

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA  
RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS  
INGENIERÍA CIVIL**



## Trabajo monográfico para optar al título de Ingeniero Civil

**TEMA:**

Análisis comparativo entre los resultados de los ensayos California Bearing Ratio (CBR) y Valor Impacto de Clegg (VIC) ejecutados en especímenes de suelo fabricados con material del banco "Material de Celda", ubicado en la Mina Orosí, municipio de La Libertad, dpto. de Chontales.

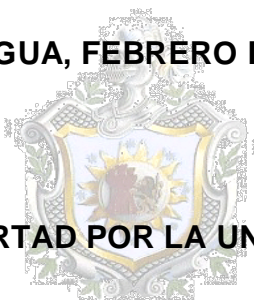
**ELABORADO POR:**

Br. Fidel Adolfo Rivera González  
Br. Arnoldo Eder Flores Mendoza

**TUTOR:**

Ing. Bismarck J. Contreras R.

**MANAGUA, FEBRERO DE 2009**



**"A LA LIBERTAD POR LA UNIVERSIDAD"**

## **DEDICATORIA**

A Dios por haberme dado la gran oportunidad de realizar este trabajo, estando a mi lado en todo momento.

A mis padres: Gladys González y Marcelino Rivera por su amor incondicional, confianza y cariño durante esta etapa y el transcurso de mi vida.

A mis hermanos: Gustavo, Mariela, Cristina, Ana, Marcela, Marvin y Mario por su apoyo y aliento.

A mis sobrinos: Joaquín, Leandro, Milena, Mario y Alicia por ser sinónimos de alegría.

A todas las personas que hicieron posible la culminación de este trabajo.

**Fidel Adolfo Rivera González**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ingeniero y amigo Bismarck J. Contreras R. por haberme dado la oportunidad de desarrollar esta investigación, por la tutoría y su incondicional ayuda.

Al Centro de Investigaciones Geocientíficas (CIGEO/UNAN-Managua) por toda la ayuda logística proporcionada durante el desarrollo de esta investigación.

Agradezco todas las valiosas críticas realizadas al documento por los profesores: Ing. Adolfo Cordero, Ing. Edwin Castrillo y el Ing. Alberto Pilatos.

Agradezco con especial amor y cariño a Hazzel Rivera por su continuo y alentador apoyo.

A mis amigos Arnoldo Flores, Samuel Sevilla, Horacio Ulloa, Denis Avellán y Francisco Vásquez por su gran amistad y su constante ayuda.

Agradezco a todos mis profesores de preescolar, primaria, secundaria y de la universidad, que tuvieron la paciencia, tiempo y dedicación para proporcionarme las herramientas necesarias para llegar a este instante de mi vida.

**Fidel Adolfo Rivera González**

## TABLA DE CONTENIDO

Contenido.....	Página
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Localización del sitio de estudio.....	3
1.2.1 Localización del banco de materiales en estudio.....	3
1.3 Antecedentes.....	5
1.4 Justificación.....	6
1.5 Objetivos.....	7
1.5.1 Objetivo general.....	7
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
1.6 Diseño metodológico.....	8
1.6.1 Recopilación de la información.....	8
1.6.2 Muestreo y caracterización del material en estudio.....	8
1.6.3 Preparación y fabricación de especímenes.....	9
1.6.4 Ensayos realizados en especímenes elaborados.....	9
1.6.5 Análisis e interpretación de resultados.....	10
2. MARCO TEÓRICO.....	11
2.1 La ingeniería Geotécnica y su importancia en las obras civiles.....	11
2.2 Objetivos de la ingeniería Geotécnica.....	12
2.3 Suelos.....	12
2.3.1 Origen y formación del suelo.....	13
2.3.2 Tipos de suelos.....	14
2.3.2.1 Gravass.....	14
2.3.2.2 Arenas.....	14
2.3.2.3 Limos.....	15
2.3.2.4 Arcillas.....	15
2.3.3 Suelos cohesivos y suelos no cohesivos.....	15
2.3.4 Muestreo de suelos.....	16
2.3.4.1 Muestras alteradas.....	16

2.3.4.2	Secado y disgregado de muestras alteradas .....	17
2.3.4.3	Cuarteo de muestras alteradas .....	18
2.3.5	Propiedades físicas de los suelos .....	18
2.3.5.1	Color .....	18
2.3.5.2	Forma.....	19
2.3.5.3	Densidad.....	19
2.3.5.3.1	Efectos de la densidad en las propiedades mecánicas del suelo ..	20
2.3.5.4	Contenido de agua .....	20
2.3.5.5	Límites de consistencia.....	20
2.3.5.5.1	Límite líquido.....	21
2.3.5.5.2	Límite plástico .....	22
2.3.5.5.3	Límite de contracción.....	22
2.3.5.5.4	Índice de plasticidad .....	22
2.3.5.6	Tamaño de partículas .....	23
2.3.6	Clasificación de los suelos .....	26
2.3.6.1	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) .....	26
2.3.6.1.1	Suelos gruesos .....	27
2.3.6.1.2	Suelos finos.....	27
2.4	Designaciones estándar utilizadas en el estudio .....	28
2.5	Martillo de Clegg .....	29
2.5.1	Antecedentes .....	29
2.5.2	Funcionamiento y características .....	30
2.5.3	Principales usos del VIC obtenido con el martillo de Clegg.....	31
2.5.4	Especificaciones del martillo de Clegg modelo H-4190.....	32
3.	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	33
3.1	Ensayos de caracterización.....	33
3.1.1	Análisis del tamaño de partículas de los suelos por tamizado .....	33
3.1.1.1	Objeto .....	33
3.1.1.2	Aparatos .....	33
3.1.1.3	Procedimiento.....	34
3.1.1.3.1	Análisis granulométrico de la fracción gruesa .....	35
3.1.1.3.2	Análisis granulométrico de la fracción fina .....	35

3.1.1.4 Cálculo.....	36
3.1.2 Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos .....	37
3.1.2.1 Aparatos .....	37
3.1.2.2 Límite líquido .....	37
3.1.2.2.1 Procedimiento .....	37
3.1.2.2.1.1 Método A: límite líquido multi – punto .....	37
3.1.2.2.1.2 Método B: límite líquido 1 – punto .....	39
3.1.2.2.2 Cálculo .....	40
3.1.2.3 Límite plástico e índice de plasticidad .....	40
3.1.2.3.1 Procedimiento .....	41
3.1.2.3.2 Cálculo .....	41
3.1.3 Determinación en laboratorio del contenido de agua del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado .....	42
3.1.3.1 Objeto .....	42
3.1.3.2 Aparatos .....	43
3.1.3.3 Procedimiento.....	43
3.1.3.4 Cálculos .....	45
3.1.4 Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) .....	46
3.1.4.1 Uso y significado .....	46
3.1.4.2 Procedimiento.....	46
3.1.4.2.1 Procedimiento de clasificación primaria.....	46
3.1.4.2.2 Procedimiento de clasificación para suelos de granos-finos .....	47
3.1.4.2.3 Procedimiento de clasificación para suelos de granos-gruesos .....	49
3.1.5 Características de los suelos compactados en el laboratorio utilizando el esfuerzo modificado.....	51
3.1.5.1 Aparatos .....	51
3.1.5.2 Procedimiento.....	52
3.1.5.3 Cálculo.....	54
3.1.6 Ensayo de CBR (California Bearing Ratio) de suelos compactados en el laboratorio .....	55
3.1.6.1 Objeto y definición.....	55
3.1.6.2 Aparatos .....	56

3.1.6.3 Procedimiento.....	56
3.1.6.4 Cálculo.....	60
3.1.6.4.1 Densidad seca .....	60
3.1.6.4.2 índice de resistencia CBR .....	61
3.1.7 Resultados .....	62
3.2 Ensayos de correlación – regresión .....	63
3.2.1 Objeto.....	64
3.2.2 Aparatos.....	64
3.2.3 Procedimiento.....	64
3.2.4 Cálculos .....	66
3.2.5 Resultados .....	66
4. MÉTODO ESTADÍSTICO.....	69
4.1 Correlación y regresión .....	70
4.1.2 Correlación.....	70
4.1.2.1 Coeficiente de correlación lineal de Pearson.....	70
4.1.2.2 Prueba de hipótesis del coeficiente de correlación .....	72
4.1.3 Regresión lineal .....	73
4.1.3.1 Recta de mínimos cuadrados .....	74
4.1.3.2 Coeficiente de determinación .....	75
4.1.3.3 Prueba de hipótesis sobre los parámetros.....	75
4.2 Análisis de Correlación .....	77
4.2.1 Definición de variables y nivel de significancia .....	77
4.2.2 Cálculo del coeficiente de correlación .....	77
4.3 Análisis de Regresión .....	78
4.3.1 Cálculo de los coeficientes “a” y “b” y el coeficiente $R^2$ .....	78
4.3.2 Prueba de hipótesis y análisis de varianza .....	79
4.4 Análisis e interpretación de resultados.....	80
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	81
5.1 Conclusiones .....	81
5.2 Recomendaciones .....	83

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	84
6.1 Libros y publicaciones consultadas .....	84
6.2 Páginas web consultadas .....	86
ANEXOS .....	90
Anexo 1 Resultados de ensayos de caracterización .....	91
Anexo 2 Resultados de ensayos de correlación-regresión .....	100
Anexo 3 Gráficas de ensayos de correlación-regresión .....	113
Anexo 4 Tablas utilizadas en la investigación.....	122
Anexo 5 Fotos de ensayos de laboratorio.....	126



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla .....	Página
2.1 Designaciones Estándar utilizadas en el estudio .....	28
3.1 Peso mínimo para ensaye de la muestra retenida en el tamiz N°10 .....	34
3.2 Factor de corrección para el límite líquido.....	40
3.3 Muestra mínima para ensayo de humedad .....	43
3.4 Lecturas de penetración para la aplicación de cargas del ensayo CBR.....	60
3.5 Características de esfuerzo – penetración de la muestra patrón - CBR.....	61
3.6 Resumen de ensayos de laboratorio .....	62
3.7 Resumen de ensayos de laboratorio – Humedad teórica del 6% .....	66
3.8 Resumen de ensayos de laboratorio – Humedad teórica del 9% .....	67
3.9 Resumen de ensayos de laboratorio – Humedad teórica del 11.4% .....	67
3.10 Resumen de ensayos de laboratorio – Humedad teórica del 12% .....	67
4.1 Elementos del análisis de varianza .....	76
4.2 Elementos para el cálculo del coeficiente de correlación .....	77
4.3 Elementos del ANDEVA para VIC – CBR .....	80
A.4.1 Tabla del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos .....	123
A.4.2 Tabla de distribución t – Student.....	124
A.4.3 Tabla de distribución Fisher – Snedecor.....	125

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura .....	Página
1.1 Mapa de localización del banco “Material de Celda”, Mina Orosí, La Libertad, Chontales .....	4
1.2 Representación esquemática del diseño metodológico.....	10
2.1 Dimensiones del aparato de Casagrande para calcular el límite líquido .....	21
2.2 Ejemplo de curva granulométrica .....	24
2.3 Carta de plasticidad para el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos .....	25
2.4 Partes del Martillo de Clegg, Humboldt Mfg. Co. ....	31
4.1 Ejemplos de diagramas de dispersión de puntos .....	71
4.2 Tipos de correlación según el coeficiente de correlación de Pearson .....	72
4.3 Ejemplo de diagrama de dispersión de puntos y recta de regresión lineal.....	74
4.4 Diagrama de dispersión y recta de regresión lineal VIC – CBR.....	79
A.1.1 Análisis del tamaño de partículas de los suelos por tamizado.....	92
A.1.2 Límites de Consistencia.....	93
A.1.3 Clasificación SUCS.....	94
A.1.4 Compactación de suelos aplicando el esfuerzo modificado .....	95
A.1.5 CBR de laboratorio 1 .....	96
A.1.6 CBR de laboratorio 2 .....	98
A.2.1 Humedad teórica del 6% .....	101
A.2.2 Humedad teórica del 9% .....	104
A.2.3 Humedad teórica del 11.40% .....	107
A.2.4 Humedad teórica del 12% .....	110
A.3.1 Gráficas densidad seca vs humedad .....	114
A.3.2 Gráficas densidad seca vs energía de compactación .....	115
A.3.3 Gráficas VIC vs humedad.....	116
A.3.4 Gráficas CBR vs humedad .....	117
A.3.5 Gráficas VIC vs Golpes-Clegg.....	118
A.5.1 Ensayo de granulometría.....	127
A.5.2 Ensayo de límite líquido.....	127
A.5.3 Ensayo de límite plástico .....	127

A.5.4 Ensayo Proctor Modificado.....	127
A.5.5 Ensayo CBR.....	127
A.5.6 Preparación de la muestra de ensayo .....	128
A.5.7 Fabricación del espécimen.....	128
A.5.8 Compactación del espécimen .....	128
A.5.9 Ensayo CBR sin saturar .....	128
A.5.10 Lecturas de carga penetración.....	128
A.5.11 Colocación de Martillo Clegg sobre espécimen.....	129
A.5.12 Martillo a nivel de referencia para ejecución de ensayo VIC .....	129
A.5.13 Lectura del VIC al 5to golpe .....	129

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Introducción

Los parámetros físicos y de resistencia comúnmente utilizados para evaluar la calidad del proceso de compactación de terracerías son la densidad y la resistencia mecánica respectivamente. Esta última se mide mediante la obtención de una variable conocida como valor CBR (California Bearing Ratio). La densidad es necesaria para determinar el grado de compactación de un suelo; mientras que el valor CBR es un indicador de la resistencia al corte que presenta ese suelo después de ser compactado. El valor CBR se determina mediante ensayos, ya sea en laboratorio o en campo, los cuales se llevan a cabo utilizando varios equipos y accesorios. Dicho ensayo requiere de bastante preparación, tiempo y recursos.

Por lo mencionado anteriormente, existe una necesidad de desarrollar nuevos métodos y equipos que sean más simples, rápidos y económicos y que, además, sirvan de respaldo o alternativa a los métodos tradicionales, pero sin tratar de sustituirlos.

El Clegg Hammer (Martillo de Clegg) es un equipo diseñado para evaluar la calidad del proceso de compactación y construcción de terracerías mediante la valoración de las características mecánicas de estas estructuras. Con este equipo se pueden hacer mediciones, las cuales dan una idea de qué tan buena es la resistencia que pueda presentar un determinado tipo de suelo. Una de las ventajas más importantes del equipo es que las mediciones que con él se hacen son rápidas, sencillas y sobre todo no-destructivas.

El Centro de Investigaciones Geocientíficas de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (CIGEO-UNAN) adquirió recientemente un Martillo de Clegg, como un intento de introducir nuevas tecnologías en Nicaragua. La aplicación de dicho equipo, requiere que se estudien las características geotécnicas que presentan los suelos en estudio y que se realicen otros ensayos que se puedan correlacionar con los valores que arroje el Martillo de Clegg.

El trabajo de investigación que aquí se presenta trata sobre el análisis comparativo de los resultados obtenidos a partir de la ejecución de ensayos de densidad de laboratorio, CBR de laboratorio y Valor Impacto de Clegg (VIC) realizados específicamente sobre el banco de materiales “Material de Celda”, ubicado en la Mina Orosí, municipio de La Libertad, Chontales. Dicho análisis se enfoca principalmente en la correlación de los valores obtenidos con el equipo Martillo Clegg y el valor CBR mediante la utilización de métodos estadísticos de correlación y regresión.

El material analizado fue seleccionado para el estudio, ya que fue utilizado como material de relleno en los proyectos “Reconversión Tecnológica Mina Orosí” y en el “Revestimiento de 15km del camino La Libertad - Juigalpa”. Dicho material fue muestreado y llevado al laboratorio del Centro de Investigaciones Geocientíficas (CIGEO) de la UNAN - Managua donde fue caracterizado mediante ensayos de granulometría, límites de consistencia, Proctor Modificado y valor CBR; y posteriormente clasificado en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Todos los ensayos fueron ejecutados siguiendo los procedimientos descritos en las normas de la ASTM, revisión anual 2007.

En síntesis, se fabricaron especímenes de suelo compactados a diferentes energías y contenidos de humedad en un molde metálico CBR de 6” utilizando el martillo Proctor de 4.5kg. Luego, dichos especímenes fueron sujetos a ensayos de CBR y VIC; además, se les determinó su densidad y humedad respectiva.

Una vez obtenidos los datos necesarios para el análisis, se utilizaron los métodos estadísticos de regresión y correlación para obtener un modelo matemático que permitiera estimar con eficiencia el valor CBR de un suelo compactado a partir de ensayos con el Martillo Clegg.

## **1.2 Localización del sitio de estudio** <sup>(30)</sup>

El Municipio de La Libertad, está ubicado en la parte norte del departamento de Chontales, entre la cordillera de Amerrisque y los ríos que descienden hacia las llanuras de los municipios de Santo Domingo, San Pedro de Lóvago y El Ayote, de la Región Autónoma del Atlántico Sur. La cabecera departamental, Juigalpa, dista a 32km y Managua, capital, se localiza a 175 km.

La Libertad cuenta con una extensión territorial de 774.55 km<sup>2</sup> y geográficamente se localiza en la coordenada 12°12' latitud norte y 85°10' longitud oeste, con una altitud promedio de 498.85 m.s.n.m.

### **1.2.1 Localización del banco de materiales en estudio**

El banco de materiales se denomina "Material de Celda" y está ubicado en la Mina Orosí, municipio de La Libertad, departamento de Chontales. El material extraído del banco de materiales antes mencionado fue utilizado como material de relleno en el proyecto "Reconversión Tecnológica Mina Orosí" y en el proyecto de "Revestimiento de 15 km de camino La Libertad - Juigalpa".

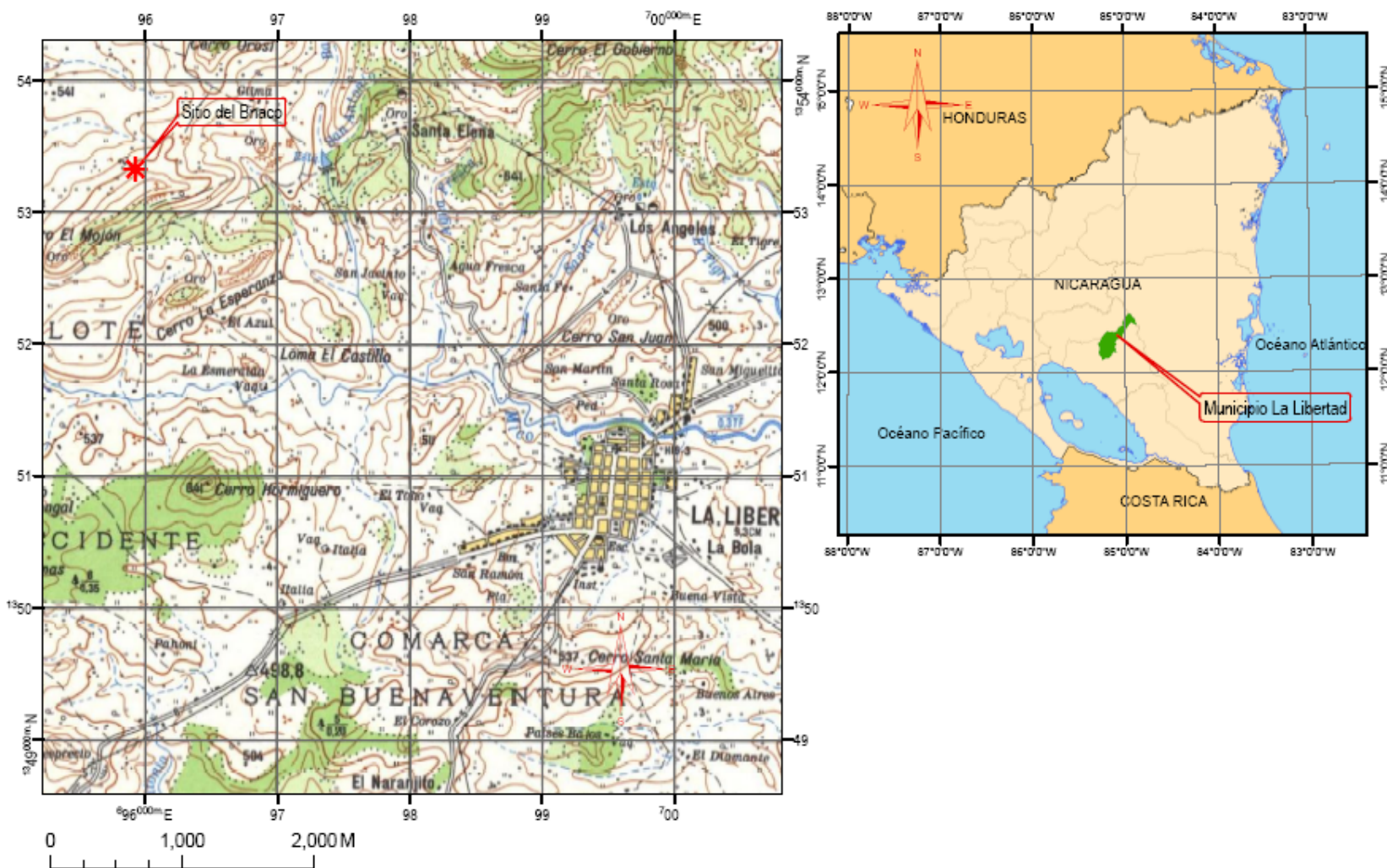
El punto de muestreo tiene las siguientes coordenadas:

0695921E, 1353406N, sistema de coordenadas UTM.

