Caracterización de materiales

### TAJO A

Material	Humedad (%)
Finos	21,03
Gruesos	15,87

Malla	Apertura (mm)	Retenido (g)	Ret-band (g)	% Ret	% Ret ac	% Pasa
3"	75	-		0,00%	0,00%	100,00%
2"	50	3000,00	1705,00	15,02%	15,02%	84,98%
1.5"	38	2556,00	1261,00	11,11%	26,14%	73,86%
1"	25	2816,00	1521,00	13,40%	39,54%	60,46%
¾"	19	2279,00	984,00	8,67%	48,21%	51,79%
3/8"	9,5	3673,00	2378,00	20,96%	69,17%	30,83%
Nº 4	4,75	2737,00	1442,00	12,71%	81,87%	18,13%
Nº 10	2	421,23	355,5	3,13%	85,01%	14,99%
Nº 20	0,84	133,92	68,19	0,60%	85,61%	14,39%
Nº 40	0,43	95,36	29,63	0,26%	85,87%	14,13%
Nº 100	0,149	102,53	36,8	0,32%	86,19%	13,81%
Nº 200	0,075	100,22	34,49	0,30%	86,50%	13,50%
Charola		95,61	1532,36	13,50%	100,00%	0,00%
Σ		18009,87	11347,97	100,00%		

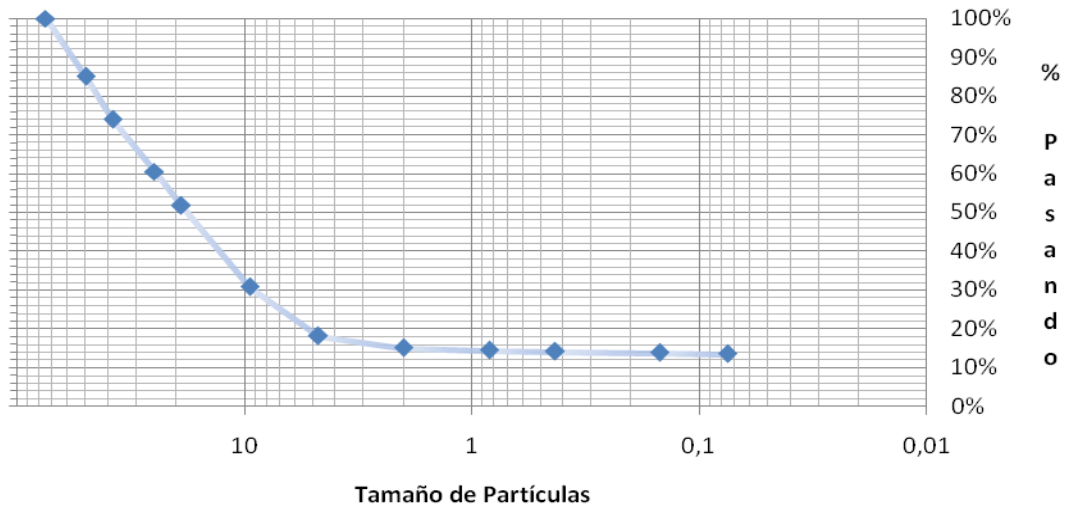


FIGURA27: CURVA GRANULOMÉTRICA PARA EL MATERIAL DEL TAJO A<sup>8</sup>

CUADRO 7: DETERMINACIÓN DE LOS LIMITES DE ATERBERG PARA EL MATERIAL	
Límite líquido	<b>40,5%</b>
Límite plástico	NP (no es posible determinarlo)
Índice de plasticidad	NP (no es posible determinarlo)

CUADRO 8: CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL DEL TAJO A	
El material se clasifica como "Grava mal graduada contaminada con limos"	
<b>Símbolo</b>	<b>GM</b>

CUADRO 9: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO					
pt (kg/m <sup>3</sup> )	2034,81	2064,47	2001,74	2235,66	1975,47
ps (kg/m <sup>3</sup> )	1758,76	1558,02	1621,14	1899,53	1827,51
Wagua	127,9	305,3	200,4	68,4	170,3
%w	8,10%	32,51%	23,48%	17,70%	15,70%
Humedad óptima	18,22%		ps máx.(kg/m <sup>3</sup> )		1900

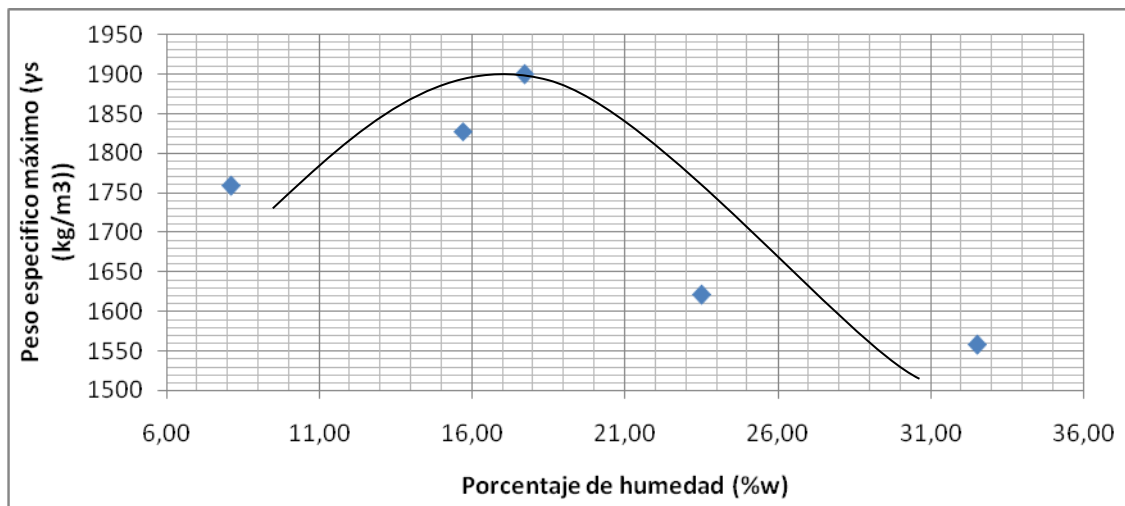


FIGURA 28: CURVA DE COMPACTACIÓN OBTENIDA EN LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO PARA EL TAJO A<sup>9</sup>

<sup>8</sup> Microsoft Office Excel 2007

## TAJO B

Material	Humedad (%)
Finos	4.18
Gruesos	10.54

Malla	Apertura (mm)	Retenido (g)	Ret-band (g)	% Ret	% Ret ac	% Pasa
3"	75	-	-	0,00%	0,00%	100,00%
2"	50	-	-	0,00%	0,00%	100,00%
1.5"	38	1480,00	185,00	1,34%	1,34%	98,66%
1"	25	8505,00	7210,00	52,37%	53,71%	46,29%
3/4"	19	3086,00	1791,00	13,01%	66,72%	33,28%
3/8"	9,5	1563,00	268,00	1,95%	68,67%	31,33%
Nº 4 (4.8mm)	4,75	3185,00	1890,00	13,73%	82,39%	17,61%
Nº 10	2	761,36	695,63	5,05%	87,45%	12,55%
Nº 20	0,84	192,36	126,63	0,92%	88,37%	11,63%
Nº 40	0,43	151,7	85,97	0,62%	88,99%	11,01%
Nº 100	0,149	166,39	100,66	0,73%	89,72%	10,28%
Nº 200	0,075	107,97	42,24	0,31%	90,03%	9,97%
Charola		69,88	1372,73	9,97%	100,00%	0,00%
Σ		19268,66	13767,86			

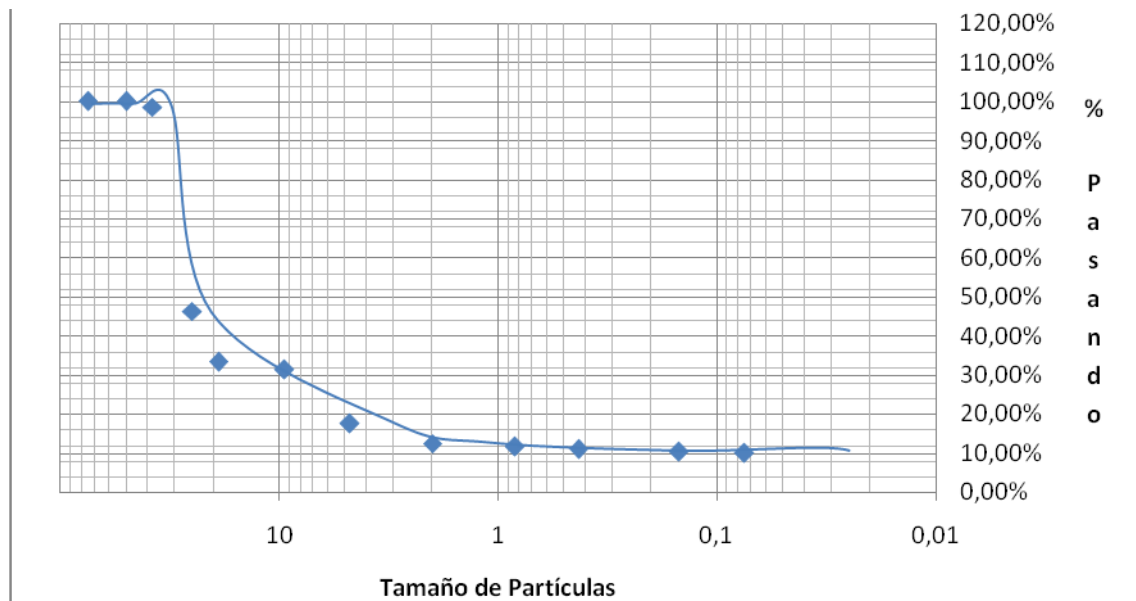


FIGURA 29: CURVA GRANULOMÉTRICA PARA EL MATERIAL DEL TAJO B<sup>10</sup>

Límite líquido	<b>NP (No es posible determinarlo)</b>
Límite plástico	
Índice de plasticidad	

<sup>9</sup> Microsoft Office Excel 2007

<sup>10</sup> Microsoft Office Excel 2007

CUADRO 13: COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA PARA EL MATERIAL DEL TAJO B			
D <sub>10</sub>	0,08	Cu	373,33
D <sub>30</sub>	9,50	Cc	42,98
D <sub>60</sub>	28,00		

CUADRO 14: CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL DEL TAJO B	
El material se clasifica como "Grava mal graduada contaminada con limos"	
<b>Símbolo</b>	<b>GP-GM</b>

CUADRO 15: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO					
ρ <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2171,95	2263,87	2252,68	2235,66	2126,72
ρ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2000,46	2051,75	2009,08	1977,03	1986,79
W <sub>agua</sub>	83,6	97,1	103,5	59,5	125,9
%w	8,57%	10,34%	12,13%	13,08%	7,04%
Humedad óptima	10,50%		ps máx.(kg/m <sup>3</sup> )		2052

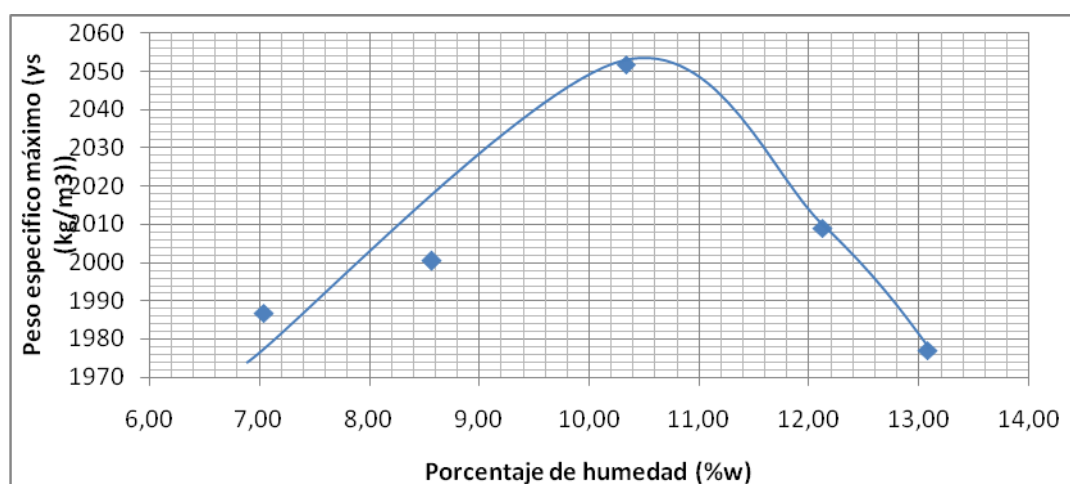


FIGURA 30: CURVA DE COMPACTACIÓN OBTENIDA EN LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO PARA EL TAJO B<sup>11</sup>

## TAJO C

CUADRO 16: HUMEDAD NATURAL DEL SUELO	
Material	Humedad (%)
Finos	14.89
Grosos	17.68

CUADRO 17: GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DEL TAJO C						
Malla	Apertura (mm)	Retenido (g)	Ret-band (g)	% Ret	% Ret ac	% Pasa
3"	75	-		0,00%	0,00%	100,00%
2''	50	-		0,00%	0,00%	100,00%
1.5''	38	1537,00	251,00	2,22%	2,22%	97,78%
1''	25	3638,00	2352,00	20,84%	23,07%	76,93%
3/4"	19	3322,00	2036,00	18,04%	41,11%	58,89%
3/8"	9,5	4400,00	3114,00	27,59%	68,70%	31,30%
Nº 4 (4.8mm)	4,75	3230,00	1944,00	17,23%	85,93%	14,07%

<sup>11</sup> Microsoft Office Excel 2007

Nº 10	2	448,41	379,32	3,36%	89,29%	10,71%
Nº 20	0,84	210,44	141,35	1,25%	90,54%	9,46%
Nº 40	0,43	139,13	70,04	0,62%	91,16%	8,84%
Nº 100	0,149	201,58	132,49	1,17%	92,34%	7,66%
Nº 200	0,075	74,26	5,17	0,05%	92,38%	7,62%
Charola		87,7	859,42	7,62%	100,00%	0,00%
$\Sigma$		17288,52	11284,79			

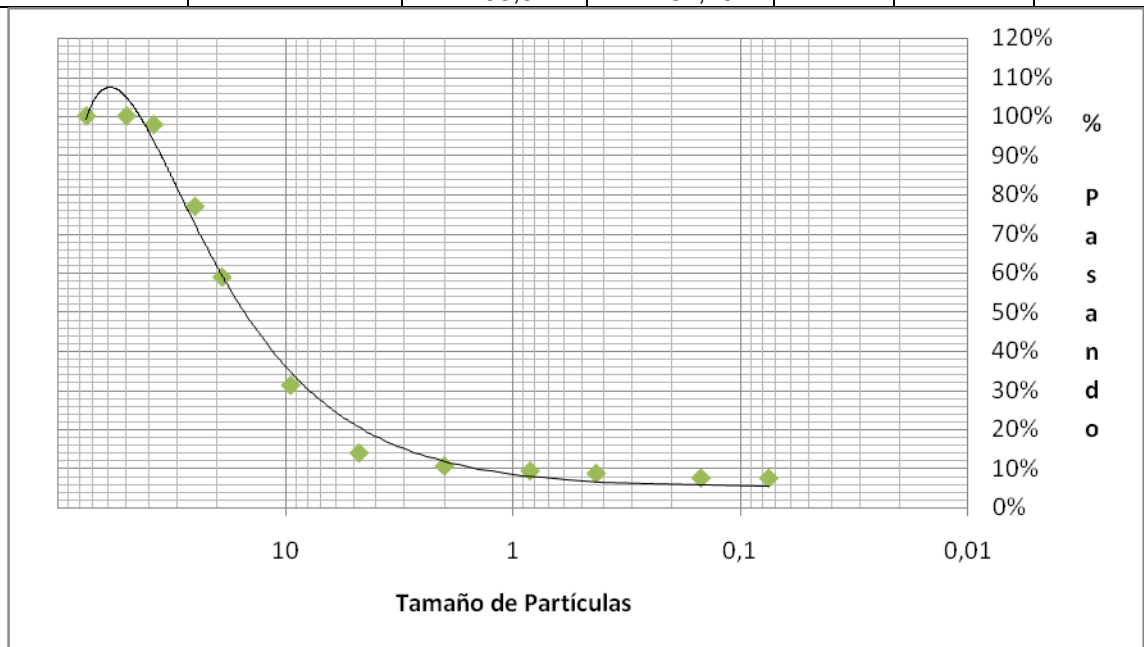


FIGURA 31: CURVA GRANULOMÉTRICA PARA EL MATERIAL DEL TAJO C<sup>12</sup>

CUADRO 18: COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA PARA EL MATERIAL DEL TAJO C			
D <sub>10</sub>	2,00	Cu	10,00
D <sub>30</sub>	9,50	Cc	2,26
D <sub>60</sub>	20,00		

CUADRO 19: DETERMINACIÓN DE LOS LIMITES DE ATERBERG PARA EL MATERIAL	
Límite líquido	<b>40,5%</b>
Límite plástico	32,95%
Índice de plasticidad	7,55%

CUADRO 20: CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL DEL TAJO C	
El suelo se clasifica como grava bien graduada contaminada con limo de baja plasticidad	
Símbolo	<b>GW-ML</b>

CUADRO 21: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO					
$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	1964,77	1880,64	1974,01	1951,16	1944,35
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1607,81	1570,83	1578,51	1616,21	1494,36
W <sub>agua</sub>	157,1	150,06	174,83	183,7	236,85
%w	22,20%	19,72%	25,06%	20,72%	30,11%
Humedad óptima	21,12%		ps máx.(kg/m <sup>3</sup> )		1625

<sup>12</sup> Microsoft Office Excel 2007

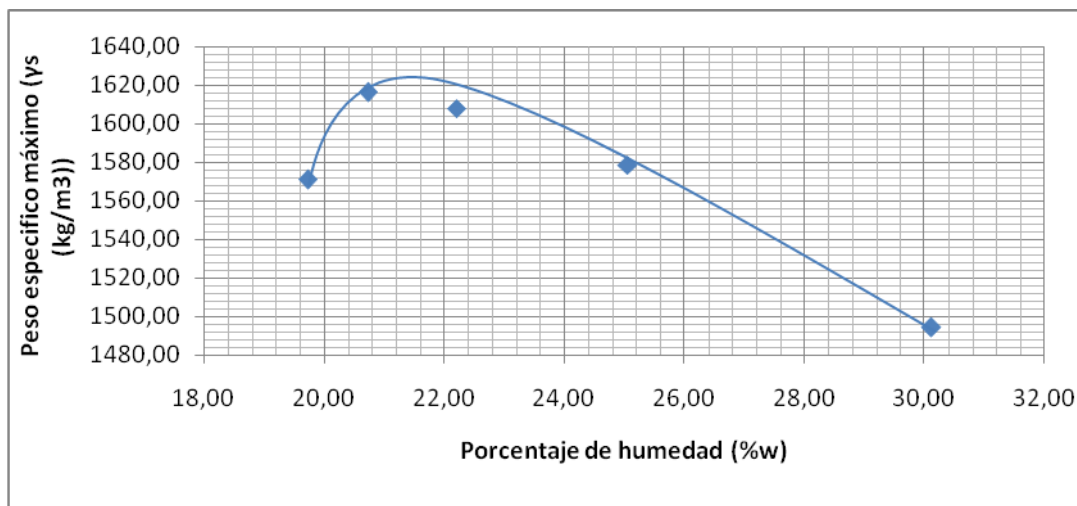


FIGURA 32: CURVA DE COMPACTACIÓN OBTENIDA EN LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO PARA EL TAJO C<sup>13</sup>