Elevación: 620 m.s.n.m

Fig.1.1 Mapa de localización del banco “Material de Celda”, Mina Orosí, La Libertad, Chontales,  
Fuente: Cartografía INETER, esc: 1:50000

Localización del Sitio del Banco de Materiales  
La Libertad, Juigalpa, Chontales



### 1.3 Antecedentes

En Nicaragua pocos o ningún laboratorio de materiales y suelos cuenta con un Martillo de Clegg, por lo que los antecedentes del uso de éste en trabajos de control de calidad de terracerías son casi nulos o no existen. En otros países como Australia, Estados Unidos, Brasil, México, Colombia, Inglaterra, Canadá, Arabia Saudita y otros, el uso y manejo de este equipo data de hace pocos años. <sup>(23)</sup> Los resultados que se han obtenido en la aplicación de éste han tenido buen suceso y con la realización de este trabajo se espera que en Nicaragua tengan la misma aceptación.

A diferencia de Nicaragua, el Martillo de Clegg ha sido utilizados en otros países, a saber: Estados Unidos, Inglaterra, Francia, Canadá, Australia, Arabia Saudita, Colombia, México, Brasil, etc. Una gran cantidad de instituciones, universidades y laboratorios de suelos los han empleado en trabajos de investigación y consultoría. Entre estos centros están: Universidad de Missouri, NCDOT, City of San José, Universidad de Nuevo México, Administración de Autopistas del Estado de Maryland, Instituto Politécnico de California, Universidad de Massachussets, Universidad del Estado de Iowa, CNA Consulting Engineers, Humboldt Mfg. Co., etc. <sup>(23)(24)</sup>

Los diversos trabajos que han publicado estas instituciones sirvieron como guía en la realización de esta investigación, respetando siempre los derechos de autor de cada uno.



## 1.4 Justificación

La implementación de nuevas tecnologías es fundamental para el desarrollo económico de un país y más tratándose de países en vías de desarrollo como Nicaragua.

En el caso de la construcción de terracerías, la tecnología utilizada para el control de calidad de los procesos de compactación es un poco vieja, lo que no quiere decir que proporcione resultados no confiables. Sin embargo, los métodos y equipos que se emplean resultan complejos en su ejecución, lo que los hace poco rentables. Aún así, se siguen utilizando por la falta o desarrollo de métodos y equipos que faciliten el trabajo y resulten más económicos.

Con la elaboración de esta investigación se pretende:

- Proporcionar un documento que ayude a obtener con mayor facilidad y rapidez estimaciones del valor CBR en campo o laboratorio utilizando el equipo Martillo de Clegg.
- Introducir el Valor Impacto de Clegg (VIC) como una nueva variable que se pueda utilizar en el control de calidad de las propiedades mecánicas de las terracerías, así como en el diseño de estas.
- Animar a las instituciones, universidades y empresas que se dedican a la investigación y realización de ensayos en suelos a que indaguen e inviertan en tecnologías nuevas y sencillas que faciliten el trabajo humano y permitan el ahorro de recursos económicos.
- Suministrar una herramienta que sirva como base de información a todos los interesados en la materia y principalmente que sea el punto de partida de la bibliografía que hasta ahora nace en Nicaragua sobre el tema.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

- Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos a partir de la ejecución de los ensayos de CBR y Valor Impacto de Clegg (VIC) en especímenes de suelo fabricados con material del banco “Material de Celda”, ubicado en la Mina Orosí, municipio de La Libertad, dpto. de Chontales.

### 1.5.2 Objetivos específicos

- Muestrear el banco de materiales “Material de Celda” ubicado en la Mina Orosí.
- Caracterizar el material del banco “Material de Celda” mediante la realización de los siguientes ensayos:
  - ✓ Granulometría.
  - ✓ Límites de Atterberg.
  - ✓ Clasificación de suelos según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).
  - ✓ Relaciones de Humedad-Densidad por el método Proctor Modificado.
  - ✓ CBR de laboratorio.
- Fabricar especímenes de suelo preparados a diferentes contenidos de humedad y energías de compactación aplicando el martillo Proctor de 4.5kg en moldes CBR de 6”.
- Ejecutar ensayos de Valor Impacto de Clegg (VIC) y valor CBR en los especímenes de suelo mencionados anteriormente.
- Proponer un modelo matemático que correlacione las variables VIC y CBR aplicando las técnicas de correlación y regresión.

## 1.6 Diseño Metodológico

### 1.6.1 Recopilación de la información

En esta fase se recopiló y seleccionó toda la documentación existente de investigaciones previas relacionadas con el tema en estudio. Dicha documentación sirvió de base y guía para estructurar y organizar el trabajo de laboratorio y de gabinete.

### 1.6.2 Muestreo y caracterización del material en estudio

En esta fase se realizó el muestreo del banco de materiales “Material de Celda”, ubicado en la Mina Orosí, La Libertad, Chontales. Se llevó a cabo un muestreo de tipo alterado. Se realizó una pequeña excavación de aproximadamente 1.5m y se extrajo el material, el cual fue llevado al laboratorio del CIGEO/UNAN para su debida caracterización.

El material fue caracterizado siguiendo los procedimientos descritos en las normas ASTM, revisión anual 2007, mediante la ejecución de los siguientes ensayos:

- Análisis del tamaño de partículas de los suelos (ASTM D 422).
- Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos (ASTM D 4318).
- Determinación en laboratorio del contenido de agua de los suelos, roca y mezclas de suelo agregado (ASTM D 2216).
- Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) (ASTM D 2487).
- Características de los suelos compactados en el laboratorio utilizando el esfuerzo modificado (ASTM D 1557).
- Ensayo de CBR (California Bearing Ratio) de suelos compactados en el laboratorio (ASTM D 1883).

### 1.6.3 Preparación y fabricación de especímenes

Inicialmente, el material muestreado fue sometido a un proceso de secado y de separación de partículas con tamaño mayor a  $\frac{3}{4}$ ". Posteriormente, se tomaron 36kg del material preparado, los que fueron separados en 4 partes de 9kg cada una. Estas fueron llevadas a estados de humedad (teóricos) del 6%, 9% y 12% y un último correspondiente a la humedad óptima del material del 11.40%.

Cada una de las partes separadas anteriormente y con los estados de humedad mencionados, fue utilizada para fabricar especímenes compactados en 5 capas en un molde estándar para CBR de 6.0"x7.0" utilizando un martillo Proctor de 4.5kg.

Se prepararon 5 especímenes para cada estado de humedad, cada uno de los cuales fue compactado con diferentes energías de compactación, siendo éstas 30, 40, 50, 60 y 70 golpes por capa.

La razón principal por la que se escogieron los estados de humedad y las energías de compactación antes mencionados fue la obtención de especímenes con diferentes características físicas y mecánicas que al ser ensayados proporcionaran una serie de datos que pudieran ser utilizados para realizar un análisis amplio y coherente.

### 1.6.4 Ensayos realizados en especímenes elaborados

Cada espécimen fabricado fue sometido a 3 ensayos en el laboratorio, con los cuales se determinaron 4 variables. Los ensayos fueron ejecutados sobre el mismo espécimen en el orden que se describe a continuación:

- Ensayo de compactación: variables densidad y humedad.
- Ensayo CBR de laboratorio: variable CBR (California Bearing Ratio)
- Ensayo con Martillo Clegg: variable VIC (Valor Impacto de Clegg)

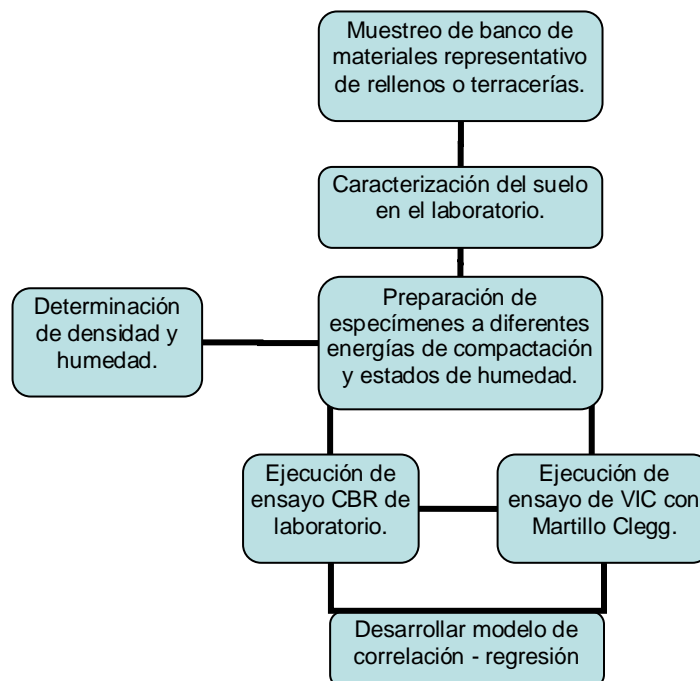
### 1.6.5 Análisis e interpretación de resultados

Los resultados obtenidos en el trabajo de laboratorio fueron analizados en el gabinete con el propósito de:

- Caracterizar el material en estudio.
- Construir combinaciones gráficas de las variables obtenidas en los ensayos.
- Proponer un modelo o ecuación matemática que relacione las variables VIC y CBR.
- Concluir sobre la correlación de las variables en análisis.
- Describir las recomendaciones del estudio.

El modelo o ecuación de regresión se obtuvo mediante la aplicación de las técnicas estadísticas correlación y regresión. Es necesario mencionar que se utilizó el programa de computadora Ms Excel 2007 para calcular y generar dicho modelo y sus respectivos elementos, así como las hojas de registros y cálculo para los ensayos de laboratorio, gráficos, etc.

Fig.1.2 Representación esquemática del diseño metodológico



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 La Ingeniería Geotécnica y su importancia en las obras civiles

La ingeniería geotécnica es una de las ramas más jóvenes de la ingeniería civil. Es la ciencia encargada del estudio de las propiedades mecánicas, físicas, hidráulicas e ingenieriles de los materiales provenientes de la tierra. La Geotecnia toma en cuenta los principios y leyes tanto de la Mecánica de Suelos como de la Geología y de la Mecánica de Rocas y los aplica a los problemas de ingeniería. <sup>(5)</sup>

Antiguamente, a la Ingeniería Geotécnica o Geotecnia se la identificaba como la Mecánica de Suelos, sin embargo se amplió el término para incluir temas como la Ingeniería Sísmica, la elaboración de materiales geotécnicos, mejoramiento de las características del suelo, interacción suelo-estructura y otros. <sup>(26)</sup>

Por muchísimo tiempo y por diversos motivos, el hombre ha estudiado el suelo, desarrollando varias teorías y métodos en la solución de los problemas relativos al uso del mismo. Sin embargo, se puede decir con certeza que la persona que organizó conceptos y los hizo crecer hasta formar una nueva rama de la Ingeniería Civil fue el profesor y destacado investigador sueco Dr. Karl Von Terzaghi. <sup>(5)</sup>

La aplicación de la Geotecnia a la solución de los problemas de ingeniería es de gran importancia para el buen funcionamiento de las estructuras o edificaciones que se construyen sobre el suelo. La construcción de edificios, presas, puentes, carreteras y otros requiere un estudio completo del suelo sobre el cual se cimentará la estructura. Existen numerosas situaciones en las cuales se puede constatar la importancia que tienen los estudios geotécnicos para conocer las propiedades y características del suelo; por ejemplo, la construcción de un edificio requiere el conocimiento de la capacidad de carga del suelo sobre el cual se cimentará con el objetivo de evitar asentamientos que puedan poner en riesgo la integridad de la estructura; para realizar el diseño estructural de una carretera es necesario conocer ciertas propiedades del suelo como densidad, valor CBR, módulo de resiliencia y otras lo que permitirá el buen desempeño de la carretera ante las cargas a las que será sometida.

## 2.2 Objetivos de la Ingeniería Geotécnica <sup>(12)</sup>

1. Desarrollar métodos y dispositivos para el muestreo de suelos.
2. Desarrollar métodos y dispositivos adecuados para el ensayo de suelos.
3. Recolectar y clasificar información sobre suelos y sus propiedades físicas para contribuir al conocimiento de la mecánica de suelos, terraplenes e ingeniería de cimentaciones.
4. Investigar las propiedades físicas de los suelos y determinar los coeficientes para caracterizar estas propiedades.
5. Evaluar e interpretar resultados de ensayos de suelo y su aplicación al uso de éste en el lugar o como material de construcción.
6. Esforzarse por adquirir más conocimientos que ayuden a entender los procesos físicos que se presentan en suelos sujetos a varios factores tales como cargas estáticas y dinámicas, agua y temperatura.
7. Aplicar el conocimiento de la mecánica de suelos para la solución de problemas prácticos de ingeniería.
8. Reemplazar por métodos científicos los métodos empíricos de diseño usados en el pasado en trabajos de cimentaciones, carreteras y terraplenes, contribuyendo así al avance y desarrollo de esta disciplina.

## 2.3 Suelos

Una gran cantidad de definiciones del término “suelo” han sido implementadas por diferentes profesionales que tienen algún tipo de relación con el suelo. Agrónomos, geólogos e ingenieros civiles han definido “suelo” de diferentes maneras tomando en cuenta su formación académica y ambiente de trabajo.

Para los agrónomos, el suelo es la tierra moldeada dentro de la cual las fuerzas orgánicas son prominentes y que es adaptada para ayudar a mantener la vida de las plantas. Los geólogos, consideran al suelo como una capa delgada de material producto de la descomposición y desintegración de las rocas por el ataque de agentes atmosféricos. A. Rico y H. del Castillo son ingenieros civiles que definen al suelo como

el conjunto de partículas minerales, producto de la desintegración mecánica o de la descomposición química de rocas preexistentes. <sup>(5)(19)</sup>

Otra definición es la que hace el Ing. Carlos Crespo en la cual reúne la esencia de las definiciones anteriores. Según Crespo, “suelo es una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que proviene de la desintegración y/o alteración física y/o química de las rocas y de los residuos de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan”. <sup>(5)</sup>

Una última definición un poco más ingenieril es la que considera al suelo como cualquier tipo de material terroso no consolidado, compuesto de distintas partículas sólidas con gas y líquidos incluidos, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas, alejando de esta definición cualquier tipo de roca que no se ablande o se desintegre rápidamente por la acción del intemperismo. El agua contenida en el suelo juega un papel fundamental en el comportamiento mecánico de éste, por tanto, el agua debe considerarse como parte integral del mismo. <sup>(11)(17)</sup>

### 2.3.1 Origen y formación del Suelo

Los suelos tienen su origen en los macizos rocosos preexistentes que constituyen la roca madre, sometida a la acción ambiental disgregadora de la erosión en sus tres facetas:

- **Física**, debida a cambios térmicos y a la acción del agua. Estas acciones físicas tienden a romper la roca inicial y a dividirla en fragmentos de tamaño cada vez más pequeño, que pueden ser separados de la roca por agentes activos (agua, viento, gravedad) y llevados a otros puntos en los que continúa la acción erosiva. Es decir, tienden a crear las partículas que van a formar el suelo. <sup>(5)</sup>

Es importante mencionar que los agentes físicos no son capaces de reducir los fragmentos rocosos a tamaños individuales a menos de 0.01mm. La desintegración a tamaños menores a 0.01mm sólo se puede realizar por procesos químicos. <sup>(5)</sup>



- **Química**, originada por fenómenos de hidratación, disolución, oxidación, cementación, etc. Esta acción, por lo tanto, tiende tanto a disgregar como a cementar, lo que quiere decir que puede ayudar a la acción física y, posteriormente, cementar los productos formados, dando unión química a las partículas pequeñas, tamaño suelo, que se forman, aunque la mayor parte de las veces contribuye más a destruir y transformar que a unir. <sup>(5)</sup>

- **Biológica**, producida por actividad bacteriana, induciendo putrefacciones de materiales orgánicos y mezclando el producto con otras partículas de origen físico-químico, actuando de elemento catalizador, etc. <sup>(5)</sup>

### 2.3.2 Tipos de Suelos

La terminología utilizada por el ingeniero civil para identificar los suelos más comunes en su ámbito profesional, distingue los siguientes tipos: <sup>(5)</sup>

#### 2.3.2.1 Gravas

Son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas. Dado el origen, cuando son transportadas por el agua las gravas se desgastan en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas. De forma suelta, se les encuentra en los lechos y en las márgenes de los ríos y depresiones de terrenos rellenados por el acarreo de los ríos. Casi siempre se encuentran con mayor o menor proporción de cantos rodados, arenas, limos y arcillas. El tamaño de sus partículas varía desde 7.62cm (3") hasta 2.0mm.

#### 2.3.2.2 Arenas

Son granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, cuyo tamaño varía entre 2mm y 0.05mm de diámetro. El origen y existencia de las arenas es análoga a la de las gravas. Las arenas estando limpias no se contraen al secarse, no son plásticas, son mucho menos compresibles que las arcillas y si se aplica una carga en su superficie, se comprimen casi de manera instantánea.

### 2.3.2.3 Limos

Son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser *limo inorgánico* como el producido en canteras, o *limo orgánico* como el encontrado en los ríos, siendo este último de características plásticas. El diámetro de sus partículas varía de 0.05mm a 0.005mm. Su color varía de gris claro a muy oscuro. Los *limos orgánicos* son de baja permeabilidad y de alta compresibilidad.

### 2.3.2.4 Arcillas

Son partículas sólidas con diámetro menor de 0.005mm que tienen la propiedad de volverse plásticas al ser mezcladas con agua. Algunas entidades consideran como arcillas a las partículas con tamaños menores de 0.002mm. En general, las arcillas son plásticas, se contraen al secarse, presentan marcada cohesión según su humedad, son compresibles y cuando se les aplica carga superficial se comprimen lentamente.

## 2.3.3 Suelos cohesivos y suelos no cohesivos

Una de las propiedades que distingue a varios tipos de suelos es la cohesión o atracción entre las partículas individuales del suelo. El grado de cohesión o unión, se puede comparar a la acción de secar una muestra de suelo y luego intentar romper la muestra. Las observaciones demuestran que en tal caso la arena se rompe inmediatamente. Las arenas arcillosas se pueden desmoronar fácilmente con la yema de los dedos, pero en las arcillas esto se hace muy difícil. Según las propiedades cohesivas, los suelos se pueden clasificar en dos grupos principales: a) Suelos no cohesivos, y b) Suelos cohesivos. <sup>(12)</sup>

Los suelos no cohesivos son aquellos que no poseen ningún tipo de cementación como las gravas y arenas. Los suelos cohesivos son aquellos que poseen cohesión, la cual se debe a la fuerza de atracción intermolecular que mantiene unidas a las partículas del suelo. <sup>(12)</sup>

### 2.3.4 Muestreo de Suelos

Dada la complejidad y prácticamente la infinita variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, para cualquier proceso de construcción, es necesario que ciertas propiedades de los suelos sean suficientemente conocidas por el ingeniero que analizará el suelo donde se asentará una estructura tal como taludes y terraplenes, ya que ellas influyen en el comportamiento de ésta durante su vida útil. Estas propiedades se determinan realizando diferentes tipos de ensayos en laboratorio a las muestras obtenidas durante la etapa de muestreo. <sup>(5)</sup>

Es de fundamental importancia que dicho muestreo sea representativo, ya que de esta manera, se garantizará que el análisis efectuado sobre la muestra sea aplicable tanto a la propia muestra como al material del cual procede. Se pueden obtener dos tipos de muestras: alterada o inalterada. La primera es aquella que no guarda las mismas condiciones que cuando se encontraba en el terreno del cual procede, y la segunda es el caso contrario. <sup>(5)</sup>

Debido a que el muestreo del suelo estudiado en este documento se obtuvo como una muestra alterada, el estudio de las muestras inalteradas no cobra importancia en éste, por lo tanto sólo es necesaria su mención.

#### 2.3.4.1 Muestras Alteradas <sup>(5)(6)</sup>

Las muestras alteradas son suficientes cuando se quieren determinar características generales como: granulometría, tamaño, peso de las partículas, humedad, límite líquido, límite plástico, capacidad de absorción de agua, materias presentes o valores límite de densidad.

El método utilizado para recolectar el material del banco en estudio fue de tipo alterado. El material muestreado fue tomado de una excavación de 1.5m x 1.5m con una profundidad aproximada de 1.5m a 2m.

En esta etapa se siguieron los siguientes pasos:

- Se rebajó la parte seca y suelta del suelo (parte superficial) con el propósito de obtener una superficie fresca del suelo.
- Se procedió a realizar la excavación con las dimensiones antes mencionadas, depositando el material extraído en bolsas herméticas.
- Se realizó la debida identificación de las bolsas herméticas, las cuales fueron colocadas en sacos de 1qq.
- Se llenaron aproximadamente 6 sacos de material, el cual fue enviado al laboratorio para su posterior análisis.

#### **2.3.4.2 Secado y disgregado de muestras alteradas <sup>(5)</sup>**

El proceso de secado al aire se emplea sólo cuando la muestra llega al laboratorio con humedad que permita su fácil disgregación. En caso contrario, la muestra debe ser secada extendiéndola al sol sobre una superficie limpia, o bien colocándola en una charola dentro de un horno a una temperatura de 50 °C, o secándola lenta y cuidadosamente en una estufa a bajo calor.

El proceso de disgregación tiene por objeto llevar las muestras a un estado semejante al que van a presentar en la obra durante el proceso de construcción. Para realizar la disgregación de una muestra se emplea un mazo de madera de 9.5 cm por lado y de 15 cm de altura con una mango saliendo de la cara posterior de la base, y con un peso aproximado de 1 kg.

El primer paso para disgregar las muestras es tamizar el material por una malla N°4 y el retenido se coloca en una charola y se macea, dejando caer el mazo verticalmente sobre el material y desde una altura aproximada de 20 cm. Disgregada la muestra retenida en la malla N°4 se mezcla con la que pasó dicha malla y se somete a otro procedimiento llamado cuarteo.

### **2.3.4.3 Cuarteo de muestras alteradas <sup>(5)</sup>**

Con la mezcla disgregada y mezclada, se forma un cono colocando con una pala rectangular el material en el vértice de éste y permitiendo que se acomode. Con la misma pala, se forma un cono truncado de unos 15 cm de altura y con una regla se divide en cuadrantes. Se mezcla el material de dos cuadrantes opuestos y se repite la operación hasta obtener la cantidad de muestra deseada para las pruebas que se realizarán.

### **2.3.5 Propiedades físicas de los suelos**

El conocimiento de las propiedades físicas de los suelos es de gran importancia, pues determina, hasta cierto punto, la calidad del suelo como material de construcción o el grado de estabilidad de éste como parte de los cimientos de una determinada estructura.

Algunas de las propiedades físicas más importantes del suelo son el color, la forma de los granos, el tamaño de las partículas o granulometría, la densidad, el peso volumétrico, el contenido de agua, los límites de consistencia, y otras relacionadas con la capacidad de retención de agua en el suelo. <sup>(12)</sup>

#### **2.3.5.1 Color**

El color es una de las propiedades físicas más obvia y común en ser notada mientras se observa el suelo. El color del suelo puede variar ampliamente desde blanco hasta rojo o negro, con casi todas las combinaciones de colores posibles. El color del suelo depende principalmente de su constitución mineral, el contenido orgánico, la cantidad de óxidos colorantes de hierro y manganeso y el grado de oxidación. El color negro es indicativo de presencia de manganeso o materia orgánica, el verde y azul son debido a compuestos ferrosos, el gris y blanco se deben principalmente a la ausencia de materiales coloridos. <sup>(12)</sup>

El suelo cambia de color con el cambio del contenido de humedad. Durante el proceso de secado, generalmente la muestra se torna más clara. Por lo tanto, para propósitos de identificación y descripción el color del suelo debería ser aquel en estado húmedo y, preferiblemente, en condición inalterada.

### 2.3.5.2 Forma

La forma de las partículas de suelo más grandes que se encuentran en la naturaleza, generalmente indica su resistencia y rigidez. Los granos de forma redondeada que se encuentran en los depósitos de los ríos han sufrido un desgaste considerable y probablemente son muy fuertes. Por otro lado, las partículas planas y escamosas posiblemente no han estado sujetas a dicho tratamiento y pueden ser débiles y con tendencia a fracturarse, por lo que no serían adecuadas para muchos usos en ingeniería. <sup>(9)</sup>

### 2.3.5.3 Densidad

La densidad de un suelo es la relación de su peso en una unidad de volumen. A veces se expresa como “peso húmedo”, es decir, el peso total incluyendo el agua. Más comúnmente se emplea el “peso seco”, que es el peso de las partículas del suelo por sí solas, excluyendo el peso del agua contenida. <sup>(9)</sup>

En el SI las densidades comúnmente se expresan en  $\text{Mg/m}^3$ ,  $\text{kg/m}^3$ , o  $\text{gr/cm}^3$ . Por lo tanto, la densidad del agua puede ser expresada como  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3 = 1 \text{ Mg/m}^3 = 1 \text{ gr/cm}^3$ . La densidad de los sólidos, típicamente tiene rangos desde 2640 a 2750  $\text{kg/m}^3$ . Donde los valores de la masa o la densidad de masa ( $\text{gr}$ ,  $\text{kg}$  ó  $\text{kg/m}^3$ ) medidos o dados deben ser multiplicados por  $g$  ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) para obtener pesos unitarios antes de realizar cálculos de esfuerzos. En el Sistema Inglés los valores de densidad de masa, virtualmente, nunca son usados en ingeniería geotécnica y todo el trabajo es realizado en términos de pesos unitarios. <sup>(3)</sup>

### 2.3.5.3.1 Efectos de la densidad en las propiedades mecánicas del suelo

Cuando un suelo en particular se vuelve más denso, contendrá un mayor número de partículas, y el volumen (del poro) remanente para el agua y el aire será disminuido.

Para suelos granulares, el incremento de densidad y la disminución del contenido de humedad, mejoran las propiedades físicas de un suelo que es de suma importancia en la construcción de caminos. La resistencia aumenta; la consolidación bajo la carga y el movimiento del agua a través del suelo decrecen. La alta compactación de las subrasantes y de las bases de materiales granulares para obtener estas ventajas es práctica común. Por otra parte, puede resultar alguna dificultad al sobrecompactar las arcillas que tienen una gran afinidad con el agua. A menos que sean confinadas mediante la imposición de cargas tales como el peso de una capa de relleno, estos materiales, si son sobrecompactados, posteriormente tomarán agua y se hincharán. Esto da como resultado una superficie ondulada y una posible falla del camino. Igualmente, la sobrecompactación de arcillas húmedas, particularmente a grandes deformaciones, reorientarán las partículas y reducirán altamente la resistencia. <sup>(9)</sup>

### 2.3.5.4 Contenido de agua

Es la relación, expresada como un porcentaje, de la cantidad de agua contenida en una masa de suelo dada con la masa de las partículas sólidas del suelo. <sup>(1)</sup>

El contenido de agua es una característica muy importante en los suelos cohesivos, influye sobre la capacidad de compactación y la consistencia, así como en la capacidad portante del terreno.

### 2.3.5.5 Límites de consistencia <sup>(38)</sup>

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo del contenido de agua. Así un suelo se puede encontrar en un estado

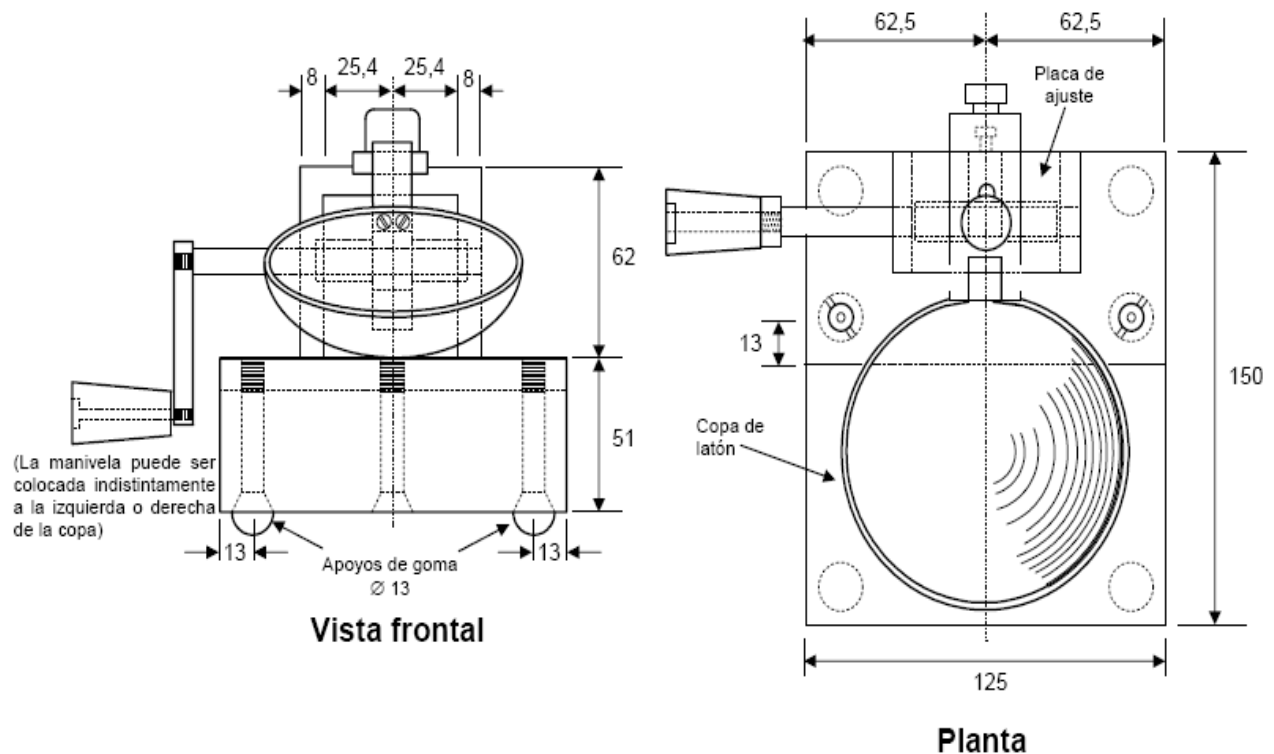
sólido, semisólido, plástico, semilíquido y líquido. La arcilla, por ejemplo al agregarle agua, pasa gradualmente del estado sólido al estado plástico y finalmente al estado líquido.

Los límites de Atterberg son propiedades índices de los suelos, con que se definen la plasticidad y se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo.

### 2.3.5.5.1 Límite líquido

Cuando el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse. Éste se define como la cantidad de agua necesaria para que una ranura de suelo cierre 1.27 cm (1/2") al aplicarle 25 golpes de caída en un aparato normalizado.

Fig.2.1 Dimensiones del aparato de Casagrande para calcular el límite líquido. <sup>(39)</sup>



Este aparato, de dimensiones normalizadas, consistente en una copa de bronce con dimensiones de 5 mm de radio externo, 2 mm de espesor y un peso estándar de 200 gr, fijado en el borde a un dispositivo que mediante la operación de una manivela cae



libremente desde 10 mm, produciendo así un choque controlado contra una base de goma dura. El suelo mezclado uniformemente con agua es colocado en la parte de la copa metálica opuesta al punto fijo y se le da forma con una plantilla o ranurador, también de dimensiones estándares de 2 mm de base, 11 mm corona y 8 mm de altura que deja en el centro una ranura uniforme. A cada vuelta de la manivela se produce un golpe en la copa, que tiende a hacer deslizar el suelo humidificado juntando los bordes de la ranura. <sup>(27)(36)</sup>

#### **2.3.5.5.2 Límite plástico**

Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe. Éste se define como la acción de enrollar el suelo con la mano extendida sobre una placa de vidrio, con presión suficiente para moldearlo en forma de cilindro o hilo de diámetro uniforme por la acción de unos 80 a 90 movimientos de mano por minuto hacia delante y hacia atrás. Cuando el diámetro del hilo o cilindro del suelo llegue a 3 mm (1/8 de pulgada) se debe romper en pequeños pedazos y con ellos moldear nuevamente unas bolas o masas que a su vez vuelvan a enrollarse hasta cuando el hilo o cilindro de suelo se rompa bajo la presión de enrollamiento y ya no permita que se enrolle adicionalmente. <sup>(39)</sup>

#### **2.3.5.5.3 Límite de contracción**

Cuando el suelo pasa de un estado semisólido a un estado sólido y deja de contraerse al perder humedad. <sup>(38)</sup>

#### **2.3.5.5.4 Índice de plasticidad**

Es un parámetro físico que se relaciona con la facilidad de manejo del suelo, por una parte, y con el contenido y tipo de arcilla presente en el suelo, se define como la diferencia numérica entre los límites líquidos y plástico.

$IP = LL - LP > 10$ ; plástico

$IP = LL - LP < 10$ ; no plástico

Valores Menores de 10 indican baja plasticidad, y valores cercanos a los 20 señalan suelos muy plásticos.

### **2.3.5.6 Tamaño de partículas** <sup>(1)</sup>

El análisis del tamaño de las partículas de un suelo se refiere a los diámetros de los granos que lo forman, cuando es indivisible bajo la acción de una fuerza moderada. Las partículas mayores son las que se pueden mover con las manos, mientras que las más finas por ser tan pequeñas no pueden ser observadas con un microscopio. De igual forma constituye unos de los fundamentos teóricos en los que se basan los diferentes sistemas de clasificación de los suelos.

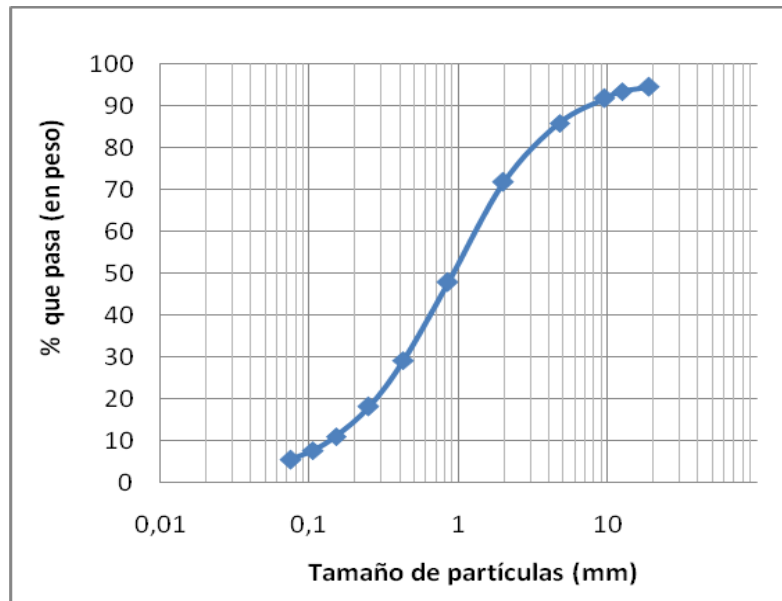
El análisis granulométrico al cual se somete un suelo es de mucha ayuda para la construcción de estructuras como carreteras porque con éste se puede conocer la permeabilidad y la cohesión del suelo. Los análisis granulométricos se realizan mediante ensayos en el laboratorio con tamices de diferentes enumeraciones. Los granos que pasen o se queden en el tamiz tienen sus características ya determinadas. Para el ensayo o el análisis de agregados finos y gruesos es muy recomendado el método del tamizado.

Los resultados de los ensayos de tamizado se llevan a un gráfico llamado curva granulométrica la cual es una representación gráfica de la distribución en peso de los tamaños de las partículas que forman un suelo. Los distintos tamaños de los granos se dibujan a escala logarítmica en abscisas y los porcentajes en peso de los granos más finos que un tamaño determinado, en ordenadas a escala natural.

Con la escala aritmética (ordenadas) se representan los porcentajes en peso de partículas. En escala logarítmica (abscisas) los tamaños de los granos en milímetros. Esta clasificación es necesaria en geotecnia, pero no suficiente. Se complementa

siempre la granulometría con el ensayo de Límites de Atterberg, que caracterizan la plasticidad y consistencia de los finos en función del contenido de humedad.

Fig.2.2 Ejemplo de Curva granulométrica



Como una medida simple de la uniformidad de un suelo, Allen Hazen propuso el coeficiente de uniformidad definiéndolo de esta manera: <sup>(10)</sup>

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \text{ecuación..... (2.1)}$$

En donde:

D60 = tamaño tal, que el 60%, en peso, del suelo, sea igual o menor.

D10= llamado por Hazen diámetro efectivo; es el tamaño tal que sea igual o mayor que el 10%, en peso, del suelo.

Los suelos con  $C_u$  menor que 3 se consideran muy uniformes; aun las arenas naturales muy uniformes rara vez presentan  $C_u$  menor que 2. Como dato complementario, necesario para definir la graduación, se define un coeficiente de curvatura del suelo con la expresión:

$$C_u = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}, \text{ecuación..... (2.2)}$$

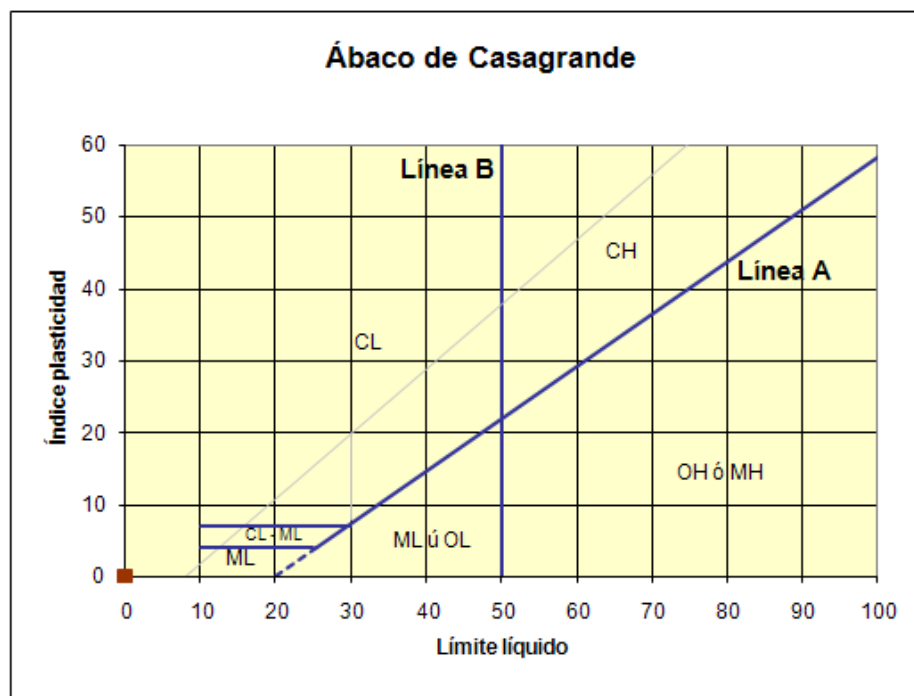
D30 se define análogamente que los D10 y D60 anteriores. Esta relación tiene un valor entre 1 y 3 en suelos bien graduados, con amplio margen de tamaños de partícula y cantidades apreciables de cada tamaño intermedio.

Arthur Casagrande desarrolló la gráfica llamada carta de plasticidad, ésta sirve para determinar la plasticidad de las arcillas o la compacidad de los limos graficando los valores del límite líquido e índice de plasticidad, de acuerdo a los valores de límite líquido siguiente:

Plasticidad (arcillas) o compacidad (limos):

Baja:  $LL < 30$ ; Media:  $30 < LL < 50$ ; Alta:  $LL > 50$

Fig.2.3 Carta de Plasticidad para el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS <sup>(2)</sup>



### 2.3.6 Clasificación de suelos

Dada la gran variedad de suelos que se presentan en la naturaleza, la mecánica de suelos ha desarrollado algunos métodos de clasificación de los mismos. Cada uno de estos métodos tiene, prácticamente, su campo de aplicación según la necesidad y uso que los haya fundamentado. <sup>(5)</sup>

Las distintas clasificaciones de suelos intentan capturar y describir este complejo material en vista a aplicaciones específicas, con sus correspondientes necesidades: construcción de caminos y pavimentos, agricultura, minería o geomecánica.