## TAJO D

Material	Humedad (%)
Finos	8,04
Gruesos	10,37

Malla	Apertura (mm)	Retenido (g)	Ret-band (g)	% Ret	% Ret ac	% Pasa
3"	75	976,00	829,00	9,19%	9,19%	90,81%
2"	50		0,00	0,00%	9,19%	90,81%
1.5"	38	383,00	236,00	2,62%	11,80%	88,20%
1"	25	536,00	389,00	4,31%	16,11%	83,89%
¾"	19	425,00	278,00	3,08%	19,19%	80,81%
3/8"	9,5	1479,00	1332,00	14,76%	33,95%	66,05%
Nº 4 (4.8mm)	4,75	2810,00	2663,00	29,51%	63,46%	36,54%
Nº 10	2	811,8	745,22	8,26%	71,72%	28,28%
Nº 20	0,84	194,27	127,69	1,41%	73,13%	26,87%
Nº 40	0,43	126,38	59,8	0,66%	73,79%	26,21%
Nº 100	0,149	167,1	100,52	1,11%	74,91%	25,09%
Nº 200	0,075	135,31	68,73	0,76%	75,67%	24,33%
Charola		90,65	2195,69	24,33%	100,00%	0,00%
Σ		8134,51	9024,65	100,00%		

<sup>13</sup> Microsoft Office Excel 2007

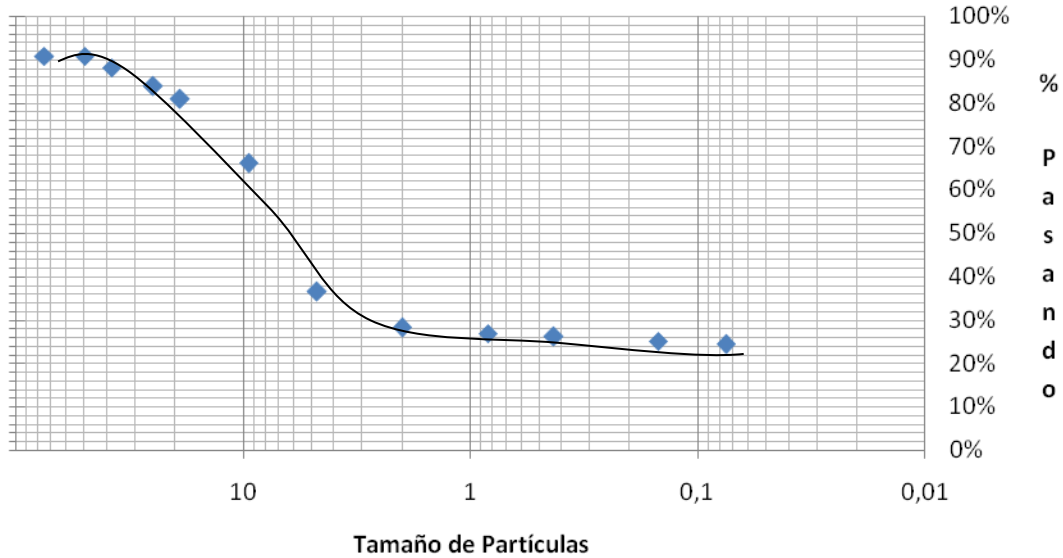


FIGURA 33: CURVA GRANULOMÉTRICA PARA EL MATERIAL DEL TAJO D<sup>14</sup>

CUADRO 24: DETERMINACIÓN DE LOS LIMITES DE ATERBERG PARA EL MATERIAL	
Límite líquido	<b>23,3%</b>
Límite plástico	16,87%
Índice de plasticidad	6,13%

CUADRO 25: CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL DEL TAJO D	
El material se clasifica como "Grava mal graduada contaminada con limos"	
Símbolo	GM

CUADRO 26: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO					
$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	2189,46	2128,67	2113,11	2108,73	1971,58
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2039,61	1855,58	1922,54	1788,75	1758,24
$W_{\text{agua}}$	128,4	153,6	85,8	63,8	202,5
%w	12,13%	14,72%	9,91%	17,89%	7,35%
Humedad óptima	12,10%		$\rho_s$ máx.(kg/m <sup>3</sup> )		1955

<sup>14</sup> Microsoft Office Excel 2007



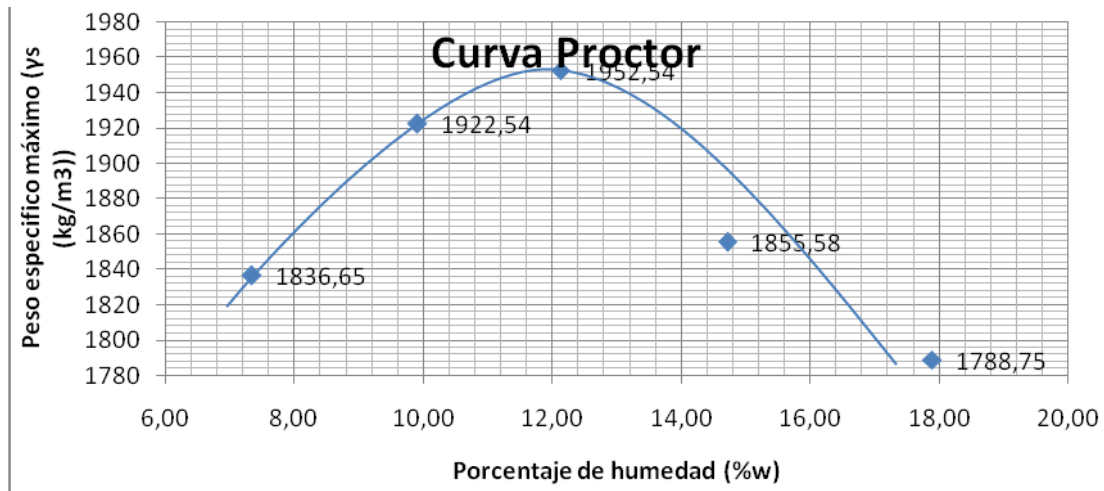


FIGURA 34: CURVA DE COMPACTACIÓN OBTENIDA EN LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO PARA EL TAJO D<sup>15</sup>

## TAJO E

CUADRO 27: HUMEDAD NATURAL DEL SUELO	
Material	Humedad (%)
Finos	5.04
Grosos	7.75

CUADRO 28: GRANULOMETRÍA DEL MATERIAL DEL TAJO E						
Malla	Apertura (mm)	Retenido (g)	Ret-band (g)	% Ret	% Ret ac	% Pasa
3"	75	0,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
2''	50	0,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1.5''	38	0,00	0,00	0,00%	0,00%	100,00%
1''	25	1383,20	1236,33	12,47%	12,47%	87,53%
¾"	19	1240,10	1093,23	11,02%	23,49%	76,51%
3/8"	9,5	2994,20	2847,33	28,71%	52,21%	47,79%
Nº 4 (4.8mm)	4,75	3265,70	3118,83	31,45%	83,66%	16,34%
Nº 10	2	801,91	734,05	7,40%	91,06%	8,94%
Nº 20	0,84	242	174,14	1,76%	92,82%	7,18%
Nº 40	0,43	171,65	103,79	1,05%	93,86%	6,14%
Nº 100	0,149	156,06	88,2	0,89%	94,75%	5,25%
Nº 200	0,075	103,41	35,55	0,36%	95,11%	4,89%
Charola		87,67	484,78	4,89%	100,00%	0,00%
Σ		10445,90	9916,23			

<sup>15</sup> Microsoft Office Excel 2007

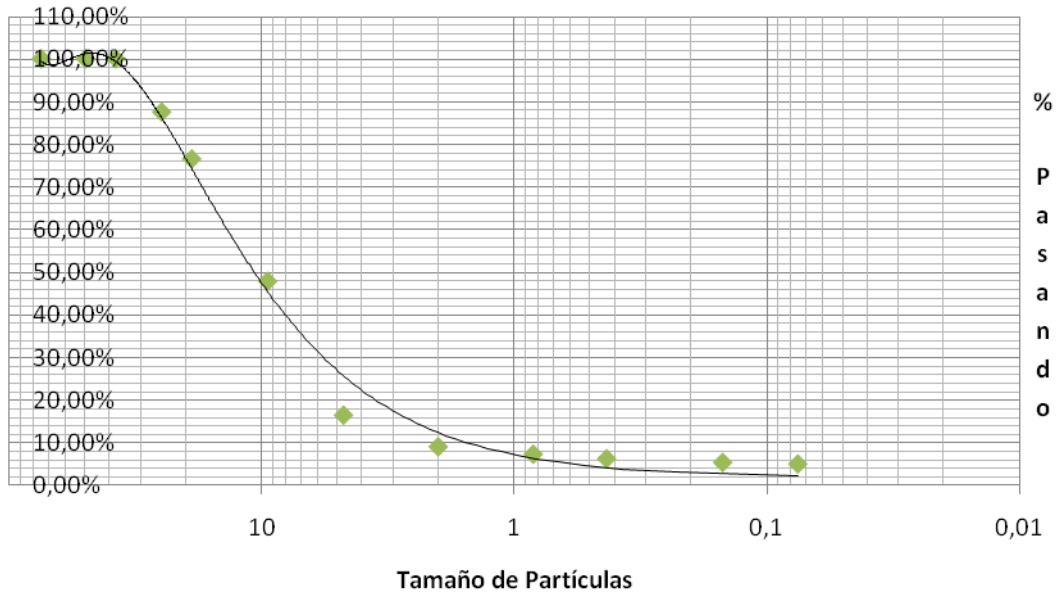


FIGURA 35: CURVA GRANULOMÉTRICA PARA EL MATERIAL DEL TAJO E<sup>16</sup>

CUADRO 29: DETERMINACIÓN DE LOS LÍMITES DE ATERBERG PARA EL MATERIAL	
Límite líquido	<b>NP</b>
Límite plástico	
Índice de plasticidad	

CUADRO 30: COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA PARA EL MATERIAL DEL TAJO E			
D <sub>10</sub>	1,70	Cu	8,24
D <sub>30</sub>	5,50	Cc	1,27
D <sub>60</sub>	14,00		

CUADRO 31: CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL DEL TAJO E	
El material se clasifica como "Grava bien graduada"	
Símbolo	GW

CUADRO 32: DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO						
$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	2167,57	2107,76	2241,98	2269,22	2263,87	2261,44
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1985,61	1957,78	2020,21	2034,41	2010,27	1972,03
W <sub>agua</sub>	83	66,2	115,2	101,6	129	146,2
%w	9,16%	7,66%	10,98%	11,54%	12,61%	14,68%
Humedad óptima	11,50%	$\rho_s$ máx. (kg/m <sup>3</sup> )				2030

<sup>16</sup> Microsoft Office Excel 2007

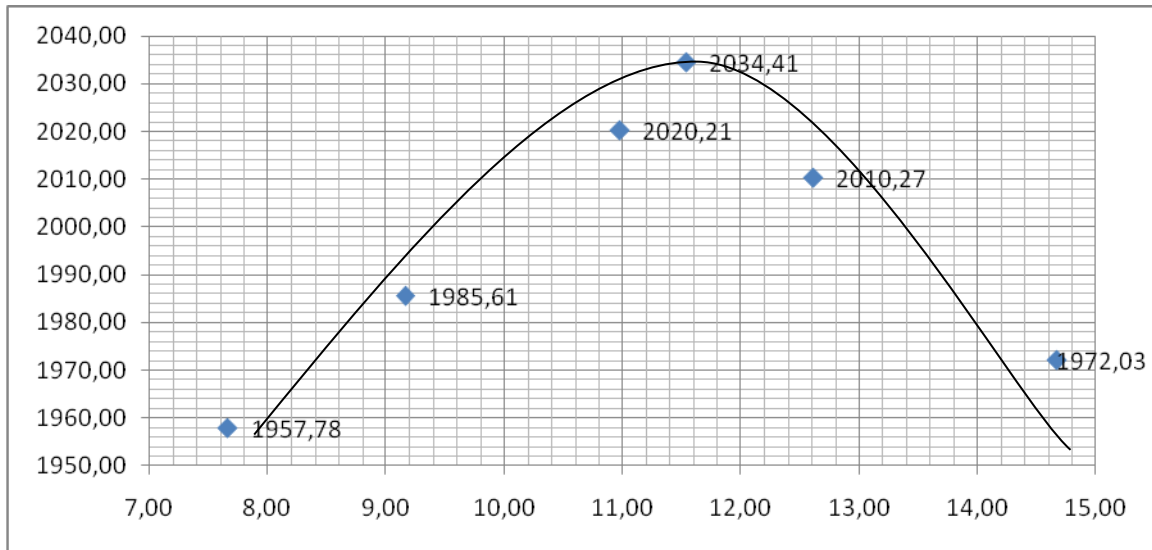


FIGURA 36: CURVA DE COMPACTACIÓN OBTENIDA EN LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO PARA EL TAJO E<sup>17</sup>

<sup>17</sup> Microsoft Office Excel 2007

# Modelos de suelos

A continuación se presentan los resultados de los conos de arena que fueron necesarios para construir los modelos de suelos.

**NOTA:** Los resultados obtenidos de la creación del modelo de suelo para el tajo A distan mucho de los valores obtenidos en la prueba de grado de compactación usando esfuerzo modificado, debido a que se realizó un préstamo del material muestreado inicialmente al Laboratorio de suelos para ser utilizado con los estudiantes del curso. Al realizar un segundo muestreo el material adquirido había cambiado visiblemente y por ende sus características también.

Para el tajo E fue necesaria la creación de dos modelos de suelo, debido a que para el primer modelo creado se presentaron problemas de sobrecompactación en los puntos realizados. Por esta razón fue necesario repetir estos puntos y crear un modelo de suelo nuevo, para corregir las fuentes de error presentes inicialmente.

## TAJO A

CUADRO 33: RESULTADOS CONO DE ARENA SUELO A		
Prueba	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	1486,41	16,74%
2	1489,82	17,72%
3	1516,09	21,77%
4	1552,33	19,45%
5	1582,70	20,91%
6	1712,94	41,95%
FIT	0,668	

## TAJO B

CUADRO 34: RESULTADOS CONO DE ARENA SUELO B		
Prueba	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	2492,82	11,81%
2	3106,18	14,94%
3	2310,18	8,78%
4	2170,20	11,55%
5	2200,54	9,63%
6	2108,66	8,07%
FIT	0,731	

## TAJO C

CUADRO 35: RESULTADOS CONO DE ARENA SUELO C		
Prueba	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	1894,44	21,18%
2	1882,64	25,25%
3	1903,43	26,30%
4	1685,27	19,69%
5	1715,06	15,05%
6	2108,66	8,07%
FIT	0,929	

## TAJO D

CUADRO 36: RESULTADOS CONO DE ARENA SUELO D		
Prueba	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	2049,46	12,38%
2	2039,36	11,01%
3	1960,65	14,38%
4	2048,14	14,12%
5	2199,71	16,38%
6	1945,91	11,55%
7	1896,99	13,52%
FIT	0,623	

## TAJO E - 1

CUADRO 37: RESULTADOS CONO DE ARENA SUELO E-1		
Prueba	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	2414,27	11,53%
2	2277,26	9,75%
3	2315,64	10,89%
4	2342,59	11,79%
5	2310,21	11,62%
FIT	0,463	

## TAJO E - 2

CUADRO 38: RESULTADOS CONO DE ARENA SUELO E- 2		
Prueba	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	2254,62	10,91%
2	2233,23	8,83%
3	2323,93	11,92%
4	1963,77	8,25%
5	1980,41	6,58%
6	2067,06	11,28%
FIT	0,708	

## TAJO B

CUADRO 40: MEDICIONES DE DENSIDADES Y HUMEDADES CON AMBOS MÉTODOS				
	Cono arena		EDG	
Pto	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	2202,99	9,63	2163	9,20
2	2163,01	9,63	2164	9,20
3	2207,00	10,24	2177	9,80
4	2134,09	11,07	2171	9,70
5	2126,72	10,82	2091	8,30

# Sitios de trabajo

En esta sección se presentan los valores de humedad y densidad humedad obtenidos con los dos métodos de medición que están siendo analizados. Los puntos en cada material analizado fueron compactados a humedad óptima del material, y una densidad cercana al resultado de una posible medición en campo (cercana o mayor al 90% de compactación)

**NOTA:** los sitios de trabajo para el tajo A y E1 respectivamente, fueron realizados en proyectos reales. En el caso del tajo A, el proyecto correspondió a la construcción de un relleno para parqueo de maquinaria pesada, y el proyecto del tajo E1 fue visitado al construirse una base para un proyecto carretero.

Cabe resaltar que el EDG presento un mensaje de error, el cual se discutirá en la sección de análisis de resultados.

## TAJO C

CUADRO 41: MEDICIONES DE DENSIDADES Y HUMEDADES CON AMBOS MÉTODOS				
	Cono arena		EDG	
Pto	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	1720,25	20,88	1853	17,8
2	1689,82	20,86	1857	17,8
3	1707,31	21,16	1852	17,9
4	1708,79	20,12	1831	17,0
5	1693,90	20,67	1837	17,2

## TAJO A

CUADRO 39: MEDICIONES DE DENSIDADES Y HUMEDADES CON AMBOS MÉTODOS				
	Cono arena		EDG	
Pto	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	1662,87	29,67	1640	101,60
2	1793,26	29,23	1575	91,90
3	1767,28	29,65	1625	90,40
4	1790,22	28,34	1616	162,80
5	1916,70	21,48	1609	89,70

## TAJO D

CUADRO 42: MEDICIONES DE DENSIDADES Y HUMEDADES CON AMBOS MÉTODOS				
	Cono arena		EDG	
Pto	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	1775,65	9,45	1862	12,5
2	1721,89	9,80	1891	12,8
3	1792,31	10,20	1872	12,9
4	1726,51	9,90	1836	12,6
5	1696,48	10,12	1876	12,8

**TAJO E - 1**

CUADRO 43: MEDICIONES DE DENSIDADES Y HUMEDADES CON AMBOS MÉTODOS				
	Cono arena		EDG	
Pto	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	2068,51	9,32	2331	12,4
2	2066,94	9,64	2335	13,6
3	2083,89	7,46	2324	12,1
4	2056,68	7,81	2311	11,1
5	1993,84	8,10	2330	12,5

**TAJO E - 2**

CUADRO 44: MEDICIONES DE DENSIDADES Y HUMEDADES CON AMBOS MÉTODOS				
	Cono arena		EDG	
Pto	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	%w
1	2108,27	10,54	2098,00	9,4
2	2188,57	10,34	2079,00	9,0
3	2093,66	10,74	2097,00	9,6
4	2087,99	10,91	2088,00	9,4
5	2058,56	10,51	2093,00	9,2

# Análisis estadístico

En esta sección se presentan los resultados del análisis estadístico de los datos, tanto por el

método de la AMRL, así como por medio de la prueba pareada.