Las diferentes clasificaciones incluyen: 1) el sistema unificado de clasificación de suelos SUCS, 2) el sistema de la American Association of State Highway & Transportation Officials AASHTO, 3) el método propuesto por la Federal Aviation Administration FAA, 4) el sistema del US Department of Agriculture SDA, y 5) la taxonomía del Eurocódigo, entre otros. <sup>(33)</sup>

Hoy en día es casi aceptado por la mayoría que el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S) es el que mejor satisface los diferentes campos de aplicación de la Mecánica de Suelos. <sup>(5)</sup> Por esta razón, se decidió utilizar este sistema para clasificar el suelo analizado en este estudio.

#### 2.3.6.1 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.)

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos fue inicialmente propuesto por Arthur Casagrande en 1932 y tentativamente adoptado por el Departamento de ingeniería de los EEUU en 1942. La U.S. Army Corps of Engineers comenzó a emplearlo en 1953 en tanto que la U.S. Bureau of Reclamation lo hizo en 1974. <sup>(33)</sup>

En este sistema, los suelos de partículas gruesas y los suelos de partículas finas se distinguen mediante el cribado del material por el tamiz N°200. Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicha malla y los finos a los que la pasan, y así un

suelo se considera grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz N°200 y finos si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz.<sup>(5)</sup> Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres ingleses de los 6 principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turba), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos.<sup>(5)</sup>

En el anexo 4, tabla A.4.1, se pueden observar con más claridad los criterios para realizar la clasificación del sistema unificado.

#### **2.3.6.1.1 Suelos Gruesos**<sup>(5)</sup>

En los suelos gruesos se tienen las gravas (G) y las arenas (S) de tal modo que un suelo pertenece al grupo de las gravas si más del 50% de la fracción gruesa es retenida en el tamiz N°4, y pertenece al grupo de las arenas en caso contrario.

Tanto las gravas como las arenas se dividen en 4 grupos (GW, GP, GM, GC) y (SW, SP, SM, SC) respectivamente.

En el símbolo GW, el prefijo G (Gravel) se refiere a las gravas y W (well graded) quiere decir bien graduada. De igual modo, el símbolo GP indica gravas pobremente o mal graduadas (Poorly graded gravel), el símbolo GM indica gravas limosas, en la que el sufijo M proviene del sueco "mo", y el símbolo GC indica gravas arcillosas. El sufijo C indica arcilla (clay).

Así mismo los símbolos SW, SP, SM y SC indican arenas (Sands) bien graduadas, arenas mal graduadas, arenas limosas y arenas arcillosas respectivamente.

#### **2.3.6.1.2 Suelos Finos**<sup>(5)</sup>

El sistema unificado considera los suelos finos agrupados en 3 grupos para los limos y arcillas con límite líquido menor del 50%, en 3 grupos para los limos y arcillas con límite

líquido mayor del 50% y en 1 grupo para los suelos finos altamente orgánicos. Si el límite líquido del suelo es menor del 50%, es decir si el suelo es de compresibilidad baja o media se añade el sufijo L (low compressibility) a los prefijos M, C y O, obteniéndose de ese modo los símbolos ML (limos inorgánicos de baja compresibilidad), CL (arcillas inorgánicas de baja compresibilidad) y OL (limos orgánicos de baja compresibilidad).

Si el límite líquido es mayor del 50%, es decir si el suelo es de compresibilidad alta, se añade el sufijo H (high compressibility) a los prefijos M, C y O, obteniéndose así los símbolos MH (limos orgánicos de alta compresibilidad), CH (arcillas inorgánicas de alta compresibilidad) y OH (arcillas orgánicas de alta compresibilidad).

Los suelos altamente orgánicos como las turbas, se designan con el símbolo  $P_t$ .

## 2.4 Designaciones estándar utilizadas en el estudio

Formada a finales del siglo XIX, las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) son una de las normas más prestigiosas del mundo en el estudio de las propiedades de los materiales y suelos. Actualmente, a pesar de haberse formado hace más de cien años atrás, las normas ASTM siguen teniendo un rol de liderazgo al tratar las necesidades de estandarización del mercado global. Conocida por tener las mejores prácticas en su clase para el desarrollo y entrega de normas, ASTM está a la vanguardia en el uso de tecnología innovadora para ayudar a sus miembros a desarrollar las normas, e incrementar su accesibilidad al mundo. <sup>(2)</sup>

Tabla 2.1 Designaciones Estándar utilizadas en el estudio

Nombre de la prueba	Designación ASTM
Análisis del tamaño de partícula de los suelos	ASTM D 422
Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	ASTM D 4318
Determinación en laboratorio del contenido de agua de los suelos	ASTM D2216
Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)	ASTM D 2487
Características de los suelos compactados en el laboratorio utilizando el esfuerzo modificado	ASTM D 1557
Ensayo CBR de laboratorio	ASTM D 1883

## 2.5 Martillo de Clegg

### 2.5.1 Antecedentes

El martillo de Clegg fue desarrollado y perfeccionado a comienzos de los años setenta en el departamento de ingeniería civil de la Universidad del Oeste de Australia por el Doctor Baden Clegg, inicialmente en el contexto de la construcción de carreteras, para analizar cuantitativamente las propiedades de resistencia de los suelos. En 1976, este dispositivo fue introducido por primera vez en la 8<sup>va</sup> Conferencia de Investigación de Carreteras de Australia. <sup>(4)</sup> Desde entonces, ha sido ampliamente usado en Australia y Europa. Actualmente es manufacturado en Estados Unidos y está siendo aplicado por consultores y contratistas en varias aplicaciones de los procesos de control de compactación en carreteras, caminos, campos deportivos, etc.

Desde la creación del martillo de Clegg ha existido un gran interés por correlacionar el valor de impacto de Clegg (VIC) con el California Bearing Ratio (CBR), el Dr. Baden Clegg, creador del instrumento, fue el primero en relacionarlos en la conferencia geotécnica de Nueva Zelanda en el año 1980.

Esta correlación se basó en ensayos de laboratorio en el Departamento de Ingeniería Civil en la Universidad del Oeste de Australia. La relación estaba representada por la siguiente ecuación: <sup>(23)</sup>

$$\text{CBR} = 0.07 (\text{CIV})^2 \quad , \text{ecuación.....(2.3)}$$

Desde ese tiempo, existe una gran cantidad de datos disponibles en fuentes de Australia, Nueva Zelanda y del Reino Unido. Estos cubren un amplio rango de suelos para condiciones in situ y de laboratorio. Cerca de 200 ensayos confirman la expresión desarrollada por Clegg, pero con una pequeña variación: <sup>(23)</sup>

$$\text{CBR} = (0.24 (\text{CIV}) + 1)^2 \quad , \text{ecuación.....(2.4)}$$



Investigadores como Clegg (1980), Marthur y Coglans (1987) y Al – Moudi et al (2002) han mostrado que el valor impacto de Clegg (VIC) correlaciona bien con el CBR para una amplia variedad de materiales.<sup>(7)</sup> Sin embargo, estos investigadores, debido a que el CBR está sujeto a una gran variabilidad, incluso dentro de un mismo tipo de suelo, hacen énfasis que estas correlaciones deben establecerse para un determinado tipo de material en lugar de correlaciones generalizadas.

En 1987, Marthur y Coglans desarrollaron un modelo de regresión entre el CBR y el VIC representado por la ecuación:  $CBR = 0.11 (CIV)^{1.86}$ . El modelo más reciente fue el desarrollado por Al – Amoudi en el año 2002 en el cual se propuso el siguiente modelo:  $CBR = 0.1691 (CIV)^{1.695}$  con un coeficiente de correlación de 0.92.<sup>(23)</sup>

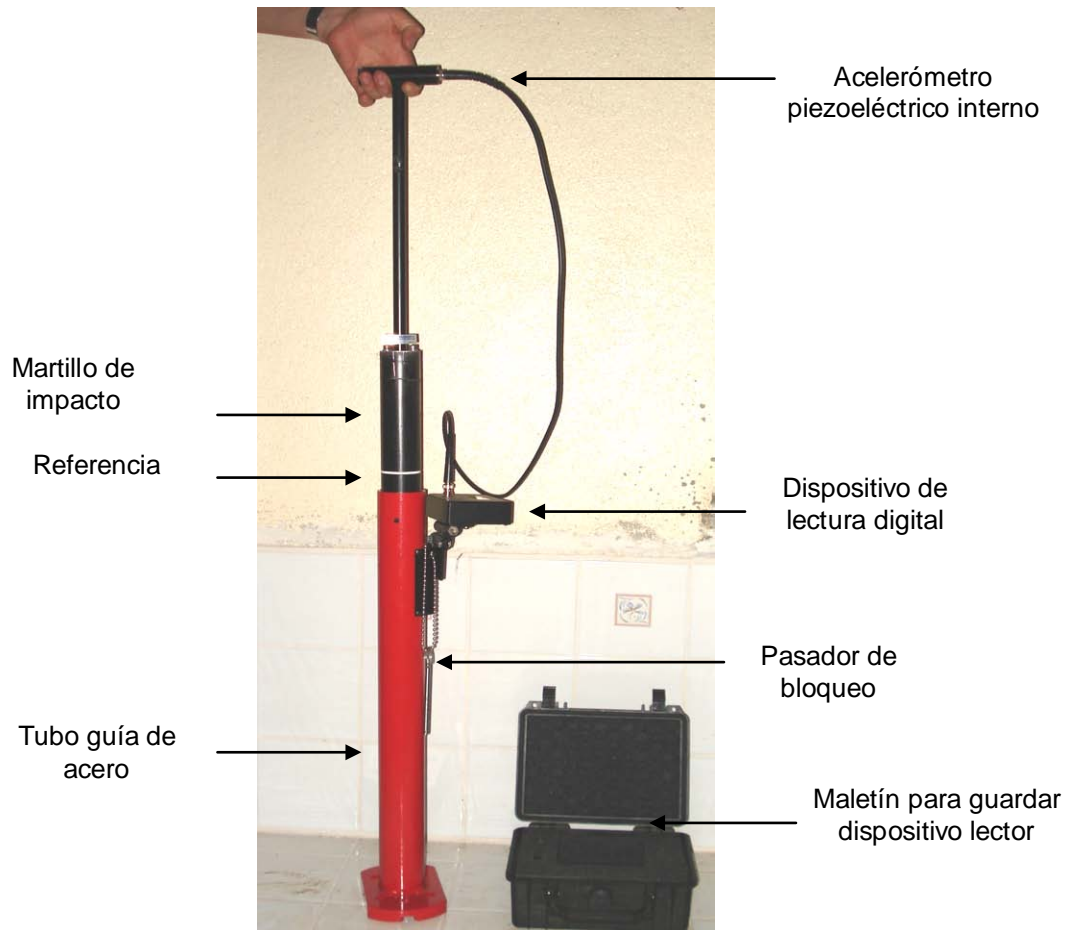
### 2.5.2 Funcionamiento y características

La técnica de Clegg consiste en maniobrar un dispositivo de uso simple el cual está compuesto por tres componentes básicos los cuales son: una masa cilíndrica con un peso determinado, un tubo hueco también cilíndrico que guía la caída de la masa cilíndrica y un dispositivo de lectura digital o pantalla medidora.<sup>(23)</sup> Este dispositivo es de cómodo uso debido a que es liviano y de corto tamaño, lo que permite moverlo de un lado a otro sobre largos tramos en estudio, también es posible utilizarlo en montañas y sobre el rumbo de pavimentos.

El martillo Clegg está basado en la instrumentación del martillo de compactación de laboratorio “Proctor modificado”. El martillo tiene un peso de 4.5 kg con un diámetro de 5 cm y se deja caer desde una altura estándar de 45 cm. Este instrumento está provisto de un acelerómetro piezoeléctrico que genera una lectura digital basada en la desaceleración pico del martillo al caer. El valor que registra dicho acelerómetro se le conoce como Valor de Impacto Clegg (VIC) (1 VIC equivale a 10 gravedades). La lectura del VIC registrada al cuarto o quinto golpe es el valor estándar típicamente recomendado, debido a que los valores de éste comienzan a estabilizarse en ese golpe.<sup>(23)</sup>

Para llevar a cabo un ensayo de impacto, sólo se requiere posicionar el aparato de ensayo en el lugar donde se desea realizar el ensayo, se pulsa el botón on/reset del dispositivo de lectura digital y posteriormente se deja caer manualmente el martillo. El tubo guía se utiliza para controlar la caída del martillo y una referencia a la masa del martillo proporciona los medios necesarios para asegurar una altura de caída apropiada. Los ensayos se pueden llevar a cabo bien sea en el campo, o en el laboratorio con la ayuda de un molde de compactación. <sup>(25)</sup>

Fig 2.4 Partes del martillo de Clegg, Humboldt Mfg.Co.



### 2.5.3 Principales usos del VIC obtenido con el martillo de Clegg. <sup>(24)</sup>

El martillo de impacto Clegg ha sido utilizado en el mundo entero por gobiernos locales, ingenieros consultores, contratistas, compañías de minería y construcción, laboratorios de suelos, universidades, institutos de investigación, el ejército, etc.

Para el diseño de pavimentos: el VIC es similar, en concepto, al California Bearing Ratio (CBR). El VIC puede ser utilizado como una alternativa al CBR en el campo o en el laboratorio en muestras sin saturar.

Para construcción: el VIC provee un medio de control de procesos mediante el monitoreo del efecto de las pasadas del rodillo y verificación de la variabilidad. El porcentaje de compactación puede ser estimado mediante el cálculo del VIC necesario para lograr el nivel de densidad deseado para un material y contenido de humedad dados.

Para evaluación: el VIC puede ser usado para asegurar la resistencia adecuada, capa por capa, de la estructura del pavimento. También se puede utilizar para monitorear el efecto de los cambios ambientales e investigar las fallas en el pavimento.

Bajo costo: un ensayo de impacto requiere sólo una persona y emplea menos de un minuto en su ejecución. El valor de impacto se muestra directamente e instantáneamente en el medidor del martillo al término de un ensayo. El ensayo de Clegg puede ser realizado por el mismo supervisor o por la persona encargada del trabajo.

#### **2.5.4 Especificaciones del Martillo Clegg modelo H - 4190:** <sup>(25)</sup>

- Martillo Estándar de 4,5 kg (10 libras) con bolsa de lona.
- Cara de impacto de acero templado provisto de un acelerómetro piezoeléctrico.
- Construcción del martillo: Acero.
- Tubo guía grueso y con pasador de bloqueo fijado con cadena.
- Dimensiones del tubo de 610 mm altura x 152,4 mm diámetro de base (24"x6").
- Pantalla digital con batería alcalina de 9 Voltios, resolución de 1 CIV (10 gravedades); escala CIV 0 a 100.
- Peso neto de 7.2kg (16lbs).
- Cumple con la norma ASTM D – 5874

### 3. ENSAYOS DE LABORATORIO

#### 3.1 Ensayos de caracterización

Los procedimientos que se siguieron para la ejecución de los ensayos de laboratorio realizados para caracterizar el material de estudio son los descritos en las normas ASTM, revisión anual 2007. Se describen a continuación.

##### 3.1.1 Análisis del tamaño de partículas de los suelos por tamizado.

###### Designación ASTM D 422.

###### 3.1.1.1 Objeto

El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.

Esta norma describe el método para determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo, hasta el de 75 $\mu$ m (No. 200).

###### 3.1.1.2 Aparatos

- Balanzas con sensibilidad de 0.01g a 1g.
- Tamices de malla cuadrada: 75mm (3"), 50mm (2"), 37.5mm (1-1/2"), 25mm (1"), 19.0mm (3/4"), 9.5mm (3/8"), 4.75mm (No.4), 2.00mm (No.10) 850 $\mu$ m (No.20), 425 $\mu$ m (No.40), 250 $\mu$ m (No.60), 106 $\mu$ m (No.140) y 75 $\mu$ m (No.200).
- Horno, que mantenga temperaturas uniformes y constantes hasta de 110  $\pm$  5 °C.
- Tamizador automático.
- Recipientes adecuados para el manejo y secado de las muestras.
- Morteros y apisonadores.
- Cepillo y brocha, para limpiar las mallas de los tamices.

### 3.1.1.3 Procedimiento

Para realizar el análisis granulométrico del material se toma una muestra representativa de éste, dependiendo del tamaño nominal del material a ensayar (ver tabla 3.1) y se prosigue de la siguiente manera:

1. La muestra seleccionada se cuartea y se introduce al horno a temperatura constante con el fin de obtener su peso seco.
2. La muestra escogida para el ensayo se separa por el tamiz N°10. El material retenido en dicho tamiz se apisona en morteros para disgregar los grumos o terrones. Los suelos así desintegrados serán separados entonces en dos fracciones, tamizándolos en el tamiz N°10.
3. La fracción retenida después del segundo tamizado se seca y se pesa, anotando el peso como el peso del material grueso. Este material se tamiza en el tamiz N°4 y se anota el peso retenido en éste. Ambas fracciones se ensayan por separado.
4. El peso del suelo seleccionado para el ensayo, se escoge tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- El peso de la porción de muestra retenida en el tamiz N°10 dependerá del tamaño máximo de las partículas de acuerdo con la siguiente tabla:

Tabla 3.1 Peso mínimo para ensaye de la muestra retenida en el tamiz N°10

Diámetro nominal de las partículas más grandes		Peso mínimo aproximado de la porción
mm	pulg	gr
9,5	3/8	500
19	3/4	1000
25	1	2000
37,5	1 1/2	3000
50	2	4000
75	3	5000

- El tamaño de la porción que pasa tamiz N°10 será aproximadamente de 115 gr para suelos arenosos, y de 65 gr para suelos arcillosos y limosos.

#### **3.1.1.3.1 Análisis granulométrico de la fracción gruesa (material retenido en el tamiz N°10)**

1. Se separa la porción de muestra retenida en el tamiz N°10 en una serie de fracciones usando los tamices de: 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°10.
2. Se colocan los tamices en el tamizador automático y se programa un tiempo de tamizado de 10 minutos. Una vez cumplido este tiempo se verifica si quedan partículas apesadas en la malla, en tal caso se separan con un cepillo y se reúnen con el material retenido en el tamiz.
3. Se determina el peso de cada fracción en una balanza con una sensibilidad de 0.1 % La suma de los pesos de todas las fracciones y el peso inicial de la muestra no debe diferir en más de 1 %.

#### **3.1.1.3.2 Análisis granulométrico de la fracción fina (material que pasa el tamiz N°10)**

1. El análisis granulométrico de la fracción que pasa el tamiz de 2 mm (N°10) se hará por tamizado y/o sedimentación según las características de la muestra y según la información requerida.
2. Los materiales arenosos que contengan muy poco limo y arcilla, cuyos terrones en estado seco se desintegren con facilidad, se podrán tamizar en seco.
3. Los materiales limo arcillosos, cuyos terrones en estado seco no rompan con facilidad, se procesarán por la vía húmeda.
4. Se puede utilizar procedimientos simplificados para la determinación del contenido de partículas menores de un cierto tamaño, según se requiera.
5. La fracción de tamaño mayor que el tamiz de 75 µm (N°200) se analizará por tamizado en seco, lavando la muestra previamente sobre el tamiz de 75 µm (N°200).

### 3.1.1.4 Cálculo

Valores de análisis de tamizado para la porción retenida en el tamiz N°10.

1. Se calcula el porcentaje que pasa el tamiz N°10 dividiendo el peso que pasa dicho tamiz por el del suelo originalmente tomado y se multiplica el resultado por 100. Para obtener el peso de la porción retenida en el mismo tamiz, se resta del peso original, el peso del pasante por el tamiz N°10.
2. Para comprobar el peso total de suelo que pasa el tamiz N°4, se agrega al peso del material que pasa el tamiz N°10, el peso de la fracción que pasa el tamiz N°4 y que queda retenida en el N°10. Para los demás tamices se realiza el cálculo de la misma manera.
3. Para determinar el porcentaje total que pasa por cada tamiz, se divide el peso total que pasa (procedimiento anterior) por el peso total de la muestra y se multiplica el resultado por 100.

Valores del análisis por tamizado para la porción que pasa el tamiz N°10.

1. Se calcula el porcentaje de material que pasa por el tamiz de N°200 de la siguiente forma:

$$\% \text{ que pasa el tamiz No 200} = \frac{\text{Peso total} - \text{Peso retenido en el tamiz No 200}}{\text{Peso total}} * 100, \text{ ecuación.....(3.1)}$$

2. Se calcula el porcentaje retenido sobre cada tamiz en la siguiente forma:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{Peso retenido en el tamiz}}{\text{Peso total}} * 100, \text{ ecuación.....(3.2)}$$

3. Se calcula el porcentaje más fino restando en forma acumulativa de 100% los porcentajes retenidos sobre cada tamiz:

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado}, \text{ ecuación.....(3.3)}$$

### 3.1.2 Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.

#### Designación ASTM D 4318.

Los límites de consistencia requieren aproximadamente 400 g de material que pase por el tamiz N°40, para esto se pulveriza el material grueso con la ayuda de un mazo en un recipiente de porcelana, este procedimiento se hace cuidadosamente y sólo con la presión suficiente para soltar el material fino adherido. El suelo así molido se separa en dos fracciones mediante uso del tamiz N°40 y la fracción retenida, nuevamente molida. Este proceso se debe repetir hasta que una pequeña cantidad pase por el tamiz N°40. La fracción retenida se elimina. Todo material que pasa por tamiz N°40 se mezcla y homogeniza para efectuar los ensayos de límites de consistencia.

#### 3.1.2.1 Aparatos

- Plato de porcelana de 11.5 cm de diámetro.
- Superficie lisa para amasado y enrollamiento.
- Espátula de 7.5 a 10 cm de largo por 2 cm de ancho.
- Equipo para límite líquido (Aparato de Casagrande) eléctrico.

#### 3.1.2.2 Límite Líquido

El límite líquido de un material es la cantidad de agua, expresada en porcentaje, suficiente para que la muestra de material pase de un estado viscoso o líquido a un estado plástico. <sup>(9)</sup>

#### 3.1.2.2.1 Procedimiento

##### 3.1.2.2.1.1 Método A: límite líquido multi-punto

1. Se toman unos 100 g de material que pasa la malla N°40, se colocan en una cápsula de porcelana y con una espátula se hace una mezcla pastosa, homogénea y de consistencia suave agregándole una pequeña cantidad de agua durante el mezclado.



2. Un poco de esta mezcla se coloca, con la espátula, en la copa de Casagrande, formando una torta alisada de un espesor de 1cm en la parte de máxima profundidad.

3. El suelo colocado en la copa de Casagrande se divide en la parte media en dos porciones, utilizando para ello un ranurador. El ranurador deberá mantenerse en todo el recorrido normal a la superficie interior de la copa. El movimiento del ranurador deberá ser de arriba hacia abajo.

4. Hecha la ranura sobre el suelo se acciona la copa a razón de dos golpes por segundo, contando el número de golpes necesarios para que la parte inferior del talud de la ranura hecha se cierre precisamente a 1.27cm. Si la ranura no se cierra a los 1.27cm entre 6 y 35 golpes, se recoge de nuevo el material de la copa, se añade agua y se vuelve a mezclar, o se seca la muestra hasta que alcance una consistencia dentro del intervalo.

5. Cuando se ha obtenido un valor consistente del número de golpes comprendido entre 6 y 35, se toman unos 10 g, aproximadamente de suelo de la zona próxima a la ranura cerrada y se determina el contenido de agua de inmediato. Se repite el ensaye y si se obtiene el mismo número de golpes que el primero o no hay diferencia en más de un golpe, se anotarán ambos números en la hoja de datos. Si la diferencia es mayor de un golpe, se repite el ensaye hasta que tres ensayos consecutivos den una conveniente serie de números.

6. Repítanse los pasos 2 a 5, teniendo el suelo otros contenidos de humedad. Para humedecer el suelo hágase uso de un gotero, remoldeando la mezcla hasta que el agua añadida quede uniformemente incorporada. Para secar el suelo úsese la espátula, de ninguna manera debe secarse el suelo añadiendo suelo seco a la mezcla o sometiéndola a algún proceso de evaporación violenta. De este modo deberán tenerse, por lo menos, dos grupos de dos a tres contenidos de humedad, uno entre los 25 y 35 golpes y otro entre los 6 y los 20 golpes, con el fin de que la curva de fluidez no se salga del intervalo en que pueda considerarse recta.

7. Se unen los dos puntos marcados para el intervalo entre 6 y 20 golpes con una recta y se señala el punto medio. Se repite para los dos o tres puntos dentro del intervalo de 25 a 35 golpes.

8. Se conectan los dos puntos medios con una línea recta que se llama curva de fluidez. El contenido de humedad indicado por la intercepción de esta línea con la de los 25 golpes es el límite líquido del suelo.

#### **3.1.2.2.1.2 Método B: límite líquido 1-punto**

1. Se siguen los pasos del 1 al 3 del método A.

2. Se le aplican golpes de caída a la copa de forma automática, a razón de dos golpes por segundos hasta que el material fluya y cierre aproximadamente 1.27cm. El número de golpes adecuado para que la muestra cierre la cantidad precisada debe estar en el rango de 20 a 30 golpes, si no cierra en este rango o en su defecto cierra antes de 20 golpes, el material está muy seco o demasiado húmedo por lo que se debe agregar agua o secarse según el caso.

3. Se requerirán muchas pruebas de cada muestra para alcanzar el contenido de humedad para el cual la ranura cierre los 1.27 cm.

4. Una vez que la muestra tenga la fluidez buscada y cierre dentro del rango indicado, este valor se escribe en una libreta, para luego tomar una pequeña cantidad de muestra y calcular su contenido de humedad.

Una vez que se ha conseguido lo anterior los valores de humedad se multiplican por un factor de corrección k.

Tabla 3.2 Factor de corrección para el límite líquido

Número de Golpes N	Factor de Corrección K
20	0.973
21	0.979
22	0.985
23	0.99
24	0.995
25	1
26	1.005
27	1.009
28	1.014
29	1.018
30	1.022

Ya que el límite líquido es un factor determinante en la decisión de aceptar o no un material para base y otros materiales, se emplea como una prueba de verificación.

Un alto límite líquido significa que están presentes minerales sujetos a expansión al aumentar el grado de humedad; para suelos limosos los valores de límite líquido varían desde 25 a 30 y para suelos arcillosos valores de 40 a 60, sin embargo se han registrado límites líquidos mayores a 100. <sup>(9)</sup>

### 3.1.2.2.2 Cálculo

$$\text{Límite líquido} = \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Peso del Suelo Secado al Horno}} * 100 * \text{factor de corrección, ecuación.....(3.4)}$$

### 3.1.2.3 Límite Plástico e índice de Plasticidad

El límite plástico se define como la cantidad de agua, expresada en porcentaje del peso seco, necesaria para que un material pase de su estado semisólido a su estado plástico. Generalmente se toma una muestra sobrante del límite líquido para realizar esta prueba, pero en el caso de carecer de ésta, se humedece otra porción del mismo material para realizar el ensayo. <sup>(1)</sup>

Se define al índice plástico de una muestra como la diferencia numérica entre su límite líquido y su límite plástico, también se expresa como porcentaje del peso seco. El índice plástico está en dependencia de la cantidad de arcilla presente en la muestra. <sup>(1)</sup>

### 3.1.2.3.1 Procedimiento

1. Con una cantidad de mezcla pastosa del material más agua se forman pequeños rolos con los dedos hasta formar cordones de 3.17mm de diámetro aproximadamente. Si al alcanzar este diámetro los cordones de la mezcla no se rompen deberá juntarse nuevamente el material en una pequeña bola y rolarse de nuevo hasta lograr el mismo diámetro.
2. Este procedimiento debe repetirse las veces necesarias hasta que el cordón se fracture al alcanzar los 3.17mm de espesor.
3. Seguidamente se toman los trozos de mezcla, se pesan húmedos para luego ser introducidos al horno secador y determinar su peso seco.
4. Teniendo los pesos seco y húmedo de la muestra puede calcularse su contenido de humedad correspondiente al límite plástico.
5. Puede considerarse a un suelo como no plástico cuando sea imposible de rolar con los dedos bajo cualquier condición de humedad.

### 3.1.2.3.2 Cálculo

El límite plástico se expresa como porcentaje de humedad, con una cifra decimal y se calcula así:

$$\text{Límite Plástico} = \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Peso del Suelo Secado al Horno}} * 100, \quad \text{ecuación.....(3.5)}$$

$$\text{Índice de Plasticidad} = \text{Límite líquido} - \text{límite plástico}, \quad \text{ecuación.....(3.6)}$$

**Nota:** Cuando el límite líquido o el límite plástico no puedan determinarse, el índice de plasticidad se indicará con la abreviatura NP (No plástico).

### **3.1.3 Determinación en laboratorio del contenido de agua del suelo, roca y mezclas de suelo-agregado. Designación ASTM D2216.**

#### **3.1.3.1 Objeto**

Este método cubre la determinación de laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca, y mezclas de suelo-agregado por peso. Por simplicidad, de aquí en adelante, la palabra "material" se refiere a suelo, roca o mezclas de suelo-agregado, la que sea aplicable.

El contenido de agua del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material.

Este método no da resultados verdaderamente representativos para materiales que contengan cantidades significativas de haloisita, montmorillonita, o minerales de yeso; suelos altamente orgánicos o materiales en los cuales el agua de los poros contiene sólidos disueltos (como sales en el caso de depósitos marinos). Para los materiales antes mencionados, un método modificado de ensayo o el cálculo previo de algunos datos pueden ejecutarse para obtener resultados consistentes con el propósito de este ensayo.

La aplicación práctica de la determinación del contenido de agua en un material, es poder conocer el peso del agua removida al secar dicho material cuando está húmedo (espécimen de prueba) hasta peso constante, en un horno controlado a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ); y usar este valor como el peso del agua en el espécimen de prueba. El peso del material remanente después de secado en el horno, corresponde al peso de las partículas sólidas.

Para muchos tipos de suelo, el contenido de agua es una de las propiedades índices más significativas, que se emplea para establecer una correlación entre el comportamiento de dicho suelo y otras propiedades índices.

### 3.1.3.2 Aparatos

- Horno, controlado termostáticamente, que mantenga una temperatura uniforme de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) en toda la cámara de secado.
- Balanzas, que tengan una precisión de  $\pm 0.01$  g para muestras que tengan un peso de 200 g o menos;  $\pm 0.1$  g para muestras que tengan un peso entre 200 y 1000 g, y  $\pm 1$  g para muestras que tengan un peso mayor a 1000 g.
- Recipientes. Vasijas apropiadas hechas de un material resistente a la corrosión y a cambios en su peso al ser sometidas a repetidos calentamientos y enfriamientos, y a operaciones de limpieza.

### 3.1.3.3 Procedimiento

1. Se selecciona una cantidad representativa de la muestra húmeda. En caso contrario, la masa mínima de muestra estará de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3.3 Muestra mínima para ensayo de humedad

Tamaño máximo de partícula	Peso mínimo de muestra, g
Tamiz 0,425mm (Nº40)	10
Tamiz 4.75mm (Nº4)	100
Tamiz 12.5mm (1/2")	300
Tamiz 25mm (1")	500
Tamiz 50mm (2")	1000

2. Se coloca la muestra húmeda en un recipiente limpio, seco y de peso conocido; se coloca la tapa firmemente en posición, y se determina el peso del recipiente y la muestra de material usando una balanza apropiada. Se anotan los valores.
3. Se remueve la tapa y se coloca el recipiente con el material húmedo en un horno, manteniendo la temperatura a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) y se seca hasta obtener peso constante.

**Nota 1:** Para facilitar el secado al horno de muestras de ensayo muy grandes, éstas deben ser colocadas en recipientes que tengan un área superficial amplia (como una bandeja) y el material separado en pequeños grupos.

**Nota 2:** El tiempo requerido para obtener un peso constante variará dependiendo del tipo del material, tamaño de la muestra, tipo del horno, su capacidad, y otros factores. La influencia de estos factores generalmente puede establecerse con un buen juicio, y experiencia con los materiales que se están ensayando y el aparato que se está usando. En la mayoría de los casos, el secado de una muestra durante la noche (16 horas), es suficiente. En los casos donde existan dudas concernientes a lo adecuado del procedimiento de secado, éste debe conducirse hasta que el peso, después de dos períodos de secamiento consecutivos (mayores de 1/2 h) indique un cambio insignificante (menor al 0.1%). Las muestras de arena, se pueden frecuentemente secar a un peso constante después de períodos de 4 horas, cuando se usa un horno de corriente de aire forzada.

**Nota 3:** Del secado en horno a  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) no siempre resultan valores del contenido de agua relacionados al uso que pretende dársele o la definición básica, especialmente para materiales que contienen yeso u otros minerales que incluyan una cantidad significativa de agua hidratada (agua de constitución), o para suelos que contienen cantidades significativas de materia orgánica. En muchos casos, y dependiendo del uso que se pretende dar a estos materiales, puede ser mejor mantener el horno de secado a una temperatura de  $60 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $140 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ) o usar un secador de vacío a una presión de vacío de 133Pa (10 mm de Hg) y a una temperatura que varíe entre 23 y  $60^{\circ}\text{C}$  (73 y  $140^{\circ}\text{F}$ ). Si se usa cualquiera de estos métodos de secado, se debe anotar en el informe de resultados.

**Nota 4:** Ya que algunos materiales secos pueden absorber humedad de especímenes húmedos, dichos materiales deben removerse antes de colocar éstos en el horno. Sin embargo, este requerimiento no será necesario si los especímenes secos van a permanecer en el horno por un período de secado adicional de 16 horas.

4. Después que el material se haya secado a peso constante, se remueve el recipiente del horno y se coloca la tapa. Se permite que el material y el recipiente se enfríen a la temperatura ambiente, o hasta que el recipiente pueda ser manejado fácilmente con ambas manos y la operación de pesaje no sea afectada por corrientes convectivas. Se determina el peso del recipiente y de la muestra secada en el horno usando la misma balanza que se usó. Se conserva este valor.

Si el recipiente no tiene tapa, se pesa el material inmediatamente para que la temperatura del recipiente sea tal que la operación del pesaje no sea afectada por corrientes convectivas o después de enfriarlo en un secador.

**Nota 5:** El enfriamiento en secador es recomendable ya que esto previene absorción de humedad proveniente de la atmósfera durante dicho proceso.

### 3.1.3.4 Cálculos

Se calcula el contenido de agua de la muestra con la siguiente ecuación:

$$w = \frac{(W1 - W2)}{(W2 - Wc)} * 100, \text{ ecuación.....(3.7)}$$

Donde:

w = Contenido de agua %

W1= Peso del recipiente y del espécimen húmedo, g.

W2= Peso del recipiente y del espécimen seco, g.

Wc= Peso del recipiente, g.



### **3.1.4 Clasificación de suelos para propósitos de ingeniería (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos). Designación ASTM D 2487.**

#### **3.1.4.1 Uso y Significado**

Esta norma clasifica los suelos de cualquier lugar geográfico en categorías que representan los resultados de ensayos de laboratorio prescritos para determinar las características de tamaño de partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad.

La asignación de un nombre de grupo y símbolo puede ser usada para describir un suelo y ayudar en la evaluación de sus propiedades más significativas para uso ingenieril.

La variedad de grupos de este sistema de clasificación ha sido concebida para correlacionar de manera general con el comportamiento ingenieril de los suelos. Esta norma provee un gran primer paso en cualquier campo o investigación de laboratorio para propósitos de ingeniería geotécnica.

#### **3.1.4.2 Procedimiento**

Para llevar a cabo la clasificación del suelo con más claridad, se debe tener a mano la tabla de clasificación del sistema unificado (ver tabla A.4.1, anexo 4).

##### **3.1.4.2.1 Procedimiento de clasificación primaria**

1. Clasificar el suelo como grano – fino si el 50% o más del peso seco del espécimen de ensayo pasa el tamiz # 200.
2. Clasificar el suelo como grano grueso si más del 50% del peso seco del espécimen de ensayo es retenido en el tamiz # 200.

### 3.1.4.2.2 Procedimiento de clasificación para suelos de granos – finos

1. El suelo es una arcilla inorgánica si la posición de la gráfica del índice de plasticidad versus el límite líquido (ver fig.2.3) cae sobre o encima de la línea “A”, el índice de plasticidad es mayor que 4, y la presencia de materia orgánica no influye en el límite líquido.
2. Clasificar el suelo como arcilla de baja compresibilidad, CL, si el límite líquido es menor de 50. Ver el área identificada como CL en la fig.2.3.
3. Clasificar el suelo como arcilla de alta compresibilidad, CH, si el límite líquido es 50 ó mayor. Ver el área identificada como CH en la fig.2.3.
4. Clasificar el suelo como arcilla limosa, CL – ML, si la posición de la gráfica del índice de plasticidad versus el límite líquido cae sobre o encima de la línea “A” y el índice de plasticidad está dentro del rango de 4 a 7. Ver el área identificada como CL – ML en la fig.2.3.
5. El suelo es un limo inorgánico si la posición de la gráfica del índice de plasticidad versus el límite líquido cae por debajo de la línea “A” o el índice de plasticidad es menor que 4, y la presencia de materia orgánica no influye en el límite líquido.
6. Clasificar el suelo como un limo, ML si el límite líquido es menor de 50. Ver el área identificada como ML en la fig.2.3.
7. Clasificar el suelo como un limo elástico, MH, si el límite líquido es 50 ó mayor. Ver área identificada como MH en la fig.2.3.
8. El suelo es una arcilla o limo orgánico si la materia orgánica está presente en cantidades suficientes como para influenciar el límite líquido.

9. Clasificar el suelo como un limo orgánico o arcilla orgánica, OL, si el límite líquido (no secado al horno) es menor del 50%. Clasificar el suelo como un limo orgánico, OL, si el índice de plasticidad es menor que 4, o la posición de la gráfica del índice de plasticidad versus el límite líquido cae por debajo de la línea "A". Clasificar el suelo como una arcilla orgánica, OL, si el índice de plasticidad es mayor o igual a 4 y la posición de la gráfica del índice de plasticidad versus el límite líquido cae sobre o encima de la línea "A". Ver área identificada como OL (o CL - ML) en la fig.2.3.

10. Clasificar el suelo como una arcilla orgánica o limo orgánico, OH, si el límite líquido (no secado al horno) es mayor o igual a 50. Clasificar el suelo como un limo orgánico, OH, si la posición de la gráfica del índice de plasticidad versus el límite líquido cae por debajo de la línea "A". Clasificar el suelo como una arcilla orgánica, OH, si la posición de la gráfica del índice de plasticidad versus límite líquido cae sobre o encima de la línea "A". Ver área identificada como OH en la fig.2.3.

11. Si menos del 30%, pero el 15% ó más del espécimen de ensayo es retenido en el tamiz N°200, las palabras "con arena" o "con grava" (cual sea predominante) serán añadidas al nombre del grupo. Por ejemplo, arcilla de baja compresibilidad con arena, CL; limo con grava, ML. Si el porcentaje de arena es igual al porcentaje de grava utilizar "con arena".

12. Si 30% ó más del espécimen de ensayo es retenido en el tamiz N°200, las palabras "arenoso" o "gravoso" serán añadidas al nombre del grupo. Añadir la palabra "arenoso" si el 30% ó más del espécimen de ensayo es retenido en el tamiz N°200 y la porción de grano – grueso es predominantemente arena. Añadir la palabra "gravoso", si el 30% ó más del espécimen de ensayo es retenido en el tamiz N°200 y la porción de grano - grueso es predominantemente grava. Por ejemplo arcilla arenosa de baja compresibilidad, CL; arcilla gravosa de alta compresibilidad, CH; limo arenoso, ML. Si el porcentaje de arena es igual al porcentaje de grava utilizar "arenoso".

### 3.1.4.2.3 Procedimiento de clasificación para suelos de granos – gruesos

1. Clasificar el suelo como grava si más del 50% de la fracción gruesa (arriba del tamiz N°200) es retenida en el tamiz N°4.
2. Clasificar el suelo como arena si el 50% o más de la fracción gruesa (arriba del tamiz N°200) pasa el tamiz N°4.
3. Si el 12% ó menos del espécimen de ensayo pasa el tamiz N°200, graficar la distribución de tamaño de las partículas (porcentaje que pasa versus tamaño de partículas), y calcular el coeficiente de uniformidad,  $C_u$ , y el coeficiente de curvatura,  $C_c$ , con las ecuaciones 2.1 y 2.2.