## Método de la AMRL

### TAJO A

CUADRO 45: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	29,67%	1282,40	67,49%	0,57	1,10	5	4
2	29,23%	1387,70	73,04%	0,44	0,12	5	5
3	29,65%	1363,10	71,74%	0,56	0,35	5	5
4	28,34%	1394,92	73,42%	0,19	0,06	5	5
5	21,48%	1577,85	83,04%	1,77	1,63	3	3
Promedio	27,67%	1401,19	73,75%	0,71	0,65	%w	ps
Desv. Estand.	0,04	108,39	0,06	0,61	0,68		

CUADRO 46: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE EDG REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	101,60%	813,49	42,80%	0,18	0,23	5	5
2	91,90%	820,74	43,20%	0,49	0,31	5	5
3	90,40%	853,47	44,90%	0,54	0,64	5	5
4	162,80%	614,92	32,40%	1,77	1,76	3	3
5	89,70%	848,18	44,60%	0,56	0,58	5	5
Promedio	107,28%	790,16	41,58%	0,71	0,70	%w	ps
Desv. Estand.	0,31	99,45	0,05	0,61	0,62		

### TAJO B

CUADRO 47: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	9,63%	2009,55	97,93%	0,98	1,03	5	4
2	9,63%	1972,96	96,15%	0,97	0,18	5	5
3	10,24%	2002,05	97,57%	0,06	0,86	5	5
4	11,07%	1921,44	93,64%	1,19	1,01	4	4
5	10,82%	1919,06	93,52%	0,82	1,07	5	4
Promedio	10,28%	1965,01	95,76%	0,80	0,83	%w	ps
Desv. Estand.	0,01	43,10	0,02	0,44	0,37		

CUADRO 48: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE EDG REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	9,20%	1980,77	96,50%	0,07	0,43	5	5
2	9,20%	1981,68	96,50%	0,07	0,47	5	5
3	9,80%	1982,70	96,60%	0,94	0,52	5	5
4	9,70%	1979,03	96,50%	0,77	0,36	5	5
5	8,30%	1930,75	94,10%	1,58	1,79	3	3
Promedio	9,24%	1970,99	96,04%	0,69	0,71	%w	ps
Desv. Estand.	0,01	22,53	0,01	0,64	0,60		

## TAJO C

CUADRO 49: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	20,88%	1423,15	87,58%	0,36	1,05	5	4
2	20,86%	1398,14	86,04%	0,32	1,18	5	4
3	21,16%	1409,11	86,71%	1,09	0,20	4	5
4	20,12%	1422,57	87,54%	1,60	1,00	3	4
5	20,67%	1403,72	86,38%	0,17	0,68	5	5
Promedio	20,74%	1411,34	86,85%	0,71	0,82	%w	ps
Desv. Estand.	0,00	11,21	0,01	0,61	0,39		

CUADRO 50: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE EDG REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	17,80%	1573,01	96,80%	0,63	0,55	5	5
2	17,80%	1576,40	97,00%	0,63	1,30	5	4
3	17,90%	1570,82	96,70%	0,88	0,07	5	5
4	17,00%	1564,96	96,30%	1,32	1,23	4	4
5	17,20%	1567,41	96,50%	0,83	0,69	5	5
Promedio	17,54%	1570,52	96,66%	0,86	0,77	%w	ps
Desv. Estand.	0,00	4,51	0,00	0,28	0,51		

## TAJO D

CUADRO 51: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	9,45%	1622,33	82,98%	1,50	0,98	3	5
2	9,80%	1568,19	80,21%	0,32	0,47	5	5
3	10,20%	1626,48	83,20%	1,02	1,09	4	4
4	9,90%	1570,98	80,36%	0,02	0,39	5	5
5	10,12%	1540,52	78,80%	0,78	1,21	5	4
Promedio	9,89%	1585,70	81,11%	0,73	0,83	%w	ps
Desv. Estand.	0,00	37,31	0,02	0,58	0,37		



CUADRO 52: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE EDG REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	12,50%	1655,11	84,70%	1,34	0,09	4	5
2	12,80%	1676,42	85,70%	0,49	1,18	5	4
3	12,90%	1658,10	84,80%	1,10	0,09	4	5
4	12,60%	1630,55	83,40%	0,73	1,56	5	3
5	12,80%	1663,12	85,00%	0,49	0,39	5	5
Promedio	12,72%	1656,66	84,72%	0,83	0,66	%w	ps
Desv. Estand.	0,00	16,72	0,01	0,38	0,67		

## TAJO E – 1

CUADRO 53: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	9,32%	1892,11	92,75%	0,89	0,05	5	5
2	9,64%	1885,19	92,41%	1,22	0,25	4	5
3	7,46%	1939,19	95,06%	1,05	1,32	4	4
4	7,81%	1907,73	93,52%	0,69	0,41	5	5
5	8,10%	1844,44	90,41%	0,38	1,43	5	4
Promedio	8,47%	1893,73	92,83%	0,85	0,69	%w	ps
Desv. Estand.	0,01	34,52	0,02	0,33	0,64		

CUADRO 54: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE EDG REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	12,40%	2328,11	102,40%	0,07	0,52	5	5
2	13,60%	2331,83	101,50%	1,41	0,93	4	5
3	12,10%	2321,19	102,30%	0,27	0,23	5	5
4	11,10%	2308,44	102,70%	1,38	1,63	4	3
5	12,50%	2327,09	102,20%	0,18	0,41	5	5
Promedio	12,34%	2323,33	102,22%	0,66	0,74	%w	ps
Desv. Estand.	0,01	9,16	0,004	0,67	0,56		

## TAJO E - 2

CUADRO 55: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	10,54%	1907,28	93,49%	0,31	0,04	5	5
2	10,34%	1983,53	97,23%	1,23	1,68	4	3
3	10,74%	1890,61	92,68%	0,61	0,32	5	5
4	10,91%	1882,68	92,29%	1,36	0,49	4	5
5	10,51%	1862,73	91,31%	0,43	0,92	5	5
Promedio	10,61%	1905,37	93,40%	0,79	0,69	%w	ps
Desv. Estand.	0,00	46,54	0,02	0,48	0,64		

CUADRO 56: EVALUACIÓN DE LA PRUEBA DE EDG REALIZADA							
Punto	%w	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.	Z (%w)	Z (ps)	Puntuación	
1	9,40%	1917,73	94,30%	0,35	1,07	5	4
2	9,00%	1907,34	93,80%	1,40	1,16	4	4
3	9,60%	1913,32	94,10%	1,23	0,13	4	5
4	9,40%	1908,59	93,90%	0,35	0,89	5	5
5	9,20%	1916,67	94,20%	0,53	0,84	5	5
Promedio	9,32%	1912,73	94,06%	0,77	0,82	%w	ps
Desv. Estand.	0,00	4,67	0,00	0,51	0,41		

CUADRO 57: COMPARACIÓN ENTRE CONO DE ARENA Y EDG				
Tajo	Z (%w)	Puntuación (%w)	Z(ps)	Puntuación (ps)
A	22,71	0,00	5,64	0,00
B	1,56	3,00	0,14	5,00
C	8,25	0,00	14,20	0,00
D	9,56	0,00	1,90	3,00
E2	5,86	0,00	0,16	5,00
E1	4,03	0,00	12,44	0,00

## Análisis de medias usando una prueba t-pareada

CUADRO 58: PROBABILIDAD DE QUE LAS MEDIAS DE %w Y % COMPACT. SEAN IGUALES ENTRE LOS MÉTODOS DE MEDICIÓN POR TIPO DE SUELOS				
Tajo	P (%w)	P (% Compact.)	I.C. %w	I.C. %compact.
A	0,005	0,001	(41,1.118,1)	(-41,03.-23,59)
B	0,066	0,730	(-2,183.0,107)	(-1,803.2,359)
C	0,000	0,000	(-3,4102.-2,9858)	(8,752.10,868)
D	0,000	0,019	(2,5991.3,0529)	(0,963.6,257)
E-2	0,000	0,573	(-1,4806.-1,0954)	(-2,33.3,65)
E-1	0,000	0,000	(3,031.4,717)	(7,37.11,41)

**NOTA: I.C. Intervalo de confianza.**

CUADRO 59: PROBABILIDAD DE QUE LAS MEDIAS DE %w Y % COMPACT. SEAN IGUALES ENTRE LOS MÉTODOS EN TODAS LAS PRUEBAS.				
N	%w	% Compact.	I.C. %w	I.C. %compact.
20	0.203	0.001	(-1,745.0,396)	(1,59.5,589)

**Nota: N. numero de pruebas**

# Análisis de los resultados

En esta sección se analizan los resultados obtenidos a lo largo de la investigación realizada, que va desde los tipos de suelo usados, así como toda la experimentación respecto al funcionamiento y precisión del EDG (Electrical Density Gauge) respecto a la prueba de cono de arena que fue usada como parámetro de comparación, al ser esta una prueba normalizada y aceptada internacionalmente como ASTM D 1556.

## Caracterización de suelos

En la investigación previa los fabricantes del equipo (Humboldt) recomendaron que éste fuera probado con la mayor gama de suelos posible y tratar de que estas pruebas fueran bajo condiciones de trabajo. Es decir, que a pesar de que el equipo puede ser usado en cualquier tipo de suelo, era recomendable probar y calibrar el equipo con los materiales disponibles y de uso más común en el mercado y, de ser posible, provenientes de diferentes zonas. Esto por las siguientes razones:

- Accesibilidad a las fuentes de material: al no enfocarse a un solo punto o fuente de extracción de material fue, más factible obtener diferentes tipos de suelos y en la cantidad que se requirió (aproximadamente  $1\text{m}^3$ ).
- Posibilidad de realizar pruebas de campo: al provenir los materiales de varias fuentes se esperaba que surgiera la posibilidad de hacer chequeos de campo con los materiales que se obtuvieron de éstas, mas por la estación del año (invierno) y la crisis económica que afectó durante la ejecución de éste proyecto, ésta opción no se presentó, por lo que se recurrió a otras pruebas para alcanzar los objetivos

planteados, tal como se describirá más adelante.

- Variedad de materiales: al usar varias fuentes de material se garantizó la obtención de suelos diferentes entre sí y con características únicas respecto a los demás. Lo anterior debido a que cada zona tiene un origen geológico diferente que identifica al material, además de que los controles y forma de procesar los materiales de cada empresa encargada de extraerlos difiere de las otras.
- Tajos con mayor frecuencia y disposición de material: se seleccionaron las empresas más anuentes a colaborar con el proyecto y que, además tuvieran un buen posicionamiento en el mercado, para tener más posibilidades de tener acceso a proyectos.

Es por todas estas razones que se caracterizaron 5 materiales diferentes, de la misma cantidad de fuentes de extracción. Las empresas que colaboraron con el suministro de los suelos necesarios se encuentran 3 en la provincia de Cartago, 1 en la de San José y 1 en la provincia de Alajuela. Las fuentes de extracción de material fueron denominadas como TAJO A (Cartago), TAJO B (Cartago), TAJO C (Alajuela), TAJO D (Cartago), TAJO E (San José). Para respetar la política de privacidad respecto a la actividad que realizan estas empresas y al tipo de mezclas de agregados que producen.

El análisis de los suelos permitió caracterizar cada suelo muestreado, obteniendo múltiples parámetros para este cometido. Estos parámetros fueron usados para completar la información interna del EDG, pues el equipo necesita la información sobre clasificación, densidad seca máxima y contenido de humedad de cada material, así como los resultados de las pruebas de cono de arena, para poder funcionar y generar las correlaciones internas necesarias para medir densidades en campo. De esta

manera se analizaron los siguientes aspectos de los suelos:

## Granulometría de suelos

La información del análisis de los suelos según el tamaño de sus partículas se muestra en los cuadros 6, 11, 17, 23, 28. En sus figuras asociadas: 27, 29, 31, 33, 35.

Con la información suministrada por estos cuadros y sus figuras se puede inferir el tipo de suelo y algunas de sus características acerca de su desempeño como material destinado para compactación.

Los suelos obtenidos del TAJO A y D son comercializados como sub-bases y son los suelos que tienen un mayor contenido de material pasando la malla N° 200 en su granulometría. La mayor parte de las partículas que los componen están sobre los 9.5 mm (malla N° 3/8") de diámetro, lo que los convierte en suelos mal graduados. Esto se refleja en el cálculo del coeficiente de curvatura y el de uniformidad (mostrados en los cuadros), que evidencian una mala distribución del tamaño de las partículas.

Los suelos de los TAJOS B, C y E son materiales usados como base, de ellos los TAJOS C y E presentan una curva granulométrica suave, lo que indica que existe una distribución de tamaños de partículas adecuado, lo cual se confirma en los coeficientes de curvatura y uniformidad de estos materiales (Cuadros 13, 18, 30), no así con el material de TAJO B que presenta una gran concentración en tamaños cercanos a 25mm, lo que provoca que la curva granulométrica sea discontinua.

El suelo del TAJO E es un material limpio, es decir tiene una concentración de material pasando la malla N° 200 menor al 5%, por lo que indica una mezcla de agregados con buena capacidad de drenaje. Los suelos de los TAJOS B y C son mediamente contaminados, lo que afecta sensiblemente el comportamiento al añadirle agua pues tienen la capacidad de retener más agua dentro de su estructura.

## Límites de Atterberg.

En los cuadros 7, 12, 19, 24, 29 se muestran los límites líquido y plástico, así como el índice de plasticidad de cada suelo.

Para los suelos de los TAJOS A, B y E los finos fueron clasificados como no plásticos (NP). Para el TAJO A al suelo no se le pudo determinar el límite plástico, por lo que su valor es cero para poder ingresar en la carta de plasticidad, mientras que para los suelos de los TAJOS B y E, el material es completamente arenoso, por lo que no se pudo determinar la humedad característica para ningún límite, pues no existió grado alguno de cohesión o unión entre las partículas de suelo.

A éstos suelos se les practicó una prueba de clasificación mediante el método de clasificación en campo de suelos, y se logro determinar que para el suelo A y B los finos que contienen en su estructura son limos y, por el comportamiento drenante y de reacción al adicionarle agua, los mismos se clasificaron como limos de baja plasticidad. Para el suelo E el material es limpio.

Los finos de los suelos C y D se clasificaron como limo y arcilla de baja plasticidad respectivamente.

La importancia de estos límites reside en que permiten determinar el comportamiento de la fracción fina de los suelos al adicionarle agua. Primeramente permiten determinar las fronteras entre los estados líquido, plástico y sólido de un suelo. El comportamiento de los finos al agregarle o quitarle agua influye notablemente en el comportamiento mecánico del suelo, pues ésta fracción es la que en especial permite determinar si un suelo es drenante o bien retiene gran cantidad de agua en su estructura, lo que influye notablemente en procesos como lo es la compactación.

En general, si los límites plástico y líquido son altos (mayor a 30%) se puede decir que los suelos van a retener agua en su estructura, tal es el caso del TAJO A y C, donde la humedad natural del suelo es superior al 16% (en ambos casos) y al adicionarle agua el material no lo drena, sino que la liga a sus partículas. Este dato es importante pues los ambientes con humedades altas tienden a transmitir de mejor manera la electricidad que los ambientes secos, lo que puede ser una característica representativa de los suelos respecto al funcionamiento del EDG. Los materiales de los TAJOS B y D son materiales con humedades naturales bajas (menores a 10%) y, en general, los dos suelos tienen una granulometría que les permite drenar el agua, mas al adicionarles agua, los finos retienen parte de ésta y se produce un efecto de

acolchonamiento en los procesos de compactación.

El material del TAJO E, al ser un suelo limpio, impide la retención de agua por parte de la fracción fina, por lo que al tener exceso de agua en su estructura y aplicarle energía, simplemente la drena, no la retiene, actúa como una arena que libera el agua libre entre sus partículas.

## Clasificación de suelos

Gracias a los resultados de las pruebas anteriores se logró clasificar los suelos muestreados, tal como se muestra en los cuadros 8, 14, 20, 25, 31.

Estos datos son importantes debido a que los materiales usados para proyectos de compactación de suelos, tales como rellenos o carreteras, deben cumplir y mantenerse dentro los rangos establecidos de granulometría, según el uso que se le vaya a dar el material (según CR 2002). Además como se mencionó anteriormente, la distribución de los tamaños de las partículas influye en propiedades como capacidad de drenaje, trabajabilidad y comportamiento mecánico de los suelos.

La clasificación de los suelos es requerida por el EDG para cada suelo analizado, específicamente para completar la información de los modelos de suelo; mas es importante recalcar que estos datos no son indispensables para que el equipo pueda hacer la medición, es decir si el modelo de suelo no contiene la clasificación del suelo el EDG permite realizar las pruebas.

Los datos relacionados con la clasificación (como granulometría y límites de Atterberg) de los suelos son necesarios para completar la información de modelos de suelo del material que se analizó, y de esta manera crear una biblioteca, que permite dar seguimiento a las mezclas de agregados o suelos que se extraen de los tajos, además de que el software para descarga de información del EDG a una PC permite generar informes completos de las pruebas, por lo que es necesario que los datos estén completos. No obstante, para este proyecto se presentó el inconveniente de que el software del EDG está desactualizado, y la computadora en donde está instalado no tiene conexión a internet, por lo que la descarga de datos se hizo manualmente.

La clasificación de suelos debe estar basada en los criterios establecidos por el SUCS, pues

éste es la clasificación que el equipo tiene predeterminado (por default) en su memoria interna.

El proceso de clasificación permitió corroborar que todos los suelos muestreados son sumamente diferentes entre sí, a pesar de que la clasificación los diferencia apenas como gravas limpias o contaminadas con finos (arcilla o limo). Las pruebas previas, como análisis mecánico del suelo, muestran que la distribución de los tamaños de partículas entre los suelos es diferente y que el comportamiento de los suelos al adicionarles agua es particular para cada uno.

## Prueba de proctor modificado

Las densidades máximas y humedades óptimas obtenidas en estas pruebas se muestran en los cuadros 9, 15, 21, 26, 32. (Figuras 28, 30, 32, 34, 36)

De los materiales analizados en esta prueba se comprobaron todas las consideraciones surgidas de las pruebas anteriormente comentadas sobre capacidad de drenaje, y comportamiento del material al adicionarle agua.

Así, por ejemplo, los materiales de los TAJO A y C demostraron ser los que incorporaron más agua a su estructura, mientras que los demás suelos demostraron ser materiales con buena capacidad de drenaje. Esto se confirma al observar las humedades óptimas relativamente bajas.

Debido al tipo de prueba es de esperar que los materiales se degraden, pero los suelos de los TAJOS A y D se degradaron sobre manera a la hora de realizar la prueba, resquebrajándose tanto los gruesos que llegaron a un estado similar al de la parte fina que los compone. Este efecto podría dar un indicio de que son materiales de mediana-baja calidad, y que podrían ver afectada su capacidad para ser usados en proyectos carreteros de alto tránsito o rellenos sometidos a cargas dinámicas, pues podría afectar la integridad de los rellenos o capas compactadas, en especial si se ven sometidos a flujos de agua que comiencen a drenar los finos y hagan colapsar la estructura de suelo. Este supuesto se confirma, pues las densidades secas máximas no sobrepasan los  $1950 \text{ kg/m}^3$ , las cuales no son altas e indican que el material es liviano y con posible propensión a degradarse. Tal es el caso presentado para los TAJOS A y D. Al igual que la

mezcla de agregados del TAJO C, esta característica podría afectar el funcionamiento del EDG, pues el equipo es sensible al cambio de granulometría en los suelos o mezcla de agregados.