**Nota:** Puede ser necesario extrapolar la curva para obtener el diámetro D10.

4. Si menos del 5% del espécimen de ensayo pasa el tamiz N°200, clasificar el suelo como una grava bien – graduada, GW, o arena bien – graduada, SW, si el  $C_u$  es mayor o igual a 4 para gravas o mayor que 6 para arenas, y el  $C_c$  es al menos 1 pero no más de 3.
5. Si menos del 5% del espécimen de ensayo pasa el tamiz N°200, clasificar el suelo como grava pobremente graduada, GP o arena pobremente graduada, SP, si el criterio del  $C_u$  o el  $C_c$  para suelos bien – graduados no se satisface.
6. Si más del 12% del espécimen de ensayo pasa el tamiz N°200, el suelo será considerado un suelo de grano - grueso con finos. Los finos se consideran arcillosos o limosos basándose en la gráfica del índice de plasticidad versus el índice líquido en la fig.2.3.
7. Clasificar el suelo como una grava arcillosa, GC, o arena arcillosa, SC, si los finos son arcillosos, es decir, la posición de la gráfica del índice de plasticidad versus el límite

líquido, ver fig.2.3, cae sobre o por encima de la línea “A” y el índice de plasticidad es mayor que 7.

8. Clasificar el suelo como una grava limosa, GM, o arena limosa, SM, si los finos son limosos, es decir, la posición de la gráfica del índice de plasticidad versus el límite líquido, ver fig.2.3 cae por debajo de la línea “A” o el índice de plasticidad es menor que 4.

9. Si los finos se grafican como una arcilla limosa, CL – ML, clasificar el suelo como una grava arcillosa, limosa, GC – GM, si es una grava o una arena arcillosa, limosa, SC – SM, si es una arena.

10. Si del 5% al 12% del espécimen de ensayo pasa por el tamiz N°200, dar al suelo una clasificación doble, usando símbolos de doble grupo.

11. El símbolo del primer grupo corresponderá a aquel que para una grava o una arena tenga menos del 5% de finos (GW, GP, SW y SP), y el segundo símbolo corresponderá a una grava o una arena que tenga más del 12% de finos (GC, GM, SC, SM).

12. El nombre del grupo corresponderá al símbolo del primer grupo más las palabras “con arcilla” o “con limos” para indicar las características plásticas de los finos. Por ejemplo, grava bien – graduada con arcilla, GW – GC; arena pobremente graduada con limo, SP – SM.

**Nota:** Si los finos se grafican como una arcilla limosa, CL – ML, el símbolo del segundo grupo debería ser GC ó SC. Por ejemplo, una arena pobremente graduada con 10% de finos, un límite líquido de 20, y un índice de plasticidad de 6 sería clasificada como una arena pobremente graduada con arcilla limosa, SP – SC.

13. Si el espécimen es predominantemente arena o grava, pero contiene 15% ó más de la otra porción de grano – grueso que lo constituye, las palabras “con grava” o “con

arena" serán añadidas al nombre de grupo. Por ejemplo, grava pobremente graduada con arena, arena arcillosa con grava.

14. Si la muestra de campo contenía cualquier canto rodado, la palabra "con cantos rodados" será añadida al nombre del grupo. Por ejemplo, grava limosa con cantos rodados GM.

### **3.1.5 Características de los suelos compactados en el laboratorio utilizando el esfuerzo modificado. Designación ASTM D 1557.**

Según la norma existen 3 métodos de ensayo para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario de los suelos compactados en un molde de un tamaño dado con un martillo de 10 lb que cae desde una altura de 18". Dichos métodos están en dependencia del tamaño del material y el diámetro del molde.

Método A.- Un molde de diámetro 4": material de suelo que pasa un tamiz No.4. Compactación en 5 capas. Energía de 25 golpes por capa.

Método B.- Un molde de diámetro 4": material de suelo que pasa tamiz de 3/8". Compactación en 5 capas. Energía de 25 golpes por capa.

Método C.- Un molde de diámetro 6": material de suelo que pasa tamiz de 3/4". Compactación en 5 capas. Energía de 56 golpes por capa.

En este estudio se utilizó el método C, en el cual se emplea un molde con diámetro 6" y material de suelo que pasa el tamiz de 3/4".

#### **3.1.5.1 Aparatos**

- Moldes cilíndricos metálicos con un diámetro de 6", altura de 4.58" y con un conjunto de collar ajustable aproximadamente de 2 3/8" de altura, que permita la preparación de muestras compactadas de mezclas de suelo con agua de la altura y volumen deseado.

- Martillo operado manualmente que tenga una cara plana circular de 2" de diámetro, un peso de 10 lb y un tubo guía que controle la altura de la caída del golpe desde una altura libre de 18" por encima de la altura del suelo.
- Dispositivo para extrusión de las muestras.
- Balanzas y básculas, de 11.5 kg como mínima capacidad, cuando se usan para pesar moldes de 6" con suelos húmedos compactados.
- Horno capaz de mantener una temperatura de  $110 \pm 5$  °C.
- Regla de acero endurecido, de borde recto y biselado, al menos de 10" de largo (usada para el corte final del suelo).
- Tamices de interés
- Herramientas misceláneas para mezclado tales como cucharas, espátulas, cazuelas, etc.
- Recipientes elaborados de metal u otro material adecuado para determinar la humedad de las muestras.

### **3.1.5.2 Procedimiento**

1. Se escoge una muestra representativa de suelo de aproximadamente 11 kg. Dicha muestra se debe secar, si está húmeda, hasta que se note friable al introducir en ella una espátula. El secamiento puede efectuarse al aire, o mediante el uso del horno, siempre que la temperatura no exceda de 60 °C. Luego, se rompen los terrones, pero de tal manera que se evite la reducción del tamaño natural de las partículas individuales. Se tamiza una cantidad representativa de suelo pulverizado sobre el tamiz de 3/4". Se descarta el material retenido sobre dicho tamiz.
2. Se mezcla completamente la muestra seleccionada con suficiente agua para humedecerla hasta aproximadamente 4 puntos de porcentaje por debajo del contenido óptimo de humedad.
3. Se prepara una muestra mediante compactación del suelo humedecido en el molde 6" de diámetro (con el collar ajustado) en cinco capas aproximadamente iguales que den una altura total de material compactado de alrededor de 5". Se debe compactar

cada capa mediante 56 golpes uniformemente distribuidos y dados por el martillo de caída libre desde una altura de 18" por encima de la altura aproximada de cada capa finalmente compactada. Durante la compactación, el molde deberá permanecer firmemente apoyado sobre un soporte estable, denso, uniforme y rígido.

4. Después de la compactación, se remueve el collar de extensión, se recorta cuidadosamente el suelo excedente compactado en la parte superior del molde utilizando la regla con borde recto. Los huecos que se hayan formado en la superficie por la remoción de material grueso se deben rellenar con material de tamaño más pequeño. Se pesa el molde y el suelo húmedo en kg con aproximación de 5 g; (o en libras con aproximación a 0.01 lb).

5. Sacar el material del molde y cortarlo verticalmente por el centro con el objeto de tomar una muestra representativa del material de una de las caras del corte, se pesa inmediatamente, se seca en el horno a  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  por lo menos durante 12 horas o hasta obtener un peso constante, para determinar el contenido de humedad. La muestra para esta determinación no deberá ser menor de 500 g.

6. Romper completamente la cantidad restante del material hasta cuando se considere que pasa el tamiz de 3/4" y para el cual el 90 % de los agregados de suelo pasan el tamiz N°4 a ojo y agregarlo a la parte restante de la muestra que se va a ensayar. Añadir agua en cantidad suficiente para aumentar la humedad de la muestra en uno o dos puntos de porcentaje, y repetir el procedimiento anterior para cada incremento de agua. Se debe proseguir con esta serie de determinaciones hasta cuando disminuya o no cambie el peso húmedo, en  $\text{kg}/\text{m}^3$  o  $\text{lb}/\text{pie}^3$  del suelo compactado.



### 3.1.5.3 Cálculo

Las humedades de compactación y las respectivas densidades secas obtenidas, se determinan de la siguiente manera:

Con los datos obtenidos del peso de la muestra húmeda y posteriormente pesada luego de ser secada en el horno se encuentra la humedad de cada muestra compactada mediante la expresión:

$$\text{Humedad} = \frac{(\text{Peso del Recipiente} + \text{Suelo Húmedo}) - (\text{Peso del Recipiente} + \text{Suelo Seco})}{(\text{Peso del Recipiente} + \text{Suelo Seco}) - (\text{Peso del Recipiente})}, \text{ ecuación.....(3.8)}$$

Este procedimiento se repite para cada uno de los ensayos, luego se calcula la densidad húmeda:

$$\text{Densidad Húmeda} = \frac{\text{Peso de la Muestra Compacta}}{\text{Volumen de la Muestra Compacta}}, \text{ ecuación.....(3.9)}$$

Luego del cálculo de la densidad húmeda, se calcula la densidad seca:

$$\text{Densidad Seca} = \frac{\text{Densidad Húmeda}}{1 + \frac{\text{Humedad}}{100}}, \text{ ecuación.....(3.10)}$$

El procedimiento se repite para cada una de las muestras compactadas, obteniéndose al final una serie de pares de valores “humedad de compactación” contra “densidad seca”, los cuales se representan en una curva cuyo punto máximo representa la máxima densidad seca del material en cuestión y su respectiva prolongación al otro eje de coordenadas representa la humedad óptima del material para el cual éste alcanza dicha densidad.

### 3.1.6 Ensayo de CBR (California Bearing Ratio) de suelos compactados en el laboratorio. Designación ASTM D 1883.

#### 3.1.6.1 Objeto y definición

Esta norma describe el procedimiento de ensayo para la determinación de un índice de resistencia de los suelos denominado valor de la relación de soporte, que es muy conocido debido a su origen, como CBR (California Bearing Ratio).

La finalidad de este ensayo, es determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de compactación variables. Es un método desarrollado por la división de carreteras del Estado de California (EE.UU.) y sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para sub-rasante, sub-base y base de pavimentos.

La expresión que define al CBR, es la siguiente:

$$\text{CBR} = \frac{\text{Carga unitaria del ensayo}}{\text{Carga unitaria patrón}} * 100, \text{ ecuación.....(3.11)}$$

De la ecuación se puede ver que el número CBR, es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica el símbolo de (%) se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero. Usualmente el número CBR, se basa en la relación de carga para una penetración de 2,54 mm (0,1"), sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5.08 mm (0,2") es mayor, el ensayo debe repetirse. Si en un segundo ensayo se produce nuevamente un valor de CBR mayor a 5.08 mm de penetración, dicho valor será aceptado como valor del ensayo. Los ensayos de CBR se hacen sobre muestras compactadas con un contenido de humedad óptimo, obtenido del ensayo de compactación Proctor.

En general se confeccionan 3 probetas como mínimo, las que poseen distintas energías de compactación (lo usual es con 56, 25 y 10 golpes). El suelo al cual se aplica el

ensayo, debe contener una pequeña cantidad de material que pase por el tamiz de 2" y quede retenido en el tamiz de ¾". Se recomienda que esta fracción no exceda del 20%.

### 3.1.6.2 Aparatos

- Prensa similar a las usadas en ensayos de compresión, utilizada para forzar la penetración de un pistón en el espécimen.
- Moldes metálicos cilíndricos y martillos de compactación Proctor.
- Disco espaciador metálico de forma circular con diámetro de 6" y 2" de espesor, para insertarlo como falso fondo en el molde cilíndrico durante la compactación.
- Sobrecargas metálicas, una anular y las restantes ranuradas, con peso de 5 lb cada una, 149.2 mm de diámetro exterior y la anular con 54 mm de diámetro en el orificio central.
- Pistón de penetración, cilíndrico, metálico de 1,95" de diámetro, área de 3 pulg<sup>2</sup> y con longitud necesaria para realizar el ensayo de penetración con las sobrecargas precisas, pero nunca de tamaño menor de 4".
  - Dos diales (deformímetros) con recorrido mínimo de 25 mm (1") y divisiones en 0.025 mm (0.001"), uno de ellos provisto de una pieza que permita su acoplamiento en la prensa para medir la penetración del pistón en la muestra.
- Horno capaz de mantener temperaturas de 105 ± 5°C.
- Balanzas.
- Tamices, de 4.75 mm (No.4) y de 19.0 mm (¾").
- Material diverso de uso general como cuarteador, mezclador, cápsulas, probetas, espátulas, discos de papel de filtro del diámetro del molde, etc.

### 3.1.6.3 Procedimiento

Este procedimiento es tal que los valores de la relación de soporte se obtienen a partir de especímenes de ensayo que posean el mismo peso unitario y contenido de agua que se espera encontrar en el terreno. En general, la condición de humedad crítica (más desfavorable) se tiene cuando el material está saturado. Por esta razón, el método contempla el ensayo de los especímenes después de estar sumergidos en agua por un

período de cuatro (4) días confinados en el molde con una sobrecarga igual al peso del pavimento que actuará sobre el material.

1. Se escoge una muestra representativa de suelo de aproximadamente 11 kg. Dicha muestra se debe secar, si está húmeda, hasta que se note friable al introducir en ella una espátula. El secamiento puede efectuarse al aire, o mediante el uso del horno, siempre que la temperatura no exceda de 60 °C. Luego, se rompen los terrones, pero de tal manera que se evite la reducción del tamaño natural de las partículas individuales. Se tamiza una cantidad representativa de suelo pulverizado sobre el tamiz de 3/4". Se descarta el material retenido sobre dicho tamiz. Cuando más del 75 % en peso de la muestra pase por el tamiz de 3/4", se utiliza para el ensayo el material que pasa por dicho tamiz. Cuando la fracción de la muestra retenida en el tamiz de 3/4" sea superior a un 25% en peso, se separa el material retenido en dicho tamiz y se sustituye por una proporción igual de material comprendido entre los tamices de 3/4" y N°4, obtenida tamizando otra porción de la muestra.

De la muestra así preparada se toma la cantidad necesaria para el ensayo de apisonado, más unos 5 kg por cada molde CBR.

2. Se determina la humedad óptima y la densidad máxima por medio del ensayo de compactación elegido. Se compacta un número suficiente de especímenes con variación en su contenido de agua, con el fin de establecer definitivamente la humedad óptima y el peso unitario máximo. Dichos especímenes se preparan con diferentes energías de compactación. Normalmente, se usan la energía del Proctor Normal, la del Proctor modificado y una energía inferior al Proctor Normal. De esta forma, se puede estudiar la variación de la relación de soporte con estos dos factores que son los que la afectan principalmente. Los resultados se grafican en un diagrama de contenido de agua contra peso unitario.

3. Se toma una muestra representativa del material de una de las caras de la mezcla compactada, se pesa inmediatamente, se seca en el horno a  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  por lo menos

durante 12 horas o hasta obtener un peso constante, para determinar el contenido de humedad. La muestra para esta determinación no deberá ser menor de 500 g.

4. Conocida la humedad natural del suelo, se le añade la cantidad de agua que le falte para alcanzar la humedad fijada para el ensayo, generalmente la óptima determinada según el ensayo de compactación elegido y se mezcla íntimamente con la muestra.

5. Los moldes se preparan pesando el molde con su base, se coloca el collar y el disco espaciador y, sobre éste, un disco de papel de filtro grueso del mismo diámetro. Una vez preparado el molde, se compacta el espécimen en su interior, aplicando un sistema dinámico de compactación Proctor Normal o Modificado, pero utilizando en cada molde la proporción de agua y la energía (número de capas y de golpes en cada capa) necesarias para que el suelo quede con la humedad y densidad deseadas. Es frecuente utilizar tres o nueve moldes por cada muestra, según la clase de suelo granular o cohesivo, con grados diferentes de compactación. Para suelos granulares, la prueba se efectúa dando 56, 25 y 10 golpes por capa y con contenido de agua correspondiente a la óptima. Para suelos cohesivos interesa mostrar su comportamiento sobre un intervalo amplio de humedades. Las curvas se desarrollan para 56, 25 y 10 golpes por capa, con diferentes humedades, con el fin de obtener una familia de curvas que muestran la relación entre densidad, humedad y relación de capacidad de soporte.

6. Terminada la compactación, se quita el collar y se enrasa el espécimen utilizando el enrasador. Cualquier hueco superficial producido al eliminar partículas gruesas durante el enrase, se rellena con material sobrante sin gruesos, comprimiéndolo con la espátula. Se desmonta el molde y se vuelve a montar invertido, sin disco espaciador, colocando un papel de filtro entre el molde y la base. Seguidamente se pesa.

7. Se coloca sobre la superficie de la muestra invertida la placa perforada con vástago, y, sobre ésta, los anillos necesarios para completar una sobrecarga tal, que produzca una presión equivalente a la originada por todas las capas de materiales que hayan de ir encima del suelo que se ensaya, la aproximación quedará dentro de las 5 lb correspondientes a una pesa. En ningún caso, la sobrecarga total será menor de 10 lb.

8. Se sumerge el molde en el tanque con la sobrecarga colocada dejando libre acceso al agua por la parte inferior y superior de la muestra. Se mantiene la probeta en estas condiciones durante 96 horas (4 días) con el nivel de agua aproximadamente constante. Es admisible también un periodo de inmersión más corto si se trata de suelos granulares que se saturan de agua rápidamente y si los ensayos muestran que esto no afecta los resultados.

9. Después del período de inmersión se saca el molde del tanque y se vierte el agua retenida en la parte superior del mismo, sosteniendo firmemente la placa y sobrecarga en su posición. Se deja escurrir el molde durante 15 minutos en su posición normal y a continuación se retira la sobrecarga y la placa perforada. Inmediatamente, se pesa y se procede al ensayo de penetración según el proceso del numeral siguiente. Es importante que no transcurra más tiempo que el indispensable desde cuando se retira la sobrecarga hasta cuando vuelve a colocarse para el ensayo de penetración.

10. Se aplica una sobrecarga que sea suficiente para producir una intensidad de carga igual al peso del pavimento, pero no menor de 10 lb. Para evitar el empuje hacia arriba del suelo dentro del agujero de las pesas de sobrecarga, es conveniente asentar el pistón luego de poner la primera sobrecarga sobre la muestra. Se lleva el conjunto a la prensa, se coloca en el orificio central de la sobrecarga anular el pistón de penetración y se añade el resto de la sobrecarga si hubo inmersión, hasta completar la que se utilizó en ella.

11. Se monta el dial medidor de manera que se pueda medir la penetración del pistón y se aplica una carga de 50 N (5 kgf) para que el pistón asiente. Seguidamente, se sitúan en cero las agujas de los diales medidores, el del anillo dinamométrico, u otro dispositivo para medir la carga, y el de control de la penetración. Para evitar que la lectura de penetración se vea afectada por la lectura del anillo de carga, el control de penetración deberá apoyarse entre el pistón y la muestra o molde.

12. Se aplica la carga sobre el pistón de penetración mediante el mecanismo correspondiente de la prensa, con una velocidad de penetración uniforme de

1.27mm/min. Se anotan las lecturas de la carga para las siguientes penetraciones descritas en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Lecturas de penetración para la aplicación de cargas del ensayo CBR

Unidades	Lectura de penetración									
<b>Mm</b>	0.63	1.27	1.90	2.54	3.17	3.81	5.08	7.62	10.16	12.70
<b>Pulg</b>	0.025	0.050	0.075	0.100	0.125	0.150	0.200	0.300	0.400*	0.500*

\* Estas lecturas se hacen si se desea definir la forma de la curva, pero no son indispensables.

13. Finalmente, se desmonta el molde y se toma de su parte superior, en la zona próxima donde se hizo la penetración, una muestra para determinar su humedad.

### 3.1.6.4 Cálculo

#### 3.1.6.4.1 Densidad seca

Se determina la densidad seca de las muestras compactadas con la humedad óptima y con 56, 25 y 10 golpes por capa.

Las densidades secas de las muestras compactas para cada energía de compactación se calculan de la siguiente manera:

$$\text{Humedad} = \frac{(\text{Peso del Recipiente} + \text{Suelo Húmedo}) - (\text{Peso del Recipiente} + \text{Suelo Seco})}{(\text{Peso del Recipiente} + \text{Suelo Seco}) - (\text{Peso del Recipiente})}, \text{ ecuación...}(3.12)$$

Teniendo el cálculo de la humedad, se procede al cálculo de las densidades:

$$\text{Densidad Húmeda} = \frac{\text{Peso de la Muestra Compacta}}{\text{Volumen de la Muestra Compacta}}, \text{ ecuación.....}(3.13)$$

$$\text{Densidad Seca} = \frac{\text{Densidad Húmeda}}{1 + \frac{\text{Humedad}}{100}}, \text{ ecuación.....}(3.14)$$

### 3.1.6.4.2 Índice de resistencia CBR

Se llama valor de la relación de soporte (índice CBR), al tanto por ciento de la presión ejercida por el pistón sobre el suelo, para una penetración determinada, con relación a la presión correspondiente a la misma penetración en una muestra patrón. Las características de la muestra patrón se presentan en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Características de esfuerzo – penetración de la muestra patrón - CBR

Penetración		Esfuerzo		
Mm	Pulgadas	MN/m <sup>2</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>	lb/plg <sup>2</sup>
<b>2.54</b>	0.1	6.90	70.31	1,000
<b>5.08</b>	0.2	10.35	105.46	1,500

Para calcular el índice CBR se procede como sigue:

1. Se dibuja una curva que relacione los esfuerzos (ordenadas) y las penetraciones (abscisas), y se observa si esta curva presenta un punto de inflexión. Si no presenta punto de inflexión se toman los valores correspondientes a 2,54 y 5,08 mm (0,1" y 0,2") de penetración. Si la curva presenta un punto de inflexión, la tangente en ese punto cortará el eje de abscisas en otro punto, (cero corregido), que se toma como nuevo origen para la determinación de los esfuerzos correspondientes a 2,54 y 5,08 mm.
2. De la curva corregida se toman los valores de esfuerzo-penetración para los valores de 2.54 mm y 5.08 mm y se calculan los valores de CBR correspondientes, dividiendo los esfuerzos corregidos por los esfuerzos de referencia 6.9 MPa (1000lb/plg<sup>2</sup>) y 10.3 MPa (1500 lb/plg<sup>2</sup>) respectivamente, y multiplíquese por 100. El valor CBR reportado para el suelo es normalmente el de 2.54 mm (0.1") de penetración. Cuando el CBR a 5.08 mm (0.2") de penetración resulta ser mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado similar, se usa el CBR para 5.08 mm (0.2") de penetración.



### 3.1.7 Resultados

Las hojas de resultados de cada uno de los ensayos de laboratorio utilizados para la caracterización del material en estudio se presentan en el anexo 1 de este documento. A continuación se muestra un cuadro de resumen en el cual se plasman los resultados de los ensayos de laboratorio.

Tabla 3.6 Resumen de ensayos de laboratorio

Banco de materiales "Material de Celda" - Mina Orosi, La Libertad, Chontales.			
Ensayo		Resultado	
Distribución granulométrica	Grava		18%
		Gruesa	7%
	Arena, 30%	Media	11%
		Fina	12%
	Limo/Arcilla		52%
Límites de Consistencia	Límite líquido		42,30%
	Límite plástico		30,00%
	Índice de Plasticidad		12,30%
Clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)		ML	
Densidad Seca Máxima aplicando el Esfuerzo Modificado		2,04 gr/cm <sup>3</sup>	
Humedad óptima aplicando el Esfuerzo Modificado		11,40%	
Valor CBR de laboratorio	10 golpes		4,00%
	25 golpes		6,35%
	56 golpes		8,95%

Según los resultados del análisis granulométrico y los límites de consistencia el suelo se clasifica como ML en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (tabla A.4.1, anexo 4). El suelo se puede describir como un limo arenoso de compacidad media a alta.

En el anexo A.1.5, se presentan los resultados del ensayo CBR. Aquí se puede observar que, para cada espécimen, el valor CBR obtenido a 0.2" de penetración resultó mayor que el valor obtenido a 0.1". Debido a esto, se procedió a realizar un segundo ensayo, ver anexo A.1.6, en el cual se obtuvieron resultados similares, lo que

indica que el suelo se comporta de tal forma que los mayores valores de CBR se dan a 0.2" de penetración.

En general, se puede decir que el valor promedio del CBR del suelo es del 6% en su densidad seca máxima y humedad óptima, obtenidas al aplicar el esfuerzo modificado, con valores de 2.04 gr/cm<sup>3</sup> y 11.40% respectivamente.

### **3.2 Ensayos de correlación - regresión**

Los ensayos que se ejecutaron para generar las variables necesarias para el estudio estadístico de correlación-regresión fueron:

- Características de los suelos compactados en el laboratorio utilizando el esfuerzo modificado para obtener densidades y humedades.
- Valor CBR de laboratorio
- Valor Impacto de Clegg (VIC) utilizando el Martillo Clegg.

Los procedimientos que se siguieron para obtener las variables arriba mencionadas, son los mismos descritos en las normas ASTM, revisión anual 2007, con algunas modificaciones en lo referente a los ensayos de compactación con el esfuerzo modificado y valor CBR de laboratorio. Se debe mencionar que el procedimiento que se empleó para ejecutar el ensayo de Valor Impacto de Clegg (VIC), es el descrito en el capítulo 2 y proporcionado por el fabricante del Martillo de Clegg. Sin embargo, el procedimiento para ejecutar éste ensayo está normado por la ASTM, pero no se pudo tener acceso a dicho procedimiento.

Las variantes que se aplicaron en los ensayos de compactación y de valor CBR de laboratorio fueron las siguientes:

- Se varió la energía de compactación en la fabricación de los especímenes de suelo con la finalidad de obtener una variedad de densidades en diferentes estados de humedad,

sin tener como objetivo el cálculo de la densidad seca máxima y humedad óptima del material.

- Los ensayos de CBR de laboratorio se efectuaron en especímenes sin saturar y sin sobrecargas, esto debido a que los valores que se pretendían obtener no tenían como propósito definir un valor CBR para diseño, sino generar una serie de valores CBR correspondientes a determinadas densidades.

### **3.2.1 Objeto**

La finalidad de estos ensayos fue la obtención de 4 propiedades del suelo en estudio: densidad seca, humedad, valor CBR y valor impacto de Clegg (VIC); las cuales fueron utilizadas para el posterior análisis estadístico de correlación-regresión.

### **3.2.2 Aparatos**

Se utilizaron los mismos equipos descritos en el ensayo valor CBR de laboratorio. Además, se utilizó el equipo Martillo Clegg, modelo H-4190 fabricado por Humboldt Mfg.Co.

### **3.2.3 Procedimiento**

1. Se escogió una muestra representativa de suelo de aproximadamente 10 kg. Dicha muestra se dejó secar hasta notarse friable al introducir en ella una espátula. El secamiento se realizó mediante el uso del horno con temperatura no mayor 60 °C. Luego, se rompieron los terrones que se formaron, evitando la reducción del tamaño natural de las partículas individuales. Se tamizó una cantidad representativa de suelo pulverizado sobre el tamiz de 3/4". Se descartó el material retenido sobre dicho tamiz.

2. De la muestra retenida en el tamiz de 3/4" se escogieron 9kg del material seco y se añadieron 540gr de agua para llevar a la muestra a un contenido de humedad teórico del 6%. Se mezcló completamente la muestra hasta quedar visualmente homogénea.

3. Se fabricó un espécimen mediante compactación del suelo con el martillo de 4.5kg en el molde CBR de 6" de diámetro (con el collar ajustado) en cinco capas aproximadamente iguales. Se compactó cada capa mediante 30 golpes uniformemente distribuidos y dados por el martillo de caída libre desde una altura de 18" por encima de la altura aproximada de cada capa finalmente compactada.

4. Después de la compactación, se removió el collar de extensión, se enrazó cuidadosamente el suelo excedente compactado en la parte superior del molde utilizando una regla con borde recto. Los huecos que se formaron en la superficie por la remoción de material grueso se rellenaron con material de tamaño más pequeño. Se pesó el molde y el suelo húmedo.

5. Se llevó el molde a la máquina de CBR donde se le aplicaron y anotaron cargas según ASTM D 1883.

7. Después de retirar el molde de la máquina, éste fue removido del plato base y colocado de nuevo de manera invertida, de tal forma que la superficie recién ensayada quedara en la parte inferior del molde.

8. Se colocó el Martillo de Clegg sobre la superficie del espécimen ubicada en la parte superior del molde y que aún permanecía inalterada. Se encendió el dispositivo lector y se levantó el martillo hasta la línea de referencia, ubicada a una altura de 18" sobre la base del martillo.

9. Se dejó caer el martillo sobre la superficie del espécimen y se anotó la primera lectura del VIC. Se levantó y se dejó caer el martillo 4 veces más y se anotaron las lecturas del VIC para cada golpe realizado.

10. Se colocó el molde en el extractor de muestras, se extrajo el espécimen y se puso sobre una charola. Finalmente, se partió el espécimen a la mitad y se tomó una muestra para el cálculo de la humedad.

11. El material restante se disgregó en la charola hasta que se consideró que éste pasaba el tamiz de 3/4" y se le agregó la parte restante de la muestra a ensayar.

12. Se repitieron los pasos del 3 al 11 para fabricar especímenes con energías de 40, 50, 60 y 70 golpes.

13. Se repitieron los pasos del 1 al 12 para fabricar especímenes con contenidos de humedad teóricos del 9%, 11.40% y 12%.

### 3.2.4 Cálculos

- Las fórmulas utilizadas para el cálculo de la densidad seca, humedad y valor CBR son las mismas descritas en los ensayos de caracterización.
- Se tomó como Valor Impacto de Clegg (VIC) la lectura al quinto golpe del ensayo.

### 3.2.5 Resultados

Las hojas de resultados de cada uno de los ensayos de laboratorio utilizados para la obtención de las variables a correlacionar se presentan en el anexo 2 de este documento. A continuación se muestran tablas de resumen, en las cuales se plasman los resultados de los ensayos de laboratorio.

Tabla 3.7 Resumen de ensayos de laboratorio – Humedad teórica del 6%

ENSAYOS					
Espécimen ID	No de golpes Martillo Proctor	Humedad (%)	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	VIC (al 5to golpe) (g)	Valor CBR (%)
1	30	7,38	1,895	32,8	64,3
2	40	7,55	1,936	35,7	77,73
3	50	7,77	1,969	36,8	112,85
4	60	7,15	2,001	37,7	114,65
5	70	7,19	2,015	42,9	140,63

Tabla 3.8 Resumen de ensayos de laboratorio – Humedad teórica del 9%

ENSAYOS					
Espécimen ID	No de golpes Martillo Proctor	Humedad (%)	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	VIC (al 5to golpe) (g)	Valor CBR (%)
1	30	11.01	1,914	21,70	38,07
2	40	10.87	1,979	24,30	53,80
3	50	10.98	2,017	23,50	55,49
4	60	10.93	2,017	23,60	56,95
5	70	10.87	2,026	24,00	65,24

Tabla3.9 Resumen de ensayos de laboratorio – Humedad teórica del 11.40%

ENSAYOS					
Espécimen ID	No de golpes Martillo Proctor	Humedad (%)	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	VIC (al 5to golpe) (g)	Valor CBR (%)
1	30	13,04	1,886	19,60	39,57
2	40	12,20	1,925	20,80	45,81
3	50	12,34	1,956	18,80	50,11
4	60	12,35	1,970	18,30	44,51
5	70	11,75	2,012	21,50	46,61

Tabla 3.10 Resumen de ensayos de laboratorio – Humedad teórica del 12%

ENSAYOS					
Espécimen ID	No de golpes Martillo Proctor	Humedad (%)	Densidad seca (gr/cm <sup>3</sup> )	VIC (al 5to golpe) (g)	Valor CBR (%)
1	30	14,07	1,875	8,30	11,94
2	40	14,90	1,904	7,70	8,37
3	50	14,69	1,910	7,50	8,19
4	60	14,07	1,925	7,70	5,15
5	70	14,04	1,934	8,60	8,45

En las tablas arriba presentadas, se puede observar la variación de la humedad del suelo respecto a la humedad teórica. Esto se pudo haber dado, posiblemente, a que la muestra, después de sacada del horno y dejarse enfriar, haya absorbido humedad del ambiente. Otra posible causa pudo haber sido a que la homogenización o mezclado del material, después de añadir el agua a la muestra, no es un proceso de gran precisión, ya que el agua que se añade muy difícilmente se distribuye de manera uniforme.

También se puede ver como varía la densidad seca del suelo al aumentar la energía de compactación a un contenido de humedad aproximadamente igual. Además, la variación de dicha densidad a diferentes contenidos de humedad y una misma energía de compactación. En la tabla 3.8 se observa que el suelo alcanza sus mayores densidades a contenidos de humedad muy cercanos al óptimo (11.40%).

Los resultados reflejan que, en general, el VIC y el CBR son afectados por el aumento del contenido de agua presente en el suelo. Los mayores valores de CBR y VIC, 140.63 % y 42.9 g respectivamente, se presentan a bajos contenidos de agua. Es interesante notar que los valores de VIC y CBR, los cuales son propiedades mecánicas, no presentan sus valores pico en la mayor densidad seca alcanzada por el suelo.

En las hojas de resultados presentadas en el anexo 2 se puede notar que el Valor Impacto de Clegg se estabiliza en el quinto golpe, cuya lectura se toma como el valor de impacto del espécimen ensayado.

Según lo observado en las tablas de resultados, las propiedades VIC, CBR y densidad se comportan, en general, de manera uniforme cuando se determinan en especímenes fabricados con la misma energía y a diferentes contenidos de humedad; sin embargo, se debe señalar que se presentaron algunos casos aislados (ver tablas de resultados) en los cuales no se presentó dicha uniformidad. Este comportamiento se ve mayormente afectado cuando el suelo presenta contenidos de humedad mayores al óptimo. Esto se debe a que los suelos con características plásticas pronunciadas (como el suelo en estudio), al aplicarles energía con contenidos de humedad mayores al óptimo se deforman (no se compactan) y sus propiedades pasan a comportarse erráticamente. Esto se puede ver de forma más clara en las gráficas que se realizaron para presentar el comportamiento de las propiedades determinadas en los ensayos realizados. Dichas gráficas se presentan en el anexo 3 de este documento.

#### 4. MÉTODO ESTADÍSTICO

El estudio de la relación que puede existir entre 2 ó más variables involucra la aplicación de métodos estadísticos que ayuden a determinar el grado de interconexión que exista entre dichas variables.

Las técnicas correlación y regresión son parte de las ciencias estadísticas que son muy utilizadas en las investigaciones de carácter científico y que, en conjunto, constituyen una herramienta muy útil cuando se trata de relacionar 2 ó más variables. <sup>(21)</sup>

La aplicación de las técnicas de regresión y correlación implica la adopción de uno de los dos niveles acordados en las ciencias investigativas: <sup>(8)</sup>

1. *El nivel de significancia del 0.05*, el cual implica que el investigador tiene un 95% de seguridad para generalizar sin equivocarse, y sólo un 5% en su contra. En términos de probabilidad, 0.95 y 0.05 respectivamente, ambos suman la unidad.
2. *El nivel de significación del 0.01*, el cual implica que el investigador tiene un 99% en su favor para generalizar sin temor y un 1% en contra (0.99 y 0.01).

En ocasiones el nivel de significancia o nivel alfa (nivel  $\alpha$ ) puede ser todavía más exigente (ejemplo, 0.001,0.00001) y confiable. Pero lo mínimo es el 0.05, no se acepta un nivel de 0.06 (94% a favor de la generalización confiable). Porque se busca hacer ciencia, no intuición. El nivel de significancia es un valor de certeza que fija el investigador “a priori”. <sup>(8)</sup>



## 4.1 Correlación y Regresión

### 4.1.2 Correlación

La correlación es un método estadístico el cual intenta determinar *con qué precisión* describe o explica la relación entre variables una ecuación lineal o de cualquier otro tipo. <sup>(18)</sup>

La medida más habitualmente utilizada para el estudio de la correlación entre dos variables es el coeficiente de correlación lineal de Pearson. Este tipo de relaciones puede ilustrarse de forma gráfica, o bien, como sucede casi siempre, calcularse a través de la realización de una prueba que defina la magnitud de esa relación. <sup>(31)</sup>

#### 4.1.2.1 Coeficiente de correlación lineal de Pearson

El coeficiente de Pearson mide el grado de asociación lineal entre dos variables cualesquiera, y puede calcularse dividiendo la covarianza de ambas entre el producto de las desviaciones típicas de las dos variables. <sup>(30)</sup> Está dado por la siguiente ecuación:

$$-1 \leq r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{S_X * S_Y} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)}{n}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}}} * \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{n}} \leq +1, \text{ ecuación.....(4.1)}$$

Donde:

Cov(X, Y) = covarianza de las dos variables en estudio

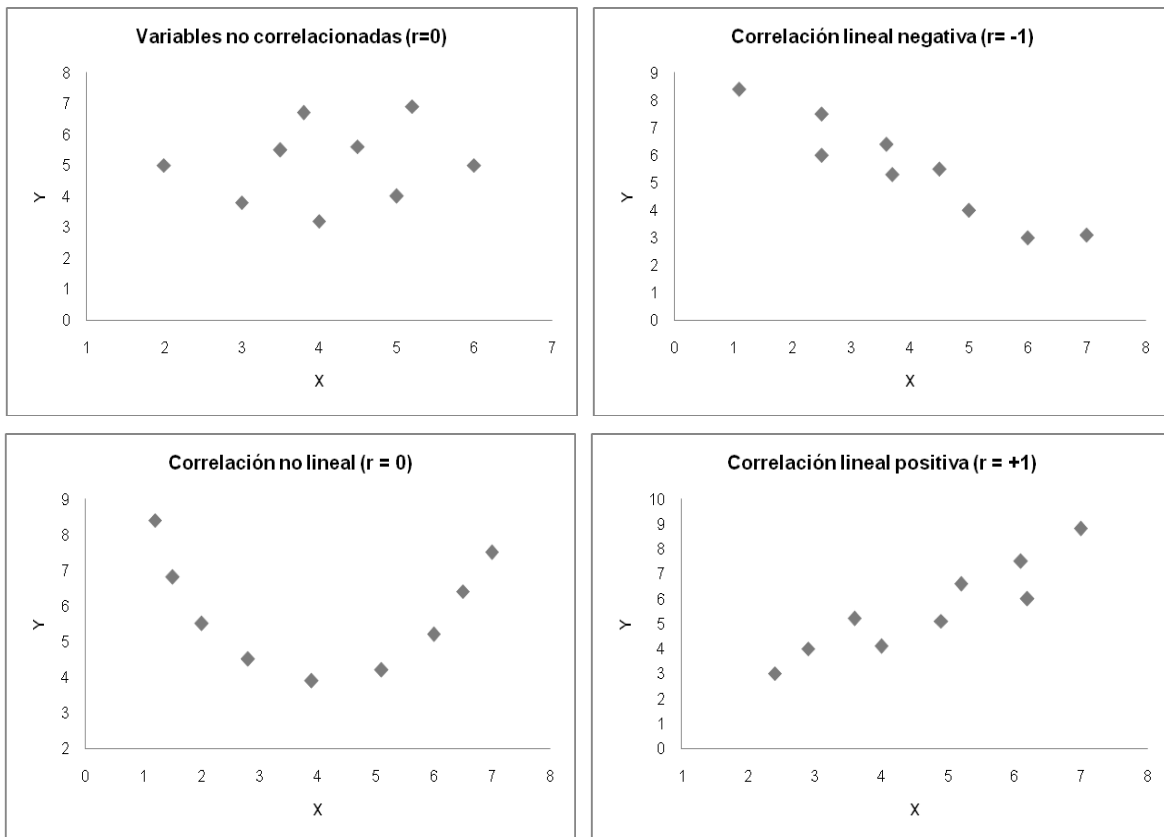
$S_X$  = desviación estándar de X

$S_Y$  = desviación estándar de Y

Para un conjunto de datos, el valor  $r$  de este coeficiente puede tomar cualquier valor entre  $-1$  y  $+1$ . El valor de  $r$  será positivo si existe una relación directa entre ambas variables, esto es, si las dos aumentan al mismo tiempo. Será negativo si la relación es inversa, es decir, cuando una variable disminuye a medida que la otra aumenta. Un valor de  $+1$  ó  $-1$  indicará una relación lineal perfecta entre ambas variables, mientras que un valor  $0$  indicará que no existe relación lineal entre ellas. Hay que tener en consideración que un valor de cero no indica necesariamente que no exista correlación, ya que las variables pueden presentar una relación no lineal. <sup>(35)</sup>

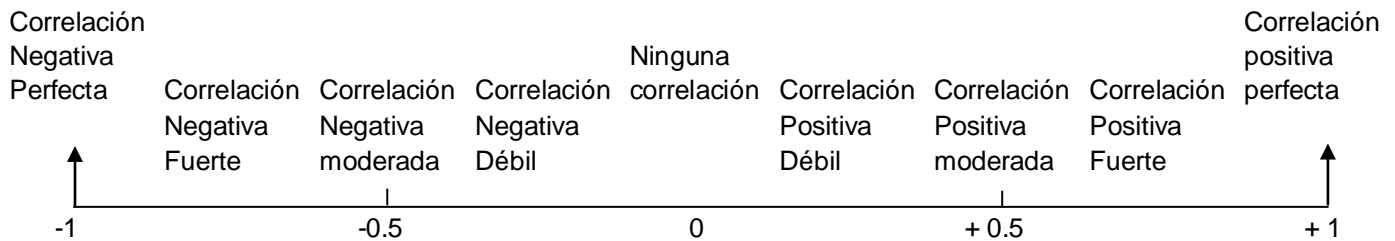
La correlación se puede graficar con un diagrama de dispersión de puntos, al cual muchos autores le llaman nubes de puntos, encuadrado dentro de un gráfico de coordenadas  $X$   $Y$ , en el cual se puede trazar una recta y cuyos puntos más cercanos a la recta hablarán de una correlación más fuerte, a esta recta se le denomina recta de regresión. <sup>(19)</sup> A continuación se presentan ejemplos de diagramas de dispersión y correspondientes coeficientes de correlación lineal de Pearson.