En los suelos de los TAJOS B, C y E se manifestó el efecto de acolchonamiento porque su granulometría granular y relativamente limpia, para materiales de este tipo en el momento de compactarlos, si no se regula bien el agua a añadir, se presentará este efecto de acolchonamiento, en el cual se desperdicia la energía de compactación tratando de conformar el material.

## Construcción de modelos de suelo.

Como se mencionó en la sección de metodología la primera acción es construir un molde apropiado para compactar la cantidad de suelo requerida. (Cuadros 33, , 34, 35, 36, 37 y 38)

El molde debe cumplir con ciertos requisitos:

### Tamaño mínimo (diámetro mayor a 15 pulgadas)

La base del EDG trae las muescas para clavar los dardos a la distancia requerida por el equipo para aplicar los impulsos eléctricos a los suelos el cual es de 12 pulgadas de diámetro. Se requiere una separación mínima de los dardos a las paredes del molde para poder realizar una medición precisa. Por medio de consultas, la empresa Humboldt recomendó usar como diámetro mínimo para el molde 15" (38,1 cm).

### Material del molde

El material del que debe estar construido el molde debe tener una baja o nula capacidad de conducir la electricidad. Esto porque las mediciones se pueden ver afectadas por las distorsiones que pueden causar los materiales conductores, en especial porque los suelos a compactar van a tener un contenido de humedad cercano a la humedad óptima, es decir el material va a estar húmedo y

podría facilitar la transferencia de la electricidad del suelo al molde y provocar una lectura errónea por parte del EDG.

## Durabilidad y compacto

El molde elegido debe ser de un material resistente a los esfuerzos radiales debido a las presiones provocadas por el suelo al ser compactado. Por recomendación de Humboldt se sugirió realizar (si fuese posible) los modelos de suelo en el sitio de trabajo, tomando el material directamente del apilamiento destinado para ser usado en el proyecto a ser analizado, para eliminar o minimizar la variación del tipo de material que afectan las mediciones del equipo; por lo que el molde debe ser capaz de trasladarse, armarse y tener la resistencia necesaria para el tipo de actividad a la que se va a someter.

Teniendo en cuenta los criterios anteriores se analizaron tres opciones y se eligió la más adecuada.

La primera opción fue usar concreto: se pretendió usar tubería (de sección circular) de concreto, pero se rechazó por ser el concreto un material poroso que podría afectar el contenido de humedad de los suelos que estén en contacto con las paredes de la tubería. A pesar de poder ser impermeabilizadas, el tipo de actividad para la que será destinada no garantiza que la capa de impermeabilizante sea duradera o bien capaz de soportar los impactos provocados por las partículas de suelo rozando constantemente la superficie pintada. Además el peso y espesor de la pared la convierten en un molde pesado e incómodo de usar. Esta opción presentaba un menor tiempo en la elaboración del molde y, por ende, permitía que la investigación avanzara en la consecución de las siguientes etapas.

La segunda opción fue confeccionar un cajón de madera en el cual, de igual manera, necesitaría ser impermeabilizado para evitar la fuga de humedad del suelo. Pero tuvo la ventaja de ser liviano y fácil de transportar.

Se construyó el cajón de medidas de 1.8m \* 1.2m \* 0.28m, dividido en 6 módulos de 0.6m \* 0.6m; se impermeabilizó la madera y se forró con plástico de uso industrial. Por razones geométricas el cajón de madera no fue usado para asemejar al método establecido para la prueba del proctor modificado, al ser el molde del

proctor de sección circular. Al ser el cajón de madera de sección rectangular, la distribución de esfuerzos en el suelo al ser compactados no se daría como en el proctor, pues las esquinas impiden que esto se dé al generar zonas de subcompactación. Por otra parte, la cantidad de suelo necesario para llenar los moldes excedía la cantidad de material establecido para realizarlas pruebas, no permitiendo la repetición de pruebas en caso de no cumplir las iniciales. Todo esto porque implicaría un nuevo muestreo, lo que podría representar un nuevo tipo de suelo.

La tercera opción fue usar cilindros de tubería de presión de pared sólida como moldes, por no ser conductores e impermeables. Se presentó la complicación de que en el mercado nacional no existe una tubería con el diámetro mínimo requerido. Se usó la variante de usar el producto Rib-lock la cual es una tubería usada para transportar agua a presión, pero tiene la desventaja de estar formado por una pared delgada en la parte interna y una espiral que recubre la parte externa; esta particularidad impidió la fijación de una base para evitar la fuga de agua por este punto, además de que las aristas resultantes de cortar transversalmente las espirales externas se convierten en zonas de falla de la tubería, al verse sometida a presión provocada por la compactación.

Finalmente se usó como molde los cilindros de rib-lock dentro de los cajones de madera, confinando los tubos con suelo compactado, y fijándolos al fondo del madera mediante cables metálicos. Los primeros moldes se hicieron en estas condiciones, pero como se explica más adelante, el piso de madera del cajón provocaba rebote y vibración en el proceso de compactación, por lo que se buscó otra superficie más rígida para compactar y contrarrestar este problema (piso de concreto).

## Método de compactación

Se trató de apegar la manera de compactar al procedimiento establecido para la prueba de proctor modificado, por lo que inicialmente el suelo se compactó en 5 capas de igual espesor y buscando obtener densidades cercanas a la seca máxima característica del material que se estuviese analizando, esto mediante las relaciones de peso volumen explicadas en la metodología.

Igualmente se construyó un mazo de dimensiones tales que la relación de áreas entre el molde de proctor y la del mazo usado en esta prueba se respetara, para así lograr que la distribución de esfuerzos en el suelo tuviera un mismo comportamiento.

Los primeros moldes se compactaron siguiendo el patrón de 5 capas y con variaciones en la humedad del 2% respecto al peso estimado a partir de la densidad seca máxima seca característica del material; mas las pruebas demostraron que los suelos perdían gran cantidad de agua en el proceso. Esto sucedía una vez sobrepasado el contenido de humedad óptima de los suelos, por lo que se decidió compactar los siguientes moldes en tres capas de suelo. Se observó que la pérdida de agua disminuyó notablemente; igualmente, los problemas de sobrecompactación que presentaban algunos suelos (TAJO B y E específicamente), cesaron al tomar esta medida. La decisión de compactar el suelo en tres capas además tiene la ventaja de que simula los procesos de compactación que se presentan en campo, por lo que el equipo generó mediciones para los modelos de suelo en condiciones similares a las de campo, con espesores de capas mayores a las logradas en el laboratorio inicialmente.

Este sistema tuvo una serie de problemas que son analizados a continuación:

## No existe control de la energía aplicada al suelo

Se descartó compactar los suelos con el mazo del proctor pues la cantidad de golpes por capa resultó ser poco realista (alrededor de 2600 golpes por capa); por lo que se decidió realizar una relación volumétrica y de peso con la densidad seca máxima y los moldes usados. De esta manera se golpeó el suelo hasta lograr que llegara a la marca establecida para la cantidad de suelo calculada. Con la forma de compactar se pierde control sobre la energía aplicada al suelo, por lo que se desvía el criterio de comparación con el método normado. Además, esto, causó que los resultados se vieran afectados, pues en algunos casos se dieron problemas de sobrecompactación, especialmente en el suelo del TAJO E, que, al superar la humedad óptima del suelo, y al ser

este un suelo limpio y aplicarle energía y compactarlo, el material liberaba toda el agua libre entre las partículas, provocando que el agua sirviera como lubricante interno del suelo, lo que permitió que las partículas se acomodaran y conformaran y luego el agua abandonara la estructura, dejando una estructura de suelo más densa.

Para controlar este fenómeno se debería crear un dispositivo que aplique la energía equivalente a la prueba estandarizada, en un número de golpes equivalente al de la prueba de proctor modificado.

## Molde poco rígido

El rib-lock es una tubería hecha de polímeros los cuales tienen la característica de ser flexibles, elásticos y fácilmente deformables. A pesar del confinamiento previo de suelo, no se pudo evitar las deformaciones laterales de los cilindros al compactar el suelo dentro de éstos.

Al deformarse el cilindro se producen dos efectos, que indudablemente afectaron los resultados obtenidos: el primer efecto es que al deformarse la tubería se perdió energía que se debería haber aplicado íntegramente al suelo; el segundo efecto es que, al deformarse, el volumen del cilindro cambia, por lo tanto los supuestos hechos para las pruebas ya no son válidos y los resultados difieren de los esperados.

## Superficie de compactación

Como se mencionó anteriormente se hicieron algunas compactaciones de material introduciendo los cilindros de rib-lock y confinándolos en el cajón de madera previamente construido. En este caso se presentó el inconveniente de que al golpear el suelo para compactarlo la madera rebotaba, provocando que el cilindro se moviera y la energía de compactación no fuese adecuada, pues el cilindro tendía a salir (moviéndose alrededor de 1 pulgada hacia arriba), provocando que el volumen de suelo no fuese igual al calculado al comienzo de la prueba, afectando las mediciones, tanto en el grado de compactación, como en el contenido de humedad, ya que al moverse propició una fuga de agua mayor y más rápida del suelo.

Se decidió compactar sobre el piso de concreto, colocando una lona sobre el mismo para evitar que absorbiese el agua del suelo. Con esto se solucionó el inconveniente de la vibración del molde, pero nunca se logró tener control sobre la pérdida de humedad por la base del molde pues, por las características del tubo, no se pudo fijar una base adecuada para contrarrestar este hecho. Además, la colocación de algún impermeabilizante en los bordes de contacto del piso-molde (silicón) no fue efectivo, ya que al presentarse deformaciones en el molde provocaban que éste se moviera y el agua se liberó de igual manera.

## Equipos poco precisos o no calibrados

El CECO no cuenta con balanzas digitales para capacidades mayores a 12 kg. Las balanzas existentes funcionan bajo principios mecánicos y, además son de uso común, por lo que es difícil mantener estos equipos calibrados. Comparando una medición hecha con la balanza digital y la usada para pesar las muestras de suelo, se encontraron diferencias de cerca de 1.5 kg. Al no tener certeza de las cantidades pesadas, provocó que se tratara de compactar más suelo dentro de un volumen determinado, o bien, el caso contrario, produciendo que la densidad y humedad esperadas del suelo variaran (pues el agua a agregar se calculó respecto al peso seco del suelo, por lo que si hay más suelo del calculado, el contenido de humedad disminuye, o viceversa, si la cantidad de suelo es menor).

A pesar de no poder controlar todas las variables que implica el proceso de compactación, se procedió a realizar las pruebas con los diferentes suelos muestreados. Los procedimientos de compactación se llevaron a cabo con sumo cuidado y tomando todas las previsiones del caso, para tratar de disminuir los efectos de las variables no controladas.

## Modelos de suelos

Con estas consideraciones los modelos de suelo para el TAJO A y D fueron hechos usando como superficie para compactar el cajón de madera; se



tuvieron los problemas de rebote y vibración antes mencionados, y hubo la necesidad de repetir varios puntos debido a que las densidades y humedades no coincidían con los valores esperados y, en ocasiones, se presentó el caso de que la humedad no coincidía con el grado de compactación planeados inicialmente.

Es decir que al sobrepasar o disminuir el contenido de humedad óptimo, es de esperar que el grado de compactación disminuya, pero en varios puntos se dio el caso contrario; esto porque el piso de madera presentaba irregularidades más fuertes en tres de sus compartimentos que incrementaron los efectos de vibración y rebote. Justamente en esos compartimentos fue donde más se levantó el molde de rib-lock y fue donde se esperaban estuvieran más cercanos a la densidad seca máxima y humedad óptima. Por esta razón los puntos en los cuales se esperaba que la densidad (con un mayor o menor contenido de humedad) fuera menor no se dio así, pues éstos fueron compactados en los lugares donde los fenómenos descritos eran menores.

Estos problemas se reflejan en los factores de ajuste logrados para estos dos suelos en particular (cuadros 33 y 36); además en estos suelos, por las condiciones de compactación que se usaron, son los que más puntos se debieron repetir.

En el caso del material del TAJO A se dio que, por motivos de préstamo de material para uso interno del CECO, se dio la necesidad de hacer dos muestreos al material; con el suelo del primer muestreo se realizaron las pruebas de granulometría, límites y densidad seca máxima, para completar la información del modelo de suelo y el segundo muestreo se usó para generar los puntos para crear el modelo de suelo. El problema que surgió a partir de esta acción fue que el material del primer muestreo varió notablemente su granulometría respecto al del segundo muestreo, tanto así que este material fue usado para realizar una prueba con estudiantes de proctor modificado y se obtuvieron densidades de alrededor de 1680 kg/m<sup>3</sup>, lo que implicó una variación en el material de alrededor de 200 kg/m<sup>3</sup>, según los resultados obtenidos con el primer suelo muestreado.

No se repitió la prueba para lograr una nueva clasificación del material, porque no se contaba con material necesario para hacerlo. Además, no se tenía conciencia de que la variación

significativa de este material sería trascendental para las mediciones con el EDG; para cuando se entendió esto, se habían hecho las pruebas establecidas para esta investigación. Esta situación no representa un fracaso, todo lo contrario, ayuda a entender que los parámetros de densidad y clasificación del suelo deben permanecer constantes o con variaciones muy pequeñas, porque el equipo demostró ser muy sensible a estas variaciones. Por ejemplo, si al equipo se le generó un modelo de suelo con un material dado (relativamente fino), y al momento de hacer una medición en campo se encuentra un fragmento de material atípicamente grande que no se encontraba en los modelos de suelo, éstos puede alterar la prueba; o bien el caso contrario, si el material tiene una mayor concentración de gruesos y al momento de hacer la prueba se hace en una zona donde se concentran finos; el EDG mostrará un error donde se indica que la medición queda fuera de los rangos del modelo de suelo asociado.

El equipo tiene la limitante de que la presencia de minerales o sales disueltos en los suelos o el agua que se usa para mezclar el material puede afectar el resultado de las mediciones, pues distorsiona el impulso eléctrico que emite el equipo y lo hace mostrar resultados incorrectos. El EDG tampoco es utilizable en materiales estabilizados, pues con estos materiales se logran densidades superiores a las del proctor modificado, con contenidos de humedad menores y modificando la granulometría y comportamiento del material original, provocando en el equipo mediciones erróneas.

Un factor importante a la hora de crear los modelos de suelo es considerar que, para poder completar la información necesaria para que éste sea funcional se debe usar un método normado para determinar los parámetros de densidad húmeda y porcentaje humedad de los puntos que componen el modelo de suelo. Esto implica que el modelo de suelo arrastra en sus mediciones la incertidumbre del método con el cual se determinan los datos requeridos. Se debe considerar la incertidumbre que produce el ambiente sobre la prueba, los equipos usados, la destreza del encargado de ejecutar la prueba, así como la variación de los materiales usados.

Como se mencionó anteriormente, en la ejecución de las pruebas hubo limitantes de equipo, especialmente en balanzas. El cono de

arena presenta la desventaja de que se deben realizar reiteradas mediciones en balanzas, hornos, y en especial la arena que se usa en cada medición se contamina con residuos del material que se chequea, por lo que su densidad puede variar y afectar la medición.

Al considerar esta situación se convierte en un factor de peso el hecho de que el EDG dependa de otro método para poder completar la información necesaria para poder realizar mediciones en campo, pues al arrastrar implícitamente todas las incertidumbre y posibles fuentes de error en las mediciones del método seleccionado, la exactitud de las mediciones del EDG se pueden ver afectadas.

Para la correcta creación de los modelos de suelos el personal de Humboldt recomendó crear 5 puntos de material compactado, y con éstos lograr un factor de ajuste (FIT) mayor a 0,7, para que el equipo pueda realizar las relaciones necesarias para determinar los parámetro de interés en el campo. No obstante los modelos de suelo requieren un mínimo de tres mediciones para poder funcionar. La experiencia de crear estos modelos mostró que si se realizan correctamente, con tres puntos es suficiente para lograr FIT iguales o mayores a 0,7. La recomendación de hacer 5 o más puntos recae en el hecho de que el equipo genera dos rectas de ajuste, una para humedad y otra para compactación; si esas rectas se ajustan bien a los puntos en dispersión de las mediciones hechas, el FIT va a ser alto, y bajo en el caso contrario, lo que indica que entre mejor describa las rectas el comportamiento de las mediciones, se lograran factores de ajuste mayores.

Los valores extremos se pueden deshabilitar para que los restantes se ajusten de una mejor manera y se eleve el valor del factor de ajuste. En las pruebas se tuvo que hacer una revisión de los datos, se dejaron habilitados los que se ajustaron y permitieron lograr modelos de suelos exitosos, y se deshabilitaron los datos extremos.

Para los TAJOS A y D, hubo serias complicaciones en el proceso de compactación y control de humedad por lo que no se lograron FIT superiores al 0.7 recomendado, pues las pruebas mostraron un comportamiento atípico.

Para los tres suelos restantes se tomó la decisión de compactar los materiales sobre el piso de concreto, colocando una lona en el fondo de los moldes, y de esta manera se eliminó los

problemas de rebote y vibración sobre los moldes usados para compactar. El problema de la pérdida de humedad del material no pudo ser controlado, pues los bordes que estaban en contacto con la superficie no pudieron ser sellados. Se probó revestir con plástico el interior de los moldes, pero el suelo al ser compactado lo rompió y el agua se escapó de igual manera, también se colocó silicón en los bordes pero las deformaciones sufridas por el molde al compactar el suelo lo rompieron.

El problema de pérdida de agua al compactar se presentó especialmente en los suelos B y E, por ser materiales arenosos, limpios o levemente contaminados de finos.

No obstante se notó que el cambio de la superficie de compactación mejoró, pues los FIT obtenidos fueron superiores a 0.7,

Cabe mencionar que el modelo de suelo del TAJO B contó de tres puntos activos y se logró un FIT de 0.731, lo que confirma que con solo tres el modelo de suelo puede quedar completo.

## Sitios de trabajo

Una vez terminados los modelos de suelo, se procedió a realizar las pruebas de campo, mas solo dos tajos (A y E) usaron los materiales que se muestrearon.

Se hicieron las pruebas con el EDG y el cono de arena en los proyectos mencionados; los materiales que estaban siendo colocados se observaban iguales a los que se usaron en un principio para la creación de los modelos de suelo (en el caso del TAJO A el material era muy similar al del primer muestreo), pero hubo problemas con el EDG porque presentaba el siguiente mensaje:

“The information in the field test falls outside of the limits of the associated soil model. EDG results for field test may not be accurate”.

Según el manual del equipo y el personal de Humboldt, este mensaje puede aparecer por dos razones: la primera es que el modelo de suelo no tiene una cantidad de puntos suficientes para poder realizar las mediciones (es decir que el modelo de suelo no tiene un FIT adecuado para realizar la prueba) y la segunda es que el material

cambió granulométricamente y el equipo reconoció esa variación. El equipo, al realizar una medición, genera una firma electrónica del suelo y su comportamiento con el impulso eléctrico, por lo que si el suelo cambia, el comportamiento ante la electricidad también lo hace, y el equipo lo reconoce; el EDG reconoce este problema y presenta el mensaje anterior; lo anterior indica que la prueba no es tan precisa como se desea.

En el caso del TAJO A, como ya se mencionó, el material con que se hizo el modelo de suelo era diferente (presentaba un mayor contenido de finos) al que se usó para las pruebas iniciales y al que se midió en campo, debido a que correspondían a materiales de diferentes muestreos. Por esta razón los resultados del EDG son tan diferentes a los del cono de arena. En el caso del TAJO E se considera, que para que el equipo presentara el mensaje, fue por algún grado de variación en la composición de la mezcla de agregados.

Al haber posibilidad de hacer mediciones en campo solo con dos suelos, se decidió hacer los JOB SITES en el laboratorio, usando los mismos moldes que para los SOIL MODELS, solo que en este caso se buscaría mantener el contenido de humedad cercano al óptimo de cada material y que todos los puntos estén muy cercanos entre sí.

En los cuadros 39, 40, 41, 42, 43 y 44 se presentan los resultados de los sitios de trabajo; están también las dos mediciones hechas en campo de los TAJOS A y E1 antes indicadas.

Se observa que los resultados muestran que el objetivo de mantener constante (para simular las condiciones de campo) la humedad y grado de compactación en los diferentes puntos que componen la muestra se cumplió, lo que asegura que los controles de los parámetros que afectan la prueba estuvieron bajo control.

## Análisis estadístico

### Método de la AMRL

Para determinar si los dos métodos de medición son comparables entre sí, se usó la metodología de la AMRL para comparar los resultados de las dos pruebas (cono de arena y

EDG). Se usó como parámetro la prueba del cono de arena por ser ésta una prueba normalizada con un método determinado a seguir, que permite reproducibilidad tomando en cuenta que dicho método es de aceptación internacional.

Según la metodología de la AMRL, una de las formas de validar una prueba es compararla con una prueba estandarizada y comprobar que los resultados son equivalentes entre sí, teniendo en consideración las limitantes de cada prueba.

La prueba se basa en comparar la dispersión de los datos a evaluar alrededor de la media de los datos de la prueba usada como patrón, estableciendo calificaciones a partir del valor "z" calculado. Las calificaciones que establece el método a partir del valor absoluto de "z" representan la cantidad de desviaciones estándar que se alejan los datos de la media de la prueba patrón. Entre más grande sea el valor "z", más alejado está el dato de la media y menos exacta es la prueba. Usando como valor límite la calificación de 3, la cual describe una prueba que tiene un comportamiento apenas aceptable según los parámetros de comparación (es decir que tiene problemas de control, procedimiento o falla de equipos como balanzas, problemas fácilmente solucionables), se tomó como criterio para la evaluación de las pruebas que las calificaciones iguales o superiores a 3 demuestran que la prueba es exacta y se comporta adecuadamente respecto a la prueba parámetro; caso contrario, si la calificación es menor a 3, esto basado en los preceptos del método de la AMRL.

El método de la AMRL se utilizó también para evaluar la prueba del cono de arena y EDG por separado, para determinar el grado de exactitud de la prueba en sí misma. La prueba se planificó para que las variaciones en humedad y grado de compactación no cambiaran en los diferentes puntos. Estas pruebas fueron aplicadas a los resultados de porcentaje de humedad y compactación de los JOB SITES de los diferentes suelos y se muestran en los cuadros, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55 y 56. Se observa que las variaciones entre los datos no es significativa, pues las puntuaciones rondan de 3 a 5 (la mayoría de las puntuaciones se encuentran en 4 y 5, la puntuación de 3 es esporádica). Esto indica que la variación de los datos respecto a la media es poca y el objetivo de que los factores medidos se mantuvieran constantes se cumplió, dando como resultado la existencia de un

adecuado control de las variables que afectan el procedimiento de compactación.

En estos cuadros se observa que el cono de arena y el EDG presentan variaciones pequeñas en sus mediciones, pero se observa que al comparar las mediciones de cada punto con los resultados del EDG, existe discrepancia entre los datos. Al observar cuidadosamente los resultados de los datos, se observa que el equipo tiene un mejor comportamiento con los suelos arenosos y drenantes. En especial con los TAJOS B y E, se observa que los datos tienen un mejor comportamiento respecto a los del cono de arena.

El proceso de compactación se convierte en una prueba de repetición, por lo que para comparar los dos métodos se usa el promedio de los datos del EDG respecto al promedio y desviación estándar de los datos del cono de arena; es por esta razón que se encuentra una sola calificación por suelo evaluado (cuadro 57)

En el caso del TAJO C resultó que, a pesar de tener el FIT más alto logrado en los modelos de suelo, la correlación entre los datos del cono de arena y el EDG es prácticamente nula. Se observa que las mediciones mantienen una diferencia constante tanto en grado de compactación como en humedad. Además, el equipo no presentó mensaje alguno sobre error, por lo que la medición es correcta. El EDG en este caso presentó discrepancias constantes respecto a las mediciones del cono de arena.

El proceso se realizó con normalidad y se controlaron las posibles fuentes de error. Lo que pudo ocasionar la variación en la prueba puede ser algún tipo de distorsión en el impulso eléctrico que emite el EDG por parte del suelo, esto porque cada material tiene una reacción característica ante tensiones eléctricas, dependiendo de los minerales que lo componen, así como de la geometría de las partículas del suelo, el contenido de humedad y tipo de material fino (pasando la malla N°200) que esté presente en la granulometría del suelo. Por ejemplo, las arcillas están formadas por pequeñas placas; su estructura es tan fina que las interacciones internas del material y la interacción de este con el agua son de tipo eléctricas formando enlaces fuertes entre las partículas que pueden alterar las mediciones eléctricas del material. El realizar un estudio de si el tipo de material posee algunas características que afecten la interacción con la electricidad queda fuera de los alcances de éste

proyecto, pero es un factor que se obvió y definitivamente puede afectar las mediciones del EDG.

La evaluación de los resultados del EDG respecto a los del cono de arena mediante el procedimiento establecido por la AMRL se muestra en el cuadro 57. Basado en los criterios establecidos en la Norma INTE-ISO/IEC 17025, una de las formas de validar un método no normado es mediante la comparación de los resultados con un patrón aceptado internacionalmente y con una norma que establezca los pasos y limitaciones del método, lo cual asegura reproducibilidad de la prueba y exactitud de las mediciones. En el caso concreto de los métodos comparados en este proyecto, es evidente que los resultados del EDG se encuentran muy alejados de la media de la prueba patrón usada para este proyecto, tanto en contenido de humedad como en el grado de compactación. Se evidencia que el equipo tiende a fallar más en la estimación del contenido de humedad, pues de las pruebas realizadas solo la del TAJO B resultó con una calificación superior a cero, lo que es un claro indicativo de que el equipo tiene deficiencias en el cálculo de éste parámetro, al menos con las mediciones realizadas. En el grado de compactación se observa que el equipo tiende ser más exacto, pues en tres de los cuatro sitios de trabajo confiables tuvo calificaciones iguales o superiores a 3. (Los sitios de trabajo confiables son los de los TAJOS B, C, D y E2, pues se hicieron bajo un mismo procedimiento y condiciones de trabajo; mientras que los del TAJO A y E1 son mostrados solo para indicar las variaciones que se pueden dar a partir de la variación del suelo).

Las pruebas en sí mismas muestran un comportamiento bueno, pero al compararlas se observa que las variaciones son importantes entre los métodos, lo que evidencia, basándose en los resultados del método, que las pruebas no son comparables bajo las condiciones y procedimientos que se aplicaron para llevarlas a cabo. Se debe retomar la investigación y corregir todos los problemas y limitaciones que se analizaron en este apartado.

## Análisis de medias (prueba t-pareada)

Se realizó un análisis de los datos por medio de una prueba t-pareada para determinar si las medias de los datos de los dos métodos tienen un comportamiento similar, o bien pueden llegar a ser iguales. La prueba parte del supuesto de que los datos son tomados en pares bajo igualdad de condiciones y que los datos fueron obtenidos en pares, es decir compactación-compactación, %humedad-%humedad, una con cada método, situación que se cumplió a lo largo de la investigación. Con esta prueba se trató de analizar las probabilidades de que las medias de los métodos sean iguales eliminando los posibles errores sistemáticos que pudo haber presentado el experimento.

En el cuadro 58 se muestran las probabilidades de que en cada suelo las medias de los parámetros medidos sean iguales; el intervalo de confianza muestra los rangos de variación de los datos a partir de la media. Si dentro del intervalo de confianza está el valor cero, quiere decir que las dos medias en algún momento pueden ser iguales. Es decir que las dos curvas Gaussianas que representan las probabilidades de cada prueba se cortan y comparten un área de sobreposición de probabilidades, provocando que en algún momento los parámetros puedan ser iguales. Analizando cada suelo por separado, se confirmó que los suelos arenosos y drenantes son los que mejor se comportaron (B y E), son los que presentaron resultados más cercanos a los del cono de arena. Esto confirma que el EDG pudo ser alterado por el tipo y porcentaje de materiales finos (pasando la malla N° 200) en la estructura

de los suelos. Esto quiere decir que los materiales con los contenidos de finos más altos fueron los que presentaron las diferencias más amplias en los resultados. Las probabilidades de que las medias de los datos sean iguales son bajas, y en la mayoría de los suelos esta cercana a 0, especialmente en los datos de humedad. En grado de compactación los resultados tienen un mejor comportamiento y presentan probabilidades más altas lo que asegura que en este parámetro no tuvo tanta dispersión respecto al cono de arena, como ya se mencionó, especialmente en suelos arenosos y prácticamente limpios.

Se analizó de igual manera la tendencia general del total de mediciones (de los cuatro JOB SITES comparables), y se obtuvo que, en general, la humedad y el grado de compactación medido por el EDG tienen probabilidades bajas para llegar a ser iguales a las del cono de arena, igual que en el análisis que se hizo para cada suelo. En este caso la humedad tienen una mayor probabilidad de ser igual a la de la prueba patrón, pero es así porque sus datos tienen una mayor dispersión respecto a la media, lo que provoca que el intervalo de confianza sea más amplio que en el caso de la compactación, donde los datos fueron menos dispersos entre los diferentes suelos analizados, lo que provocó que el intervalo de confianza sea más estrecho. Lo importante es que los datos muestran que las pruebas presentan, en la mayor parte de los datos, una dispersión amplia entre las medias analizadas, por lo que los métodos de medición brindan resultados diferentes ejecutando las pruebas en igualdad de condiciones, para las pruebas descritas.

# Limitaciones

- La cantidad de material para la realización de las pruebas fue limitada, por lo que no se pudo planear las pruebas para repetir ciertos puntos donde existió duda de los resultados obtenidos.
- Los equipos usados en las pruebas no fueron calibrados, por lo que las mediciones hechas arrastran un grado de incertidumbre mayor a las asociadas a ellos (especialmente las balanzas).
- La disposición de espacio para almacenaje de materiales en el CECO es muy limitado, por lo que implica almacenaje y desalmacenaje continuo, lo que complica la logística de movilización de equipo y materiales para la realización de las pruebas. Esto genera un gasto excesivo de tiempo
- En general no se tuvo control sobre la manera de extracción de los materiales. De haberlo tenido aseguraría tener un mayor criterio sobre las posibles variaciones en el material que podrían afectar las mediciones del EDG.
- El EDG depende de mediciones de un método ajeno a él para determinar los parámetros de humedad y grado de compactación necesarios para completar los modelos de suelo, lo que implica que arrastra las incertidumbres asociadas al método usado para éste fin (cono de arena y equipos de medición utilizados en esta investigación)
- En el mercado nacional no se encontraron los materiales convenientes para la fabricación de un molde adecuado para compactar los suelos. Se escogió la mejor opción disponible y que mejor se adaptó a los objetivos y alcances de la investigación planteada.
- No se contó con el tiempo ni los medios necesarios para realizar un estudio más detallado sobre la composición química de los suelos y de salinidad del agua usada, por lo que, a pesar de no ser un tema planteado entre los objetivos, es un factor a considerar en investigaciones futuras acerca del funcionamiento del EDG.
- No existió un procedimiento guía para desarrollar la investigación de una forma más certera, por lo que muchas de las cosas realizadas en la investigación fueron erradas y tuvieron que ser retomadas hasta lograr resultados acordes a lo esperado. Los procedimientos enviados por los fabricantes del equipo fueron confusos y ocasionaron atrasos innecesarios en el proyecto.
- No se contó con proyectos en campo activos donde se utilizaran los materiales que fueron usados en la investigación, y que permitieran desarrollar las pruebas de campo tal como se planteó en los objetivos, por lo que se hicieron estas pruebas en el laboratorio bajo condiciones controladas.

# Conclusiones

- Para la investigación se logró caracterizar y evaluar el desempeño de 5 materiales utilizados para procesos de compactación en construcción general, utilizando diversas pruebas de laboratorio que permitieron determinar la información base para el resto de la investigación.
- El molde más efectivo fue el cilíndrico, ya que hubo una distribución más eficiente de los golpes y, por ende, de los esfuerzos, similar a la prueba proctor modificado, y permitió aprovechar mejor el material disponible.
- Se logró desarrollar un procedimiento para la elaboración de modelos de suelo, que consistió en cinco pasos:
  6. Cálculo del peso del suelo a compactar y la cantidad de agua a añadir (1,5% para materiales drenantes y 2% para materiales arcillosos con alta capacidad de absorción de agua).
  7. Compactar el suelo en tres capas.
  8. Realizar la prueba con el EDG y el cono de arena seguidamente (puede ser realizado también en campo).
  9. Completar el modelo de suelo con los resultados del cono de arena.
  10. Ajustar el modelo de suelo para obtener un FIT adecuado.
- El equipo presentó la desventaja de depender de otra prueba para poder funcionar (requiere parámetro de densidad y humedad de otros métodos de medición para poder completar los modelos de suelo e indirectamente los JOB SITES)
- Si se obtiene un FIT menor a 0.7 el EDG realiza las mediciones de campo pero advierte que las mediciones desplegadas puede que no sean tan acertadas como se requiere.
- A lo largo de la investigación no se pudo controlar efectivamente la energía de compactación usada en el laboratorio, lo cual influyó en los resultados obtenidos.
- A pesar de ser apto para realizar mediciones en cualquier tipo de suelo o mezcla de agregado grueso y fino, el EDG mostró una mayor precisión con materiales arenosos y drenantes (limpios o medianamente contaminados).
- El EDG es recomendable para realizar controles de compactación en campo en proyectos de gran envergadura y que garanticen la utilización de materiales cuyas características físicas y mecánicas se mantengan estables a lo largo del proyecto, pues la elaboración de los modelos de suelo es laboriosa y exige un control estricto del proceso.
- Si los dardos del EDG no pueden ser clavados en el material compactado, la prueba no se puede realizar y se debe usar otro método para la medición de la densidad y humedad en campo.
- Los proyectos a evaluar deben mantener un adecuado control sobre el material a usar, se debe asegurar que no variará significativamente a lo largo del trayecto así como la calidad del agua, pues la medición puede verse afectada.
- El EDG es sensible a variaciones en la granulometría del material, minerales conductores y salinidad del agua, por lo que se debe verificar que estos parámetros son normales y/o no alteradores de las funciones del equipo a la hora de analizar un material.
- La evaluación de las pruebas por medio del método de la AMRL mostró que las pruebas

fueron correctamente ejecutadas, mas al comparar ambos métodos de medición de humedad y grado de compactación en sitio, éstos muestran variaciones.

- Siguiendo el procedimiento desarrollado para comparar estas dos pruebas se demostró que en este caso los métodos no brindaron resultados comparables entre sí, por lo que el EDG no mostró ser confiable en sus resultados respecto a los brindados por el cono de arena.
- El densímetro eléctrico EDG resulta impráctico en aquellas regiones donde las fuentes de materiales son muy variables ya que el tiempo invertido en la creación de un modelo de suelo para un tipo de material es considerable y no permite al cliente tomar decisiones inmediatas en cuanto a un proceso de compactación se refiere, lo cual es una desventaja ante equipos sofisticados como el densímetro nuclear.
- Para la creación de un modelo de suelo, se deben realizar al menos 3 pruebas de suelo y máximo 16. Entre más pruebas se realicen, el FIT será aún más cercano a uno, siempre y cuando dichas pruebas sean precedidas por un método de compactación adecuado.



# Recomendaciones

- Para futuras investigaciones sobre el mismo tema, se debe revisar el método aplicado para el desarrollo del mismo, especialmente en temas como:
  1. Control de humedad
  2. Control de energía de compactación
  3. Efecto de la electricidad en los suelos
- Realizar estudios químicos a los materiales y al agua utilizada para determinar si las interacciones electroquímicas y salinidad pueden afectar la medición del EDG
- Construir un molde (preferiblemente cilíndrico) de material no conductor, rígido y con una base que impida la fuga del agua que contiene el material compactado en él. Además, debe tener la característica de ser fácilmente manipulable y transportado, si se quiere realizar un modelo de suelo en campo.
- El hecho de que el EDG mostrara no ser tan certero como se esperaba no es indicativo de que no funciona del todo, sino que con el procedimiento planteado no se logró determinar la efectividad del equipo por las limitaciones y problemas surgidos en la investigación. Es recomendable retomar la investigación, evaluarla y redireccionarla para lograr con mayor certeza determinar la precisión del EDG respecto a una prueba normada.
- Es necesario corregir los fallos (descarga de datos EDG hacia PC, específicamente) del software que permite la descarga o introducción de la información en el EDG, para una mayor agilidad en la manipulación de los datos de las pruebas. En caso de no poder repararse comunicar a Humboldt para corregir estos fallos.
- Mantener calibrados los equipos usados para investigación en el CECO, pues su uso influyó notablemente en los resultados esperados en las pruebas. Dado que el equipo es usado para venta de servicios, se recomienda dar una capacitación a los estudiantes que realizan proyectos de investigación para mantener en buen estado los equipos y su funcionamiento.
- Calibrar el EDG permitiría una mayor confiabilidad en sus resultados; el equipo cuenta con un dispositivo para lograr esto, pero sería recomendable que sea calibrado por un laboratorio certificado en el uso de este equipo.
- Realizar los modelos de suelo preferiblemente en campo, para tener la certeza de usar el mismo material que se va a usar en campo; de no ser posible esto, se debe tener un adecuado control para que el material no varíe.
- Realizar chequeos de proyectos en campo es importante, pues las condiciones de campo y laboratorio son muy diferentes, ya que en campo no se tiene tanto control sobre los procedimientos y materiales como los hay en el laboratorio.
- Trabajar con la empresa Humboldt en la creación de un método más eficaz que permita agilizar la obtención de resultados en campo.
- Repetir el estudio utilizando otro método como patrón (densímetro nuclear por ejemplo), para eliminar las variables de error asociadas al cono de arena que afectaron los resultados.

# Referencias

- Juárez. R. 2002. MECÁNICA DE SUELOS, FUNDAMENTOS DE LA, MECÁNICA DE SUELOS. México. Editorial LIMUSA. N°: 97:163p
- Barrantes. M. 2001. ELEMENTOS DE ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA. Costa Rica. Editorial EUNED. N°: 271:334p
- Miller. I. 1973. PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA PARA INGENIEROS. New Jersey. Editorial Prentice - Hall Inc. N°:242:305p
- Montgomery. D et al. 1996. PROBABILIDAD Y ESTADÍSTICA APLICADAS A LA INGENIERÍA. México. Editorial McGRAW-HILL. N°:625:800p
- Bowles. J. MANUAL DE LABORATORIO DE SUELOS EN INGENIERÍA CIVIL. Editorial Mc Graw Hill.
- Solano. G. 2005. ANÁLISIS TÉCNICO, ECONÓMICO Y ENERGÉTICO DE SISTEMAS DE CONSTRUCCIÓN PARA VIVIENDAS DE INTERÉS SOCIAL. Informe proyecto de graduación. Escuela de Ingeniería en construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. N°:1:55p
- Fernández. S. 2009. CLASIFICACIÓN DE SUELOS. CARTAGO. Comunicación personal.
- Fournier. R. 2009. LÍMITES DE ATTERBERG. Cartago. Comunicación personal.
- Baltodano. R. 2009 MÉTODOS DE COMPACTACIÓN. Cartago. Comunicación personal.
- Baltodano. R. 2009 RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE SUELOS Cartago. Comunicación personal
- Fernández. S. 2009. PROCTOR MODIFICADO. Cartago. Comunicación personal.
- MOPT. 2009. MÉTODOS DE COMPACTACIÓN. MANUAL Cartago. Comunicación personal
- Dondi. A. 2009. CONSTRUCCIÓN DE BASES Y SUB-BASES. Cartago. Comunicación personal
- Cuevas. R. 2009. MÉTODO ESTADÍSTICO DE LA AMRL. Cartago. Comunicación personal.
- Fernández. S. 2009. PRUEBAS INTERLABORATORIOS (USO DE MÉTODOS NO NORMADOS). Cartago. Comunicación personal.
- Laporte. G. 2009. IDENTIFICACIÓN DE FUENTES DE EXTRACCIÓN DE MATERIALES PARA COMPACTACIÓN. Cartago, Comunicación personal
- Fournier. R. 2006. Presentaciones mecánica de suelos 1. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- ASTM D 420. 2003. SITE CHARACTERIZATION FOR ENGINEERING DESIGN AND CONSTRUCTION PURPOSES
- ASTM D 422. 2003. STANDARD TEST METHOD FOR PARTICLE-SIZE ANALYSIS OF SOILS
- ASTM D 4318. 2003. STANDARD TEST METHODS FOR LIQUID LIMIT, PLASTIC

LIMIT, AND PLASTICITY INDEX OF SOILS

[ySu\\_iCobEM5jT\\_e8D&client=firefox-a#v=onepage&q=&f=true](#)

ASTM D 2487. 2003. STANDARD PRACTICE FOR CLASSIFICATION OF SOILS FOR ENGINEERING PURPOSES (UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM)

[http://bp2.blogger.com/2YLtooR18gY/R9\\_VIX10nLI/AAAAAAAAAOk/8VjKsbMIB8Q/s1600-h/Dibujo1111111.bmp](http://bp2.blogger.com/2YLtooR18gY/R9_VIX10nLI/AAAAAAAAAOk/8VjKsbMIB8Q/s1600-h/Dibujo1111111.bmp)

ASTM D 1556. 2003. STANDARD TEST METHOD FOR DENSITY AND UNIT WEIGHT OF SOIL IN PLACE BY THE AND-CONE METHOD1

ASTM D 1557. 2003. STANDARD TEST METHODS FOR LABORATORY COMPACTION CHARACTERISTICS OF SOIL USING MODIFIED EFFORT (56,000 FT-LBF/FT<sup>3</sup> (2,700 KN-M/M<sup>3</sup>)) 1

ASTM D 670-96. 2003. STANDARD PRACTICE FOR PREPARING PRECISION AND BIAS STATEMENTS FOR TEST METHODS FOR CONSTRUCTION MATERIALS1

INTECO. 2005. REQUISITOS GENERALES PARA LA COMPETENCIA DE LOS LABORATORIOS DE ENSAYO Y DE CALIBRACIÓN

MOPT: CONAVI. 2002. ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSERVACIÓN DE CARRETERAS, CAMINOS Y PUENTES DE COSTA RICA CRM2002. N°157:210p

Organismo Argentino de Acreditación. 2003. GUÍA PARA VALIDACIÓN DE MÉTODOS DE ENSAYO. N°: 4:5p

## Referencias de internet.

[www.humboldt.com](http://www.humboldt.com)

<http://books.google.co.cr/books?id=3OPOaDHQC8wC&pg=RA1-PA285&dq=preconsolidacion&ei=pF->

# Apéndices

En esta sección se presenta la totalidad de los resultados (Cuadros, figuras y cálculos) obtenidos en las pruebas realizadas a los materiales obtenidos en las fuentes de extracción de materiales analizadas para este proyecto. Las pruebas fueron realizadas siguiendo los procedimientos de las normas ASTM estipuladas según la prueba a realizar, por lo que los datos se consideran fidedignos y confiables para el proyecto de investigación realizado.

Los resultados de las pruebas fueron divididos por tajo, debido a que se muestrearon diferentes fuentes de material. Cabe resaltar que se manejan los tajos por designación por orden alfabético, y no por el nombre del tajo en sí, debido al compromiso adquirido de que la información de las pruebas es confidencial. Los cuadros se colocaron siguiendo el orden lógico de las pruebas realizadas, para alcanzar los objetivos planteados al inicio de este documento.

Apéndice 1. Constantes de equipos usados en las pruebas de laboratorio

Apéndice 2. Resultados pruebas de laboratorio TAJO A

Apéndice 3. Resultados pruebas de laboratorio TAJO B

Apéndice 4. Resultados pruebas de laboratorio TAJO C

Apéndice 5. Resultados pruebas de laboratorio TAJO D

Apéndice 6. Resultados pruebas de laboratorio TAJO E

Apéndice 7. Modelo de suelo TAJO A

Apéndice 8. Modelo de suelo TAJO B

Apéndice 9. Modelo de suelo TAJO C

Apéndice 10. Modelo de suelo TAJO D

Apéndice 11. Modelo de suelo TAJO E-1

Apéndice 12. Modelo de suelo TAJO E-2

Apéndice 13. Sitio de trabajo TAJO A.

Apéndice 14. Sitio de trabajo TAJO B

Apéndice 15. Sitio de trabajo TAJO C

Apéndice 16. Sitio de trabajo TAJO D

Apéndice 17. Sitio de trabajo TAJO E-1

Apéndice 18. Sitio de trabajo TAJO E-2

Apéndice 19. Prueba t-pareada TAJO A

Apéndice 20. Prueba t-pareada TAJO B

Apéndice 21. Prueba t-pareada TAJO C

Apéndice 22. Prueba t-pareada TAJO D

Apéndice 23. Prueba t-pareada TAJO E-1

Apéndice 24. Prueba t-pareada TAJO E-2

Apéndice 25. Imágenes del proyecto

## Apéndice 1. Constantes de equipos usados en las pruebas de laboratorio

PESOS DE BANDEJAS USADAS EN EL CUARTEO DE LAS MUESTRAS DE SUELO.	
Bandeja	Peso (kg)
	± 0,01 kg
# 3	4,44
# 4	4,38
# 5	4,44
# 10	4,36
# 29	4,5
# 10	4,475

VOLUMEN DE MOLDE UTILIZADO EN LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO					
Diámetro (cm)	15,2	Promedio	15,13	Volumen (cm <sup>3</sup> )	2056,22
	14,85				
	15,35				
Altura (cm)	11,45		11,43		
	11,415				
	11,43				

CONSTANTES A USAR EN CÁLCULOS		
$\rho_{arena}$	1330	(kg/m <sup>3</sup> )
Volumen cono 9	1096	cm <sup>3</sup>
Volumen cono 7	1110	cm <sup>3</sup>

## Apéndice 2. Resultados pruebas de laboratorio TAJO A

DATOS DE LAS MUESTRAS USADA PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA DE LA PARTE GRUESA Y FINA DEL MATERIAL.			
Granulometría Gruesos		Granulometría Finos	
	Peso (kg)		Peso (gr)
Medición	± 1 gr	Medición	± 0,1 gr
$W_m + B27$	15,524	$W_m + B42$	527,7
Bandeja # 27	2,517	Bandeja # 42	67,5
$W_{ms} + B27$	13,398	$W_{ms} + B42$	435,99
$W_{ms}$	10,881	$W_{ms}$	368,49
%w	15,87	%w	21,03
$W_{mfs} + B27$	12,108	$W_{mfs} + B42$	223,51
$W_{mfs}$	9,591	$W_{mfs}$	156,01

BANDEJAS UTILIZADAS EN EL PESA DE MATERIAL RETENIDO EN LOS DIFERENTES TAMICES			
Bandeja #3	1295	g	Hasta ret N° 4
Bandeja #203	65,73	g	a partir de N° 10

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO A	
Límite plástico	
Al tratar de realizar los rollitos de suelo, éste no permitía su formación por lo que el suelo se clasifica como NP	

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO A				
Límite líquido				
Prueba #	1	2	3	4
Bandeja #	32	23	2	41
Bandeja + suelo húmedo	20,004	19,259	23,298	21,279
Bandeja + suelo seco	16,425	15,823	18,495	17,028
Peso de agua	3,579	3,436	4,803	4,251
Peso de bandeja	6,379	7,077	6,763	6,924
Suelo seco	10,046	8,746	11,732	10,104
Número de golpes	39	30	23	19
Contenido de humedad	35,626%	39,287%	40,939%	42,072%

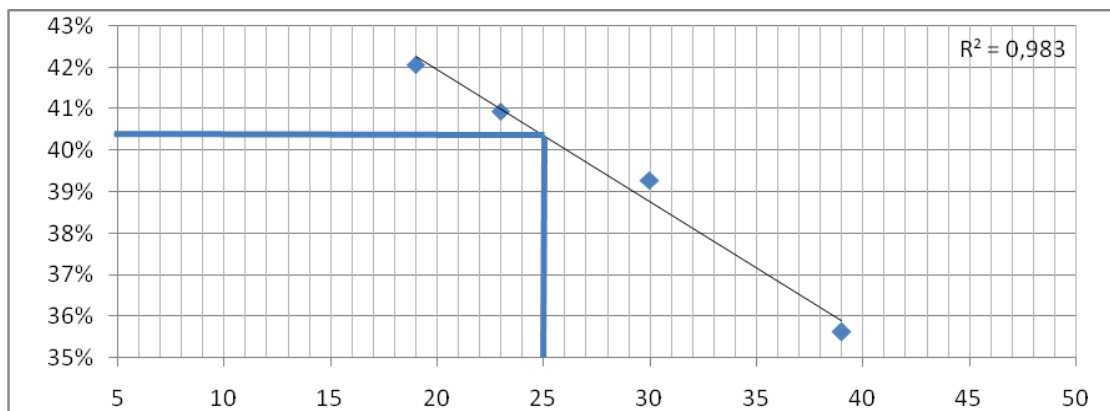


FIGURA37: DETERMINACIÓN GRAFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO A<sup>18</sup>

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL A PARTIR DE LOS DATOS DE LA GRANULOMETRÍA		
Procedimiento de clasificación		
1	No es suelo orgánico	
2	Suelo Granular	Pasa malla N° 200 <50%
3	El suelo es una grava	Retenido N° 4 > 50%
4	Material sucio	Pasa malla N° 200 > 12%
5	Al momento de realizar la prueba para determinar los límites de Atterberg, para éste material se determino que no se puede encontrar la humedad para la cual realizar la prueba para determinar el límite plástico, por lo que el material se clasifica como NP (no plástico)	
6	El material se clasifica como "Grava mal graduada contaminada con limos"	
7	Símbolo GM	

DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS PARA EL PROCTOR MODIFICADO					
Descripción	Peso (kg)	Peso (kg) - B #	%	%	
	± 125 gr	± 125 gr		Gruesos	Finos
$W_{\text{Pasando 2" Retenido 3/4"+ B\#3}}$	40,5	36,06	27,07	Gruesos	56%
$W_{\text{Pasando 3/4" Retenido #4+ B\#4}}$	43	38,62	28,99		
$W_{\text{Pasando #4}}$	58,55	58,55	43,95	Finos	44%
$W_{\text{total muestra}}$	142,05	133,23	100		

CANTIDAD DE MATERIALES DE FINOS Y GRUESOS PARA LA PRUEBA DEL PROCTOR MODIFICADO			
$W_{\text{Punto}}$		7500	gr
$W_{\text{Gruesos}}$		4200	gr
$W_{\text{Finos}}$		3300	gr

<sup>18</sup> Microsoft Office Excel 2007

DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO					
Punto	1	2	3	4	5
$W_{\text{muestra+molde}}$	10,799	10,86	10,731	11,212	10,677
$W_{\text{molde}}$	6,615	6,615	6,615	6,615	6,615
$W_{\text{muestra}}$	4,184	4,245	4,116	4,597	4,062
$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	2034,81	2064,47	2001,74	2235,66	1975,47
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1758,76	1558,02	1621,14	1899,53	1827,51

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS PUNTOS DE PROCTOR MODIFICADO					
# Capsula	17	6	204	22	21
$W_{\text{muestra+capsula}}$	942,8	1244,5	1054	1132,7	913,2
$W_{\text{muestraseca+capsula}}$	814,9	939,2	853,6	962,4	844,8
$W_{\text{agua}}$	127,9	305,3	200,4	68,4	170,3
$W_{\text{cápsula}}$	148,17	110,54	110,99	110,8	112,87
$W_{\text{muestraseca}}$	666,73	828,66	742,61	734	849,53
%w	8,10%	32,51%	23,48%	17,70%	15,70%

HUMEDAD OPTIMA Y DENSIDAD MÁXIMA PARA EL MATERIAL DEL TAJO A			
Humedad óptima	18,22%	$\rho_s$ máx. (kg/m <sup>3</sup> )	1900



### Apéndice 3. Resultados pruebas de laboratorio TAJO B

DATOS DE LAS MUESTRAS USADA PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA DE LA PARTE GRUESA Y FINA DEL MATERIAL.			
Granulometría Gruesos		Granulometría Finos	
	Peso (kg)		Peso (gr)
Medición	± 1 gr	Medición	± 0,1 gr
$W_{m+B5}$	16,437	$W_{m+B19}$	656,38
Bandeja # 27	2,539	Bandeja # 19	65,32
$W_{ms+B27}$	15,777	$W_{ms+B19}$	593,79
$W_{ms}$	13,238	$W_{ms}$	528,47
%w	4,18	%w	10,54
$W_{mIs+B27}$	14,481	$W_{mIs+B19}$	521,21
$W_{mIs}$	11,942	$W_{mIs}$	455,89

BANDEJAS UTILIZADAS EN EL PESA DE MATERIAL RETENIDO EN LOS DIFERENTES TAMICES			
Bandeja #3	1295	g	Hasta ret N° 4
Bandeja #203	65,73	g	a partir de N° 10

#### Límites de Atterberg

El material analizado es (mediante pruebas realizadas (de identificación visual)) medianamente limpio, por lo que al tener cierto grado de contaminación de finos no es una cantidad representativa para modificar las propiedades netamente de suelo granular, por lo que el material se clasifica como NP (no plástico)

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL A PARTIR DE LOS DATOS DE LA GRANULOMETRÍA		
Procedimiento de clasificación		
1	No es suelo orgánico	
2	Suelo Granular	Pasa malla N° 200 <50%
3	El suelo es una grava	Retenido N° 4 > 50%
4	Material medianamente sucio	5%≤Pasa malla N° 200≤12%
5	Al momento de realizar la prueba para determinar los límites de Atterberg, para éste material se determino que al ser arenoso sus características impiden la determinación tanto del límite plástico como del límite líquido, por lo que el material se clasifica como NP (no plástico)	
6	El material se clasifica como "Grava mal graduada contaminada con limos"	
7	Símbolo GP-ML	

DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS PARA EL PROCTOR MODIFICADO					
Descripción	Peso (kg)	Peso (kg) - B #	%	%	
	± 125 gr	± 125 gr			
$W_{\text{Pasando 2" Retenido 3/4"+ B\#10}}$	79,5	75,14	44,5%	Gruesos	61,5%
$W_{\text{Pasando 3/4" Retenido #4+ B\#3}}$	33	28,56	17%		
$W_{\text{Pasando #4}}$	65	65	38,5%	Finos	38,5%
$W_{\text{total muestra}}$	177,5	168,7	100,00%		

CANTIDAD DE MATERIALES DE FINOS Y GRUESOS PARA LA PRUEBA DEL PROCTOR MODIFICADO		
$W_{\text{Punto}}$	7500	gr
$W_{\text{Gruesos}}$	4610	gr
$W_{\text{Finos}}$	2890	gr

DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO					
Punto	1	2	3	4	5
$W_{\text{muestra+molde}}$	11,081	11,27	11,247	11,212	10,988
$W_{\text{molde}}$	6,615	6,615	6,615	6,615	6,615
$W_{\text{muestra}}$	4,466	4,655	4,632	4,597	4,373
$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	2171,95	2263,87	2252,68	2235,66	2126,72
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2000,46	2051,75	2009,08	1977,03	1986,79

CUADRO CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS PUNTOS DE PROCTOR MODIFICADO					
# Capsula	6	204	200	7	202
$W_{\text{muestra+capsula}}$	1058,8	1036,3	957,1	1088,3	904,3
$W_{\text{muestraseca+capsula}}$	975,2	939,2	853,6	962,4	844,8
$W_{\text{agua}}$	83,6	97,1	103,5	59,5	125,9
$W_{\text{cápsula}}$	110,57	110,97	110,68	111,69	109,82
$W_{\text{muestraseca}}$	864,63	828,23	742,92	733,11	852,58
%w	8,57%	10,34%	12,13%	13,08%	7,04%

HUMEDAD ÓPTIMA Y DENSIDAD MÁXIMA PARA EL MATERIAL DEL TAJO B			
Humedad óptima	10,50%	ps máx.(kg/m <sup>3</sup> )	2052

## Apéndice 4. Resultados pruebas de laboratorio TAJO C

DATOS DE LAS MUESTRAS USADA PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA DE LA PARTE GRUESA Y FINA DEL MATERIAL.			
Granulometría Gruesos		Granulometría Finos	
	Peso (kg)		Peso (gr)
Medición	± 1 gr	Medición	± 0,1 gr
$W_{m+B9}$	15,312	$W_{m+B42}$	513,06
Bandeja # 9	2,395	Bandeja # 43	67,59
$W_{ms+B9}$	13,328	$W_{ms+B43}$	435,99
$W_{ms}$	10,933	$W_{ms}$	435,72
%w	14,89	%w	17,68
$W_{mls+B9}$	12,653	$W_{mls+B43}$	337,5
$W_{mls}$	10,258	$W_{mls}$	269,91

BANDEJAS UTILIZADAS EN EL PESA DE MATERIAL RETENIDO EN LOS DIFERENTES TAMICES			
Bandeja #9	1286	g	Hasta ret N° 4
Bandeja #200	69,09	g	a partir de N° 10

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO C				
Prueba #	1	2	3	4
Bandeja #	94	96	83	103
Bandeja + suelo húmedo	24,486	25,584	23,606	23,598
Bandeja + suelo seco	18,869	19,549	18,139	17,951
Peso de agua	5,617	6,035	5,467	5,647
Peso de bandeja	6,085	6,050	6,131	6,078
Suelo seco	12,784	13,499	12,008	11,873
Número de golpes	35	29	23	19
Contenido de humedad	43,938%	44,707%	45,528%	47,562%

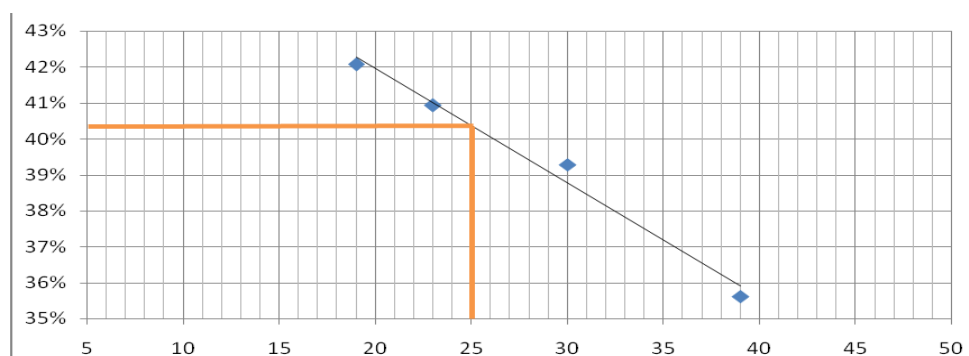


FIGURA 38: DETERMINACIÓN GRÁFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO C<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Microsoft Office Excel 2007

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO C			
Prueba #	1	2	3
Bandeja #	1	20	57
Bandeja + suelo húmedo	11	10,915	12,455
Bandeja + suelo seco	10,005	9,866	11,032
Peso de agua	0,995	1,049	1,423
Peso de bandeja	6,845	6,743	6,818
Suelo seco	3,160	3,123	4,214
Contenido de humedad	31,49%	33,59%	33,77%
Límite plástico	32,95%		

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE PLÁSTICO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO C	
IP	7,55%

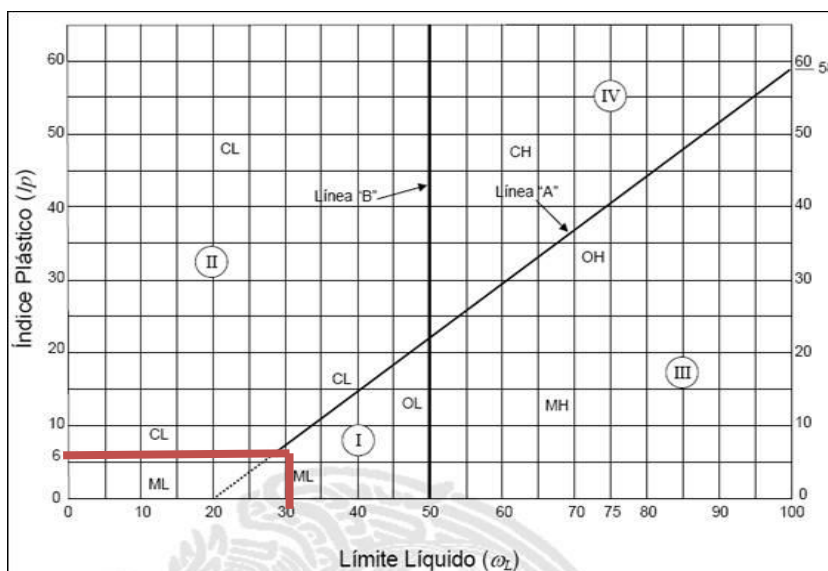


FIGURA 39: DETERMINACIÓN DEL TIPO DE MATERIAL FINO DEL TAJO C A PARTIR DE LA CARTA DE PLASTICIDAD<sup>20</sup>

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL A PARTIR DE LOS DATOS DE LA GRANULOMETRÍA	
Procedimiento de clasificación	
1	No es suelo orgánico
2	Suelo Granular
3	El suelo es una grava
4	Material medianamente sucio
5	Al momento de realizar la prueba para determinar los límites de Atterberg, para éste material se observó que la parte fina presenta características drenantes, por lo que se clasifica con ayuda de la carta de plasticidad como

<sup>20</sup> Microsoft Office Excel 2007

	Limo de baja plasticidad. (LI=40,5% - LP=32.95% - IP=7.55%)
6	El suelo se clasifica como grava bien graduada contaminada con limo de baja plasticidad
7	Símbolo GW-ML

DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS PARA EL PROCTOR MODIFICADO					
Descripción	Peso (kg)	Peso (kg) - B #	%	%	
	± 125 gr	± 125 gr		Gruesos	Finos
$W_{Pasando\ 2''\ Retenido\ 3/4''+ B\#3}$	50,25	45,81	31,13	64%	
$W_{Pasando\ 3/4''\ Retenido\ #4+ B\#4}$	52,25	47,87	32,52		
$W_{Pasando\ #4}$	53,5	53,5	36,35	36%	
$W_{total\ muestra}$	156	147,18	100		

CANTIDAD DE MATERIALES DE FINOS Y GRUESOS PARA LA PRUEBA DEL PROCTOR MODIFICADO		
$W_{Punto}$	7500	gr
$W_{Gruesos}$	4770	gr
$W_{Finos}$	2730	gr

DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO					
Punto	1	2	3	4	5
$W_{muestra+molde}$	10,655	10,482	10,674	10,627	10,613
$W_{molde}$	6,615	6,615	6,615	6,615	6,615
$W_{muestra}$	4,04	3,867	4,059	4,012	3,998
$\rho_t\ (kg/m^3)$	1964,77	1880,64	1974,01	1951,16	1944,35
$\rho_s\ (kg/m^3)$	1607,81	1570,83	1578,51	1616,21	1494,36

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS PUNTOS DE PROCTOR MODIFICADO					
# Capsula	204	200	4	15	203
$W_{muestra+capsula}$	864,7	910,9	872,6	1070,1	1023,4
$W_{muestraseca+capsula}$	707,6	760,84	697,77	886,4	786,55
$W_{agua}$	157,1	150,06	174,83	183,7	236,85
$W_{cápsula}$	111,02	110,73	111,51	111,38	137,9
$W_{muestraseca}$	596,58	650,11	586,26	675,17	748,5
%w	22,20%	19,72%	25,06%	20,72%	30,11%

HUMEDAD OPTIMA Y DENSIDAD MÁXIMA PARA EL MATERIAL DEL TAJO C			
Humedad óptima	21,12%	$\rho_s\ máx.\ (kg/m^3)$	1625

## Apéndice 5. Resultados pruebas de laboratorio TAJO D

DATOS DE LAS MUESTRAS USADA PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA DE LA PARTE GRUESA Y FINA DEL MATERIAL.			
Granulometría Gruesos		Granulometría Finos	
	Peso (kg)		Peso (gr)
Medición	± 1 gr	Medición	± 0,1 gr
$W_m + B_{27}$	11,832	$W_m + B_1$	766,68
Bandeja # 27	2,515	Bandeja # 1	110,79
$W_{ms} + B_{27}$	10,952	$W_{ms} + B_1$	694,62
$W_{ms}$	8,437	$W_{ms}$	583,83
%w	8,04	%w	10,37
$W_{mls} + B_{27}$	9,013	$W_{mls} + B_1$	462
$W_{mls}$	6,498	$W_{mls}$	351,21

BANDEJAS UTILIZADAS EN EL PESA DE MATERIAL RETENIDO EN LOS DIFERENTES TAMICES			
Bandeja #18	147	g	Hasta ret #4
Bandeja #23	66,58	g	a partir de #10

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO D				
Prueba #	1	2	3	4
Bandeja #	48	26	63	9
Bandeja + suelo húmedo	27,163	24,648	26,171	27,16
Bandeja + suelo seco	23,416	21,307	22,498	23,213
Peso de agua	3,747	3,341	3,673	3,947
Peso de bandeja	6,807	6,823	6,783	6,905
Suelo seco	16,609	14,484	15,715	16,308
Número de golpes	34	26	24	16
Contenido de humedad	22,560%	23,067%	23,373%	24,203%

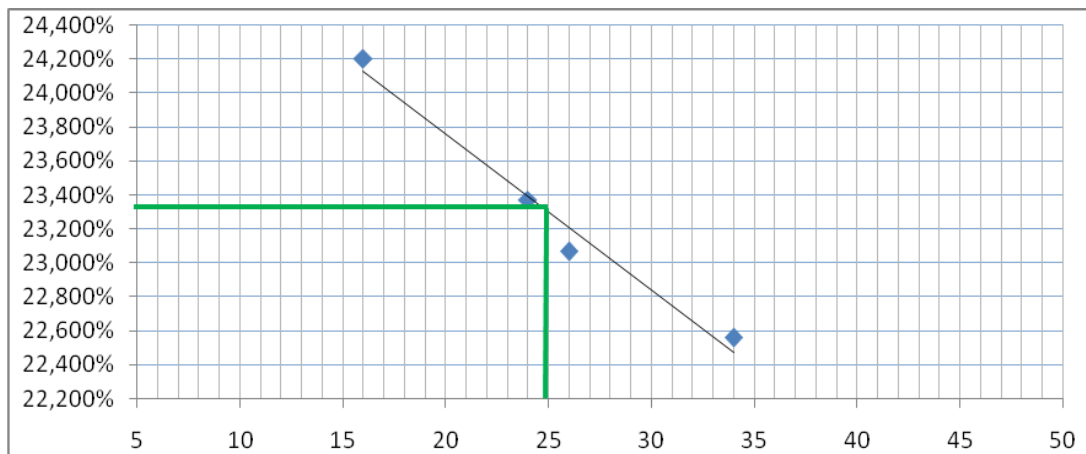


FIGURA 40: DETERMINACIÓN GRAFICA DEL LÍMITE LÍQUIDO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO D<sup>21</sup>

<sup>21</sup> Microsoft Office Excel 2007

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO D			
Prueba #	1	2	3
Bandeja #	55	45	49
Bandeja + suelo húmedo	13,537	14,445	14,689
Bandeja + suelo seco	12,541	13,284	13,569
Peso de agua	0,996	1,161	1,120
Peso de bandeja	6,702	6,569	6,679
Suelo seco	5,839	6,715	6,890
Contenido de humedad	17,06%	17,29%	16,26%
Límite plástico	16,87%		

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE PLÁSTICO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO D	
Índice de plasticidad	
IP	6,13%

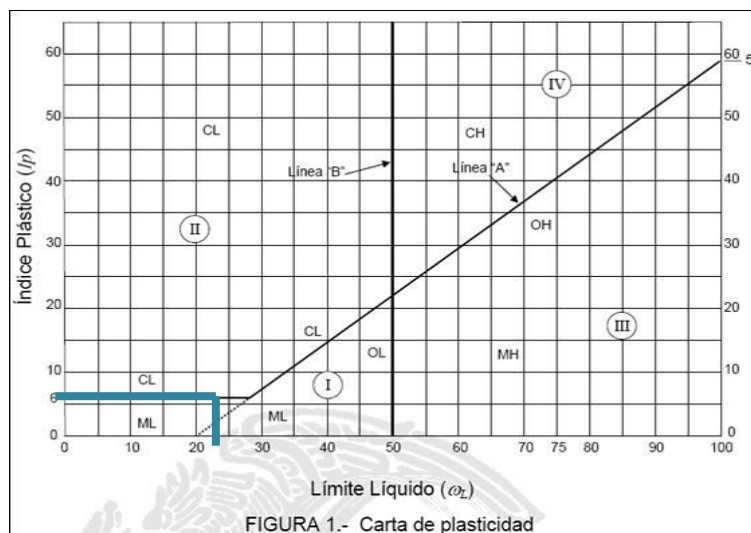


FIGURA 41: DETERMINACIÓN DEL TIPO DE MATERIAL FINO DEL TAJO C A PARTIR DE LA CARTA DE PLASTICIDAD

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL A PARTIR DE LOS DATOS DE LA GRANULOMETRÍA	
Procedimiento de clasificación	
1	No es suelo orgánico
2	Suelo Granular
3	El suelo es una grava
4	Material sucio
5	Al momento de realizar la prueba para determinar los límites de Atterberg, para éste material se determino que: LI=23.2%, LP=16.87%; IP=6.13%
6	El material se clasifica como "Grava mal graduada contaminada con limos"
7	Símbolo GP-CL

DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS PARA EL PROCTOR MODIFICADO					
Descripción	Peso (kg)	Peso (kg) - B #	%	%	
	± 125 gr	± 125 gr			
$W_{\text{Pasando 2" Retenido 3/4" + B\#3}}$	13,5	9,025	6,39	Gruesos	38%
$W_{\text{Pasando 3/4" Retenido #4+ B\#4}}$	49,25	44,75	31,68		
$W_{\text{Pasando #4}}$	87,5	87,5	61,94	Finos	62%
$W_{\text{total muestra}}$	150,25	141,275	100		

CANTIDAD DE MATERIALES DE FINOS Y GRUESOS PARA LA PRUEBA DEL PROCTOR MODIFICADO		
$W_{\text{Punto}}$	7500	gr
$W_{\text{Gruesos}}$	2855	gr
$W_{\text{Finos}}$	4645	gr

DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO					
Punto	1	2	3	4	5
$W_{\text{muestra+molde}}$	11,117	10,992	10,96	10,951	10,669
$W_{\text{molde}}$	6,615	6,615	6,615	6,615	6,615
$W_{\text{muestra}}$	4,502	4,377	4,345	4,336	4,054
$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	2189,46	2128,67	2113,11	2108,73	1971,58
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	2039,61	1855,58	1922,54	1788,75	1758,24

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS PUNTOS DE PROCTOR MODIFICADO					
# Capsula	23	203	12	7	204
$W_{\text{muestra+capsula}}$	1186,6	1197,3	951,4	1334,5	932,2
$W_{\text{muestraseca+capsula}}$	1058,2	1043,7	865,6	1132	868,4
$W_{\text{agua}}$	128,4	153,6	85,8	63,8	202,5
$W_{\text{cápsula}}$	133,88	111,37	108,87	111,73	111
$W_{\text{muestraseca}}$	924,32	932,33	756,73	756,67	1021
%w	12,13%	14,72%	9,91%	17,89%	7,35%

HUMEDAD OPTIMA Y DENSIDAD MÁXIMA PARA EL MATERIAL DEL TAJO D			
Humedad óptima	12,30%	$\rho_s$ máx.(kg/m <sup>3</sup> )	1955



## Apéndice 6. Resultados pruebas de laboratorio TAJO E

DATOS DE LAS MUESTRAS USADA PARA DETERMINAR LA GRANULOMETRÍA DE LA PARTE GRUESA Y FINA DEL MATERIAL.			
Granulometría Gruesos		Granulometría Finos	
	Peso (kg)		Peso (gr)
Medición	± 1 gr	Medición	± 0,1 gr
$W_{m+B11}$	12,278	$W_{m+B23}$	792,03
Bandeja # 11	2,42	Bandeja # 23	66,6
$W_{ms+B11}$	11,689	$W_{ms+B23}$	735,06
$W_{ms}$	9,269	$W_{ms}$	668,46
%W	5,04	%W	7,75
$W_{mIs+B11}$	11,325	$W_{mIs+B23}$	634,09
$W_{mIs}$	8,905	$W_{mIs}$	567,49

BANDEJAS UTILIZADAS EN EL PESA DE MATERIAL RETENIDO EN LOS DIFERENTES TAMICES			
Bandeja #19	146,87	g	Hasta ret #4
Bandeja #2	67,86	g	a partir de #10

DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO Y PLÁSTICO DEL MATERIAL FINO DEL TAJO E	
El material analizado es (mediante pruebas realizadas (de identificación visual)) medianamente limpio, por lo que al tener cierto grado de contaminación de finos no es una cantidad representativa para modificar las propiedades netamente de suelo granular, por lo que el material se clasifica como NP (no plástico)	

CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL A PARTIR DE LOS DATOS DE LA GRANULOMETRÍA	
Procedimiento de clasificación	
1	No es suelo orgánico
2	Suelo Granular Pasa malla 200 <50%
3	El suelo es una grava Retenido #4 > 50%
4	Material limpio Pasa malla 200 < 5%
5	Al momento de realizar la prueba para determinar los límites de Atterberg, para éste material se determino que al ser arenoso sus características impiden la determinación tanto del límite plástico como el límite líquido, por lo que el material se clasifica como NP (no plástico)
6	Símbolo GW

DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS PARA LA DETERMINACIÓN DE LOS PUNTOS PARA EL PROCTOR MODIFICADO					
Descripción	Peso (kg)	Peso (kg) - B #	%	%	
	± 125 gr	± 125 gr		Gruesos	Finos
$W_{Pasando\ 2''\ Retenido\ 3/4'' + B\#29}$	24	19,5	12,38	45%	
$W_{Pasando\ 3/4''\ Retenido\ #4 + B\#10}$	53,5	49,025	31,12		
$W_{Pasando\ #4}$	89	89	56,50	55%	
$W_{total\ muestra}$	166,5	157,525	100		

CANTIDAD DE MATERIALES DE FINOS Y GRUESOS PARA LA PRUEBA DEL PROCTOR MODIFICADO		
$W_{\text{Punto}}$	7500	gr
$W_{\text{Gruesos}}$	3367,5	gr
$W_{\text{Finos}}$	4132,5	gr

DATOS OBTENIDOS DE LA PRUEBA DE PROCTOR MODIFICADO						
Punto	1	2	3	4	5	6
$W_{\text{muestra+molde}}$	11,072	10,949	11,225	11,281	11,27	11,265
$W_{\text{molde}}$	6,615	6,615	6,615	6,615	6,615	6,615
$W_{\text{muestra}}$	4,457	4,334	4,61	4,666	4,655	4,65
$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	2167,57	2107,76	2241,98	2269,22	2263,87	2261,44
$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	1985,61	1957,78	2020,21	2034,41	2010,27	1972,03

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS PUNTOS DE PROCTOR MODIFICADO						
# Capsula	16	203	10	19	9	11
$W_{\text{muestra+capsula}}$	988,7	930,4	1164,6	981,9	1151,6	1142,4
$W_{\text{muestraseca+capsula}}$	905,7	864,2	1049,4	880,3	1022,6	996,2
$W_{\text{agua}}$	83	66,2	115,2	101,6	129	146,2
$W_{\text{cápsula}}$	110,55	111,44	111,74	112,37	110,92	111,62
$W_{\text{muestraseca}}$	795,15	752,76	937,66	910,23	769,38	910,98
%w	9,16%	7,66%	10,98%	11,54%	12,61%	14,68%

HUMEDAD OPTIMA Y DENSIDAD MÁXIMA PARA EL MATERIAL DEL TAJO D			
Humedad óptima	11,50%	$\rho_s$ máx.(kg/m <sup>3</sup> )	2030

## Apéndice 7. Modelo de suelo TAJO A

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono #	$W_{h + bandeja}$ (g)	V (hueco y cono) cm <sup>3</sup>
1	722	9	3302	3216,54
2	832	9	3184	3133,83
3	986	9	3062	3018,05
4	948	9	3175	3046,62
5	923	9	3264	3065,41
6	1015	9	4554	2996,24

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	$W_{seco + bandeja}$ (g)	$W_{bandeja}$ (g)	$W_w$ (g)	$W_s$ (g)	%w
1	2850	150	452	2700	16,74%
2	2727	148	457	2579	17,72%
3	2541	148	521	2393	21,77%
4	2682	147	493	2535	19,45%
5	2725	147	539	2578	20,91%
6	3592	1299	962	2293	41,95%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	$V_{(hueco)}$ cm <sup>3</sup>	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	2120,54	1486,41	1273,26	67,01%
2	2037,83	1489,82	1265,56	66,61%
3	1922,05	1516,09	1245,03	65,53%
4	1950,62	1552,33	1299,59	68,40%
5	1969,41	1582,70	1309,02	68,90%
6	1900,24	1712,94	1206,69	63,51%

## Apéndice 8. Modelo de suelo TAJO B

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono	$W_{h + bandeja}$ (g)	V (hueco y cono) cm <sup>3</sup>
1	1063	9	5927	2960,15
2	1243	9	6667	2824,81
3	1061	9	5607	2961,65
4	1056	9	5352	2965,41
5	1051	9	5420	2969,17
6	798	9	5618	3159,40

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	W seco + bandeja (g)	W bandeja (g)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>s</sub> (g)	%w
1	5436	1280	491	4156	11,81%
2	5969	1297	698	4672	14,94%
3	5259	1297	348	3962	8,78%
4	4932	1295	420	3637	11,55%
5	5058	1298	362	3760	9,63%
6	5293	1267	325	4026	8,07%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	V <sub>(hueco)</sub> cm <sup>3</sup>	ρ <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	1864,15	2492,82	2229,43	108,65%
2	1728,81	3106,18	2702,43	131,70%
3	1865,65	2310,18	2123,65	103,49%
4	1869,41	2170,20	1945,53	94,81%
5	1873,17	2200,54	2007,29	97,82%
6	2063,40	2108,66	1951,15	95,09%

## Apéndice 9. Modelo de suelo TAJO C

PESO DE SOBRENTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	W <sub>sob</sub> (g)	Cono	W <sub>h + bandeja</sub> (g)	V <sub>(hueco y cono)</sub> cm <sup>3</sup>
1	871	9	5104	3104,51
2	1110	9	4724	2924,81
3	841	9	5165	3127,07
4	616	9	4987	3296,24
5	383	9	5371	3471,43

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	W seco + bandeja (g)	W bandeja (g)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>s</sub> (g)	%w
1	4439	1299	665	3140	21,18%
2	4030	1281	694	2749	25,25%
3	4360	1299	805	3061	26,30%
4	4377	1279	610	3098	19,69%
5	4838	1297	533	3541	15,05%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	V <sub>(hueco)</sub> cm <sup>3</sup>	ρ <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	2008,51	1894,44	1563,35	96,21%
2	1828,81	1882,64	1503,16	92,50%
3	2031,07	1903,43	1507,09	92,74%
4	2200,24	1685,27	1408,03	86,65%
5	2375,43	1715,06	1490,68	91,73%

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	W seco + bandeja (g)	W bandeja (g)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>s</sub> (g)	%w
1	4439	1299	665	3140	21,18%
2	4030	1281	694	2749	25,25%
3	4360	1299	805	3061	26,30%
4	4377	1279	610	3098	19,69%
5	4838	1297	533	3541	15,05%

## Apéndice 10. Modelo de suelo TAJO D

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	W <sub>sob</sub> (g)	Cono	W <sub>h</sub> + bandeja (g)	V (hueco y cono) cm <sup>3</sup>
1	892	9	5382	3088,72
2	978	9	5229	3024,06
3	968	9	3945	3031,58
4	1039	9	4003	2978,20
5	1304	9	3850	2778,95
6	915	9	3990	3071,43
7	1005	9	3765	3003,76

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	W seco + bandeja (g)	W bandeja (g)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>s</sub> (g)	%w
1	4932	1298	450	3634	12,38%
2	4839	1297	390	3542	11,01%
3	3468	150	477	3318	14,38%
4	3526	148	477	3378	14,12%
5	3329	148	521	3181	16,38%
6	3592	146	398	3446	11,55%
7	3334	146	431	3188	13,52%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	V <sub>(hueco)</sub> cm <sup>3</sup>	ρ <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	1992,72	2049,46	1823,64	93,28%
2	1928,06	2039,36	1837,08	93,97%
3	1935,58	1960,65	1714,22	87,68%
4	1882,20	2048,14	1794,71	91,80%
5	1682,95	2199,71	1890,14	96,68%
6	1975,43	1945,91	1744,43	89,23%
7	1907,76	1896,99	1671,07	85,48%

## Apéndice 11. Modelo de suelo TAJO E-1

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono	$W_{h + bandeja}$ (g)	$V$ (hueco y cono) cm <sup>3</sup>
1	1060	9	4654	2962,41
2	847	9	5895	3122,56
3	705	9	6239	3229,32
4	1168	9	4329	2881,20
5	1076	9	5583	2950,38

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	$W_{seco + bandeja}$ (g)	$W_{bandeja}$ (g)	$W_w$ (g)	$W_s$ (g)	%w
1	4188	148	466	4040	11,53%
2	5485	1280	410	4205	9,75%
3	5754	1299	485	4455	10,89%
4	3888	147	441	3741	11,79%
5	5137	1299	446	3838	11,62%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	$V_{(hueco)}$ cm <sup>3</sup>	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	1866,41	2414,27	2164,59	106,11%
2	2026,56	2277,26	2074,95	101,71%
3	2133,32	2315,64	2088,29	102,37%
4	1785,20	2342,59	2095,56	102,72%
5	1854,38	2310,21	2069,70	101,46%

## Apéndice 12. Modelo de suelo TAJO E-2

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono	$W_{h + bandeja}$ (g)	$V$ (hueco y cono) cm <sup>3</sup>
1	886	9	4653	3093,23
2	1016	9	4383	2995,49
3	1098	9	4418	2933,83
4	626	9	5568	3288,72
5	672	9	5554	3254,14
	1004	9	5241	3004,51

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	W seco + bandeja (g)	W bandeja (g)	W <sub>w</sub> (g)	W <sub>s</sub> (g)	%w
1	4210	150	443	4060	10,91%
2	4039	141	344	3898	8,83%
3	3963	147	455	3816	11,92%
4	5240	1262	328	3978	8,25%
5	5290	1280	264	4010	6,58%
6	4841	1296	400	3545	11,28%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	V <sub>(hueco)</sub> cm <sup>3</sup>	ρ <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	ρ <sub>s</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	1997,23	2254,62	2032,81	99,65%
2	1899,49	2233,23	2052,13	100,59%
3	1837,83	2323,93	2076,36	101,78%
4	2192,72	1963,77	1814,18	88,93%
5	2158,14	1980,41	1858,09	91,08%
6	1908,51	2067,06	1857,47	91,05%

## Apéndice 13. Sitio de trabajo TAJO A.

### 1. Cono de arena

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono	$W_{h + bandeja}$ (g)	$V$ (hueco y cono) cm <sup>3</sup>
1	1009	9	4088	3000,75
2	816	7	4356	3145,86
3	1410	9	3488	2699,25
4	452	7	4892	3419,55
5	1281	9	3535	2796,24

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	$W_{seco + bandeja}$ (g)	$W_{bandeja}$ (g)	$W_w$ (g)	$W_s$ (g)	%w
1	3752	148	336	3604	9,32%
2	3986	148	370	3838	9,64%
3	3256	147	232	3109	7,46%
4	4548	142	344	4406	7,81%
5	3281	145	254	3136	8,10%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	$V_{(hueco)}$ cm <sup>3</sup>	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	1904,75	2068,51	1892,11	92,75%
2	2035,86	2066,94	1885,19	92,41%
3	1603,25	2083,89	1939,19	95,06%
4	2309,55	2056,68	1907,73	93,52%
5	1700,24	1993,84	1844,44	90,41%

### 2. EDG

Resultados de densidades y humedad con el EDG				
Punto	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.
1	101,60%	1640,00	813,49	42,80%
2	91,90%	1575,00	820,74	43,20%
3	90,40%	1625,00	853,47	44,90%
4	162,80%	1616,00	614,92	32,40%
5	89,70%	1609,00	848,18	44,60%



## Apéndice 14. Sitio de trabajo TAJO B

### 1. Cono de arena

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono	$W_{h+bandeja}$ (g)	$V$ (hueco y cono) cm <sup>3</sup>
1	1026	9	4315	2987,97
2	1100	9	5271	2932,33
3	992	9	4382	3013,53
4	903	9	4373	3080,45
5	942	9	4305	3051,13

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	$W_{seco+bandeja}$ (g)	$W_{bandeja}$ (g)	$W_w$ (g)	$W_s$ (g)	%w
1	3949	147	366	3802	9,63%
2	4922	1299	349	3623	9,63%
3	3989	150	393	3839	10,24%
4	3951	138	422	3813	11,07%
5	3899	147	406	3752	10,82%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	$V_{(hueco)}$ cm <sup>3</sup>	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	1891,97	2202,99	2009,55	97,93%
2	1836,33	2163,01	1972,96	96,15%
3	1917,53	2207,00	2002,05	97,57%
4	1984,45	2134,09	1921,44	93,64%
5	1955,13	2126,72	1919,06	93,52%

### 2. EDG

Resultados de densidades y humedad con el EDG				
Punto	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.
1	9,20%	2163,00	1980,77	96,50%
2	9,20%	2164,00	1981,68	96,50%
3	9,80%	2177,00	1982,70	96,60%
4	9,70%	2171,00	1979,03	96,50%
5	8,30%	2091,00	1930,75	94,10%

## Apéndice 15. Sitio de trabajo TAJO C

### 1. Cono de arena

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono	$W_{h+bandeja}$ (g)	$V$ (hueco y cono) cm <sup>3</sup>
1	834	9	4797	3132,33
2	738	9	3713	3204,51
3	1009	9	4531	3000,75
4	731	9	3760	3209,77
5	806	9	3633	3153,38

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	$W_{seco+bandeja}$ (g)	$W_{bandeja}$ (g)	$W_w$ (g)	$W_s$ (g)	%w
1	4192	1294	605	2898	20,88%
2	3098	150	615	2948	20,86%
3	3963	1279	568	2684	21,16%
4	3155	148	605	3007	20,12%
5	3036	148	597	2888	20,67%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	$V_{(hueco)}$ cm <sup>3</sup>	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	2036,33	1720,25	1423,15	87,58%
2	2108,51	1689,82	1398,14	86,04%
3	1904,75	1707,31	1409,11	86,71%
4	2113,77	1708,79	1422,57	87,54%
5	2057,38	1693,90	1403,72	86,38%

### 2. EDG

Resultados de densidades y humedad con el EDG				
Punto	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.
1	17,80%	1853,00	1573,01	96,80%
2	17,80%	1857,00	1576,40	97,00%
3	17,90%	1852,00	1570,82	96,70%
4	17,00%	1831,00	1564,96	96,30%
5	17,20%	1837,00	1567,41	96,50%

## Apéndice 16. Sitio de trabajo TAJO D

### 1. Cono de arena

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono	$W_{h+bandeja}$ (g)	$V_{(hueco\ y\ cono)}$ cm <sup>3</sup>
1	723	9	5062	3215,79
2	903	9	4696	3080,45
3	1072	9	3477	2953,38
4	917	9	3556	3069,92
5	1112	9	3250	2923,31

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	$W_{seco+bandeja}$ (g)	$W_{bandeja}$ (g)	$W_w$ (g)	$W_s$ (g)	%w
1	4737	1298	325	3439	9,45%
2	4391	1279	305	3112	9,80%
3	3169	148	308	3021	10,20%
4	3249	148	307	3101	9,90%
5	2965	150	285	2815	10,12%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	$V_{(hueco)}$ cm <sup>3</sup>	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	2119,79	1775,65	1622,33	82,98%
2	1984,45	1721,89	1568,19	80,21%
3	1857,38	1792,31	1626,48	83,20%
4	1973,92	1726,51	1570,98	80,36%
5	1827,31	1696,48	1540,52	78,80%

### 2. EDG

Resultados de densidades y humedad con el EDG				
Punto	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.
1	12,50%	1862,00	1655,11	84,70%
2	12,80%	1891,00	1676,42	85,70%
3	12,90%	1872,00	1658,10	84,80%
4	12,60%	1836,00	1630,55	83,40%
5	12,80%	1876,00	1663,12	85,00%

## Apéndice 17. Sitio de trabajo TAJO E-1

### 1. Cono de arena # 1

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono	$W_{h+bandeja}$ (g)	$V_{(hueco\ y\ cono)}$ cm <sup>3</sup>
1	1009	9	4088	3000,75
2	816	7	4356	3145,86
3	1410	9	3488	2699,25
4	452	7	4892	3419,55
5	1281	9	3535	2796,24

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	$W_{seco+bandeja}$ (g)	$W_{bandeja}$ (g)	$W_w$ (g)	$W_s$ (g)	%w
1	3752	148	336	3604	9,32%
2	3986	148	370	3838	9,64%
3	3256	147	232	3109	7,46%
4	4548	142	344	4406	7,81%
5	3281	145	254	3136	8,10%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	$V_{(hueco)}$ cm <sup>3</sup>	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	1904,75	2068,51	1892,11	92,75%
2	2035,86	2066,94	1885,19	92,41%
3	1603,25	2083,89	1939,19	95,06%
4	2309,55	2056,68	1907,73	93,52%
5	1700,24	1993,84	1844,44	90,41%

### 2. EDG #1

Resultados de densidades y humedad con el EDG				
Punto	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.
1	12,4	2331	2073,84	102,4
2	13,6	2335	2055,46	101,5
3	12,1	2324	2073,15	102,30
4	11,1	2311	2080,11	102,7
5	12,5	2330	2071,11	102,2

## Apéndice 18. Sitio de trabajo TAJO E-2

### 1. Cono de arena # 2

PESO DE SOBRANTE DE ARENA, PESO DE MUESTRA Y VOLUMEN DE HUECO DE LA PRUEBA DE CONO DE ARENA				
Prueba	$W_{sob}$ (g)	Cono	$W_{h+bandeja}$ (g)	$V_{(hueco\ y\ cono)}$ cm <sup>3</sup>
1	1041	9	4115	2976,69
2	676	7	4824	3251,13
3	765	9	5676	3184,21
4	628	7	4693	3287,22
5	717	9	4520	3220,30

PESO DE MUESTRA SECA Y CONTENIDO DE HUMEDAD					
Prueba	$W_{seco+bandeja}$ (g)	$W_{bandeja}$ (g)	$W_w$ (g)	$W_s$ (g)	%w
1	3737	150	378	3587	10,54%
2	4385	138	439	4247	10,34%
3	5252	1304	424	3948	10,74%
4	4246	147	447	4099	10,91%
5	4104	147	416	3957	10,51%

DENSIDADES HÚMEDA Y SECA DE LAS MUESTRAS ANALIZADAS				
Prueba	$V_{(hueco)}$ cm <sup>3</sup>	$\rho_t$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	Compactación
1	1880,69	2108,27	1907,28	93,49%
2	2141,13	2188,57	1983,53	97,23%
3	2088,21	2093,66	1890,61	92,68%
4	2177,22	2087,99	1882,68	92,29%
5	2124,30	2058,56	1862,73	91,31%

### 2. EDG #2

Resultados de densidades y humedad con el EDG				
Punto	%w	$\rho_T$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	% Compact.
1	9,40%	2098,00	1917,73	94,30%
2	9,00%	2079,00	1907,34	93,80%
3	9,60%	2097,00	1913,32	94,10%
4	9,40%	2088,00	1908,59	93,90%
5	9,20%	2093,00	1916,67	94,20%

## Apéndice 19. Prueba t-pareada TAJO A

PRUEBA PAREADA PARA HUMEDAD TAJO A				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	107,3	31,4	14
Humedad Cono De Arena	5	27,7	3,5	1,6
Difference	5	79,6	31	13,9
95% CI for mean difference:	(41,1.118,1)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =5,75; P-Value = 0,005			

PRUEBA PAREADA PARA % COMPACTACIÓN TAJO A				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	41,44	5,18	2,32
Humedad Cono De Arena	5	73,75	5,7	2,55
Difference	5	-32,31	7,02	3,14
95% CI for mean difference:	(-41,03.-23,59)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0):T-Value =-10,29; P-Value= 0,001			

## Apéndice 20. Prueba t-pareada TAJO B

PRUEBA PAREADA PARA HUMEDAD TAJO B				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	9,24	0,594	0,266
Humedad Cono De Arena	5	10,278	0,664	0,297
Difference	5	-1,038	0,922	0,413
95% CI for mean difference:	(-2,183.0,107)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =-2,52; P-Value = 0,066			

PRUEBA PAREADA PARA % COMPACTACIÓN TAJO B				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	96,04	1,085	0,485
Humedad Cono De Arena	5	95,762	2,101	0,939
Difference	5	0,278	1,676	0,75
95% CI for mean difference:	(-1,803.-2,359)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =-0,37; P-Value = 0,73			

## Apéndice 21. Prueba t-pareada TAJO C

PRUEBA PAREADA PARA HUMEDAD TAJO C				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	17,54	0,41	0,183
Humedad Cono De Arena	5	20,738	0,3887	0,173
Difference	5	-3,198	0,1709	0,0764
95% CI for mean difference:	(-3,4102.-2,9858)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =-41,83; P-Value = 0,000			

PRUEBA PAREADA PARA % COMPACTACIÓN TAJO C				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	96,66	0,27	0,121
Humedad Cono De Arena	5	86,85	0,69	0,309
Difference	5	9,81	0,852	0,381
95% CI for mean difference:	(8,752.10,868)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =-25,76; P-Value = 0,000			

## Apéndice 22. Prueba t-pareada TAJO D

PRUEBA PAREADA PARA HUMEDAD TAJO D				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	12,72	0,164	0,073
Humedad Cono De Arena	5	9,894	0,296	0,132
Difference	5	2,826	0,1827	0,0817
95% CI for mean difference:	(2,5991.3,0529)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =34,59; P-Value = 0,000			

PRUEBA PAREADA PARA % COMPACTACIÓN TAJO D				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	84,72	0,835	0,373
Humedad Cono De Arena	5	81,11	1,909	0,854
Difference	5	3,61	2,132	0,953
95% CI for mean difference:	(0,963.6,257)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =3,79; P-Value = 0,019			

## Apéndice 23. Prueba t-pareada TAJO E-1

PRUEBA PAREADA PARA HUMEDAD TAJO E1				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	12,34	0,896	0,401
Humedad Cono De Arena	5	8,466	0,96	0,429
Difference	5	3,874	0,679	0,304
95% CI for mean difference:	(3,031.4,717)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =-12,76; P-Value = 0,000			

CUADRO: PRUEBA PAREADA PARA % COMPACTACIÓN TAJO E1				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	102,22	0,444	0,198
Humedad Cono De Arena	5	92,83	1,695	0,758
Difference	5	9,39	1,627	0,727
95% CI for mean difference:	(7,37.11,41)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =12,91; P-Value = 0,000			

## Apéndice 24. Prueba t-pareada TAJO E-2

PRUEBA PAREADA PARA HUMEDAD TAJO E-2				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	9,32	0,228	0,102
Humedad Cono De Arena	5	10,608	0,221	0,099
Difference	5	-1,288	0,1551	0,0694
95% CI for mean difference:	(-1,4806.-1,0954)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =-18,56; P-Value = 0,000			

: PRUEBA PAREADA PARA % COMPACTACIÓN TAJO E-2				
	N	Mean	St. Dev.	SE.Mean
Humedad EDG	5	94,06	0,21	0,09
Humedad Cono De Arena	5	93,4	2,28	1,02
Difference	5	0,66	2,41	1,08
95% CI for mean difference:	(-2,33.3,65)			
T-Test of mean difference =	0 (vs. not = 0) : T-Value =0,61; P-Value = 0,573			



## Apéndice 25. Imágenes del proyecto

# Anexos

Anexo 1. Carta de plasticidad usada por el método SUCS

Anexo 1. Carta de plasticidad usada por el método SUCS