Fig.4.1 Ejemplos de diagramas de dispersión de puntos. <sup>(20)</sup>



El análisis del coeficiente de correlación entre dos variables se puede resumir en el siguiente esquema:

Fig 4.1 Tipos de correlación según el valor del coeficiente de correlación de Pearson. <sup>(20)</sup>



#### 4.1.2.2 Prueba de hipótesis del coeficiente de correlación <sup>(32)</sup>

La prueba de hipótesis se realiza para verificar si el coeficiente de correlación es estadísticamente diferente de cero. A continuación se describen los pasos para la realización de la prueba de hipótesis.

##### 1. Hipótesis a ser evaluadas.

Ho:  $r = 0$  (no hay correlación lineal)

Ha:  $r \neq 0$

##### 2. Estadístico de la prueba.

$$t_{\text{obs}} = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}, \text{ ecuación... (4.2)}$$

Donde al estadístico ( $t_{\text{obs}}$ ) se le aplica la prueba "t" de student, la cual sirve para evaluar la significación del coeficiente de correlación. Aquí  $t_{\text{obs}}$  tiene distribución  $t$  de student con  $n-2$  grados de libertad. Además,  $n$  es el tamaño de la muestra y  $r$  el coeficiente de correlación muestral. Este estadístico puede utilizarse para probar la hipótesis nula Ho.

### 3. Región crítica de la prueba.

Según el nivel de significancia escogido “ $\alpha$ ”, se construye la región crítica de la prueba mediante la tabla t-Student (ver tabla A.4.2, anexo 4).

$$t, \left( n-2, \frac{\alpha}{2} \right)$$

4. Regla de decisión: Rechazar  $H_0$  sí  $|t_{obs}| \geq t_{crítico}$

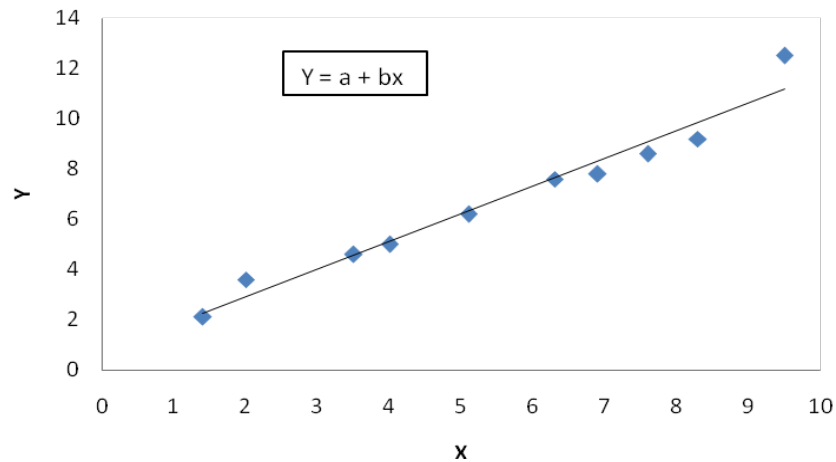
#### 4.1.3 Regresión lineal

La regresión consiste en obtener una ecuación que se pueda usar para predecir el valor de una variable, teniendo en cuenta un valor asignado a otra variable. Esta técnica está asociada al coeficiente de correlación de Pearson. <sup>(31)</sup>

En aquellos casos en que el coeficiente de correlación lineal sea “cercano” a +1 ó a -1, tiene sentido considerar la ecuación de la recta que “mejor se ajuste” a la nube de puntos. Uno de los principales usos de dicha recta será el de predecir o estimar los valores de Y que se obtendrían para distintos valores de X. <sup>(20)</sup>

Una de las condiciones que deben cumplirse para calcular el coeficiente de correlación de Pearson es que los puntos del diagrama de dispersión tiendan a la linealidad. Como se indicó anteriormente la regresión se utiliza para obtener una ecuación que permita predecir los valores de una variable en función de los datos observados en la otra. Por lo tanto, la ecuación de regresión será la ecuación de la recta que mejor represente a todos los puntos del diagrama y que permitirá pronosticar el valor de una variable en función de otra con la que está relacionada (regresión). <sup>(31)</sup>

Fig.4.3 Ejemplo de diagrama de dispersión de puntos y recta de regresión lineal.



#### 4.1.3.1 Recta de mínimos cuadrados

La recta de mínimos cuadrados es la técnica empleada para obtener la ecuación de regresión, minimizando la suma de los cuadrados de las distancias verticales entre los valores verdaderos de “Y” y los valores pronosticados de “Y”. <sup>(32)</sup>

La ecuación viene dada por la fórmula siguiente:

$$Y_i = a + bx_i, \text{ ecuación.....(4.3)}$$

Donde “**a**” es llamado coeficiente de posición o intercepto; y “**b**” coeficiente de regresión lineal. <sup>(32)</sup> Estos coeficientes están dados por:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - b \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - b\bar{x}, \quad \text{ecuación....(4.4)}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{\left(\sum_{i=1}^n x_i\right)^2}{n}}, \quad \text{ecuación....(4.5)}$$

Es importante señalar los siguientes puntos: <sup>(32)</sup>

1. El coeficiente de posición (a) o intercepto, indica la posición en la cual la recta corta el eje Y. Si la recta pasa por el origen, entonces  $a = 0$ . En términos prácticos, indica el valor que asume la variable Y cuando la variable  $X = 0$ .
2. El coeficiente de regresión lineal (b), determina la pendiente de la recta. Este coeficiente indica la variación en Y causada por la variación de una unidad en X.

#### 4.1.3.2 Coeficiente de Determinación <sup>(20)</sup>

El coeficiente de determinación “ $R^2$ ” es el que indica el porcentaje del ajuste que se ha conseguido con el modelo lineal, es decir el porcentaje de la variación de Y que se explica a través del modelo lineal que se ha estimado, es decir a través del comportamiento de X. A mayor porcentaje mejor es el modelo para predecir el comportamiento de la variable Y.

El coeficiente de determinación, también se puede entender como el porcentaje de varianza explicada por la recta de regresión y su valor siempre estará entre 0 y 1 y siempre es igual al cuadrado del coeficiente de correlación (r).

$$R^2 = r^2, \quad \text{ecuación.....(4.6)}$$

#### 4.1.3.3 Prueba de hipótesis sobre los parámetros <sup>(32)</sup>

Con la finalidad de comprobar estadísticamente si las variables X y Y presentan la supuesta relación lineal, debe realizarse un análisis de varianza (comúnmente abreviado como ANDEVA), y evaluar la hipótesis:

$H_0: b = 0$  (No hay regresión lineal simple)

$H_a: b \neq 0$

No rechazar  $H_0$ , significa que la pendiente es estadísticamente nula, entonces la recta será paralela al eje X y no habrá regresión lineal. En otras palabras, en caso de paralelismo, si existe una relación funcional de tipo  $y = f(x)$  entre las variables, ella no podrá ser descrita por una ecuación de regresión lineal.

El análisis de varianza (ANDEVA) se realiza utilizando la siguiente tabla:

Tabla 4.1 Elementos del análisis de varianza. <sup>(32)</sup>

Fuentes de Variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	Valor de la estadística F
Regresión	p-1	$b * \left( \sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{n} \right)$	$\frac{SC \text{ regresión}}{GL \text{ regresión}}$	$\frac{CM \text{ regresión}}{CM \text{ residuo}}$
Residuo	n-p	SC Total – SC reg	$\frac{SC \text{ residuo}}{GL \text{ residuo}}$	
Total	n-1	$\sum_{i=1}^n y_i^2 - \frac{\left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{n}$		

Donde:

n = cantidad de pares de datos

p = cantidad de parámetros incluidos en el estudio

- Para obtener el valor crítico ( $F_t$ ) de F, se busca en la tabla de distribución de Fisher-Snedecor (ver tabla A.4.3, anexo 4) el valor de F que está en función de:

$n_1 = 1$  grado de libertad

$n_2 = n - 2$  grados de libertad

$\alpha$  = nivel de significancia adoptado

- Regla de decisión: si  $F \geq F_t$  rechazar  $H_0$

## 4.2 Análisis de Correlación

### 4.2.1 Definición de variables y nivel de significancia

- El VIC se definirá como la variable independiente “X”.
- El CBR se definirá como la variable dependiente “Y”.
- El nivel de significancia ( $\alpha$ ) adoptado será el mínimo recomendado:  
 $\alpha = 0.05$ , equivalente a una seguridad del 95%.

### 4.2.2 Cálculo del coeficiente de correlación

Según los resultados obtenidos en los ensayos de correlación-regresión se puede construir la siguiente tabla:

Tabla 4.2 Elementos para el cálculo del coeficiente de correlación.

Pares de datos (n)	X (VIC)	Y (CBR)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>	XY
1	7,50	8,19	56,25	67,08	61,43
2	7,70	5,15	59,29	26,52	39,66
3	7,70	8,37	59,29	70,06	64,45
4	8,30	11,94	68,89	142,56	99,10
5	8,60	8,45	73,96	71,40	72,67
6	18,30	44,51	334,89	1981,14	814,53
7	18,80	50,11	353,44	2511,01	942,07
8	19,60	39,57	384,16	1565,78	775,57
9	20,80	45,81	432,64	2098,56	952,85
10	21,50	46,61	462,25	2172,49	1002,12
11	21,70	38,07	470,89	1449,32	826,12
12	23,50	55,49	552,25	3079,14	1304,02
13	23,60	56,95	556,96	3243,30	1344,02
14	24,00	65,24	576,00	4256,26	1565,76
15	24,30	53,80	590,49	2894,44	1307,34
16	32,80	64,30	1075,84	4134,49	2109,04
17	35,70	77,73	1274,49	6041,95	2774,96
18	36,80	112,85	1354,24	12735,12	4152,88
19	37,70	114,65	1421,29	13144,62	4322,31
20	42,90	140,63	1840,41	19776,80	6033,03
<b>Sumatoria</b>	<b>441,80</b>	<b>1048,42</b>	<b>11997,92</b>	<b>81462,06</b>	<b>30563,90</b>



Al aplicar la ecuación 4.1, se tendría lo siguiente:

$$r = \frac{30563,90 - \frac{(441,80)(1048,42)}{20}}{\sqrt{11997,2 - \frac{(441,80)^2}{20}} \sqrt{81462,06 - \frac{(1048,42)^2}{20}}} = 0.961$$

Evaluación de la hipótesis  $H_0: r = 0$  contra  $H_a: r \neq 0$ , utilizando el nivel de significancia del 0.05:

$$t_{\text{obs}} = \frac{0.961 \times \sqrt{20-2}}{\sqrt{1-0.961^2}} = 14,743$$

Utilizando la tabla de distribución t – Student (ver tabla A.4.2, anexo 4), el nivel de significancia adoptado y con  $n-2$  grados de libertad se tiene un  $t_{\text{crítico}}(18, 0.05) = 1.734$ . Se puede ver que el  $t_{\text{obs}} > t_{\text{crítico}}$ , por lo que se puede decir que hay evidencia suficiente para señalar que existe correlación lineal entre el VIC y el CBR.

### 4.3 Análisis de Regresión

Según el coeficiente de correlación y la prueba de hipótesis, se puede decir que el valor CBR es una función lineal del VIC, y se estará admitiendo el hecho que una nube de puntos descrita en un diagrama de dispersión, puede ser descrita de forma adecuadamente aproximada por una recta cuya ecuación se determina a continuación.

#### 4.3.1 Cálculo de los coeficientes “a” y “b” y el coeficiente $R^2$

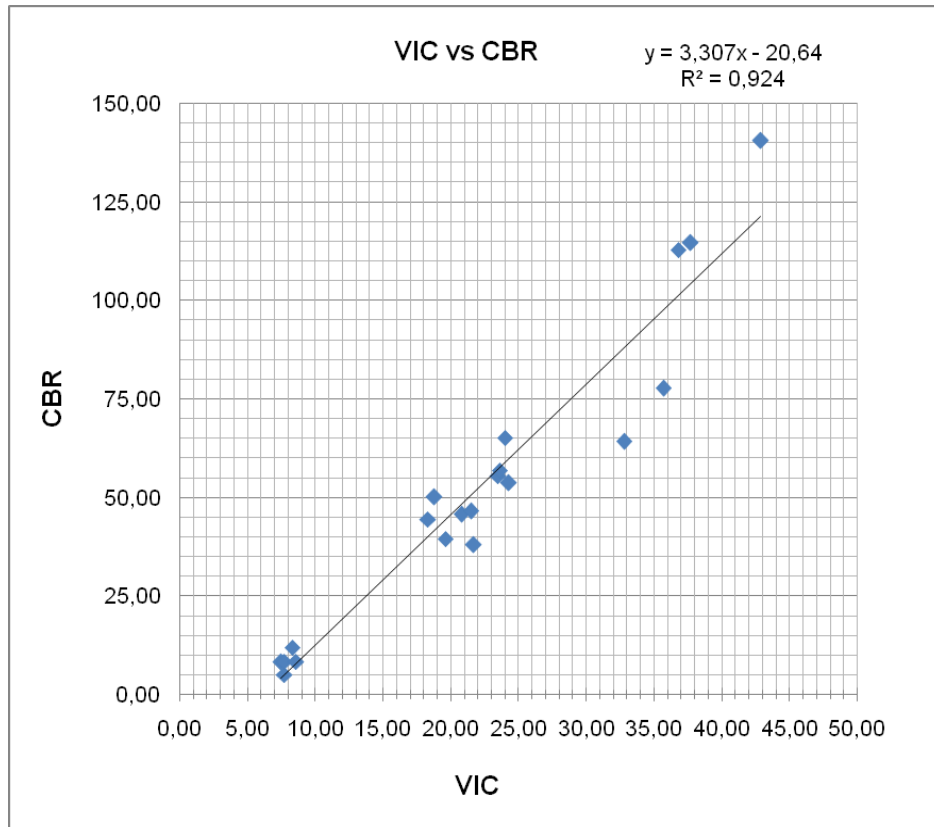
$$b = \frac{30563,90 - \frac{(441,80)(1048,42)}{20}}{11997,92 - \frac{(441,80)^2}{20}} = 3,307 \quad a = \frac{1048,42}{20} - 3,307 \frac{441,80}{20} = -20,64$$

$$R^2 = r^2 = (0.961)^2 = 0.924$$

Con esto se puede decir que la ecuación de la recta de regresión lineal que mejor ajusta los datos es:

$$CBR = - 20,64 + 3,307 VIC$$

Fig 4.4 Diagrama de dispersión y recta de regresión lineal VIC – CBR



#### 4.3.2 Prueba de hipótesis y análisis de varianza

Para realizar la prueba de hipótesis y comprobar si las variables VIC y CBR presentan la supuesta relación lineal, se debe construir la tabla de ANDEVA, determinar el valor estadístico  $F_{crítico}$  y definir los siguientes parámetros:

- Número de pares ordenados =  $n = 20$
- Parámetros incluidos en el modelo =  $p = 2$

Según los elementos del análisis de varianza definidos en la tabla 4.1, se tiene:

Tabla 4.3 Elementos del ANDEVA para VIC-CBR

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de Cuadrados (SC)	Cuadrados Medios (CM)	Valor de la estadística F
Regresión	1	24486,04	24486,04	218,22
Residuo	18	2019,79	112,21	-
Total	19	26502,83	-	-

Utilizando la tabla de distribución Fisher - Snedecor (ver tabla A.4.3, anexo 4), el nivel de significancia adoptado de 0.05,  $n_1 = 1$  grado de libertad,  $n_2 = n - 2$  grados de libertad se tiene un  $F_{crítico} = 4.41$ . Se puede ver que el valor  $F > F_{crítico}$ , por lo que se puede concluir que el modelo de regresión lineal es adecuado para expresar la relación entre el CBR y el VIC.

#### 4.4 Análisis e Interpretación de resultados

La correlación de los resultados de los ensayos de laboratorio se muestra en la fig. 4.3. La ecuación de la recta de regresión lineal que mejor ajusta y representa los datos es:  $CBR = - 20,64 + 3,307 VIC$  con un coeficiente de correlación "r" de 0.961, lo cual indica una correlación positiva fuerte. Además, se tiene un coeficiente de determinación  $R^2=0.924$ , lo que significa que se ha conseguido un porcentaje de ajuste del 92.4% o que el modelo de regresión lineal explica el 92.4% de los valores de CBR. Se debe mencionar que si  $R^2 = 0.924 > 0.8$ , entonces el modelo, prácticamente, puede considerarse confiable (Montgomery 1984; Montgomery and Peck 1982).

Por lo tanto, el modelo de regresión propuesto puede ser tomado como una herramienta confiable para predecir o estimar el valor CBR de suelos compactados a partir de ensayos con el Martillo Clegg, particularmente dentro del rango de valores de CBR y VIC reportados en la tabla 4.2 y para suelos de tipo ML o con características similares al estudiado.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Esta investigación fue desarrollada con el objetivo principal de correlacionar los resultados de ensayos de CBR y Martillo de Clegg en el laboratorio. Los datos de CBR y VIC fueron analizados mediante la aplicación de técnicas estadísticas para desarrollar un modelo de regresión confiable y capaz de estimar valores de CBR a partir de valores de VIC. El estudio fue llevado a cabo utilizando un tipo de suelo extraído de un banco de materiales utilizado en la construcción de terracerías y rellenos. Se realizó la caracterización del material estudiado mediante la aplicación de ensayos de laboratorio con los cuales se determinaron las principales propiedades físicas y mecánicas de dicho material.

### 5.1 Conclusiones

El banco de materiales “Material de Celda” presenta las siguientes características:

- El tamaño de partículas predominante es el fino con un porcentaje del 52%, seguido de arena con un 30% y grava con un 18%.
- Los límites de consistencia determinados indican un límite líquido del 42,3%, un límite plástico del 30% y un índice de plasticidad del 12%.
- Según el tamaño de partículas y los límites de consistencia, el suelo se clasifica como ML en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Este tipo de suelo se puede describir como un limo arenoso de compacidad medida a alta.
- La densidad seca máxima alcanzada mediante la aplicación del esfuerzo modificado es de 2.04 gr/cm<sup>3</sup> con un contenido de humedad óptimo del 11.40%.
- El valor CBR del suelo es del 6%, en su densidad seca máxima y contenido de humedad óptimo, obtenido en especímenes con 4 días de inmersión.

La fabricación de los especímenes compactados en el laboratorio fue llevada a cabo con precisión buena a moderada, específicamente en la variación de los contenidos de humedad inicialmente propuestos (teóricos) y los contenidos de humedad alcanzados (reales). Sin embargo, la diferencia entre estos contenidos de humedad no fue tan

grande como para influir de manera significativa en la ejecución de los ensayos y en la determinación de los valores CBR y VIC. Además, los contenidos de humedad teóricos (6%, 9%, 11.4% y 12%) fueron propuestos con la simple finalidad de obtener especímenes de suelo que al compactarse con la misma energía generaran diferentes densidades, lo cual fue logrado con los contenidos de humedad obtenidos en los ensayos realizados.

La estabilización de las lecturas del VIC se da en el 5to golpe aplicado con el Martillo de Clegg sobre los especímenes de suelo compactados. Además, es importante señalar que los valores más altos del VIC y CBR se alcanzaron en los especímenes con los contenidos de humedad más bajos y no necesariamente en los especímenes con contenidos de humedad cercanos al contenido óptimo; o bien, en los especímenes con las mayores densidades secas.

El VIC presenta una correlación positiva fuerte de tipo lineal con el valor CBR representada con un coeficiente de correlación de 0,961 y un coeficiente de determinación de 0,924, el cual indica que el VIC explica el 92,4% del valor CBR.

El modelo de regresión propuesto que mejor ajusta los datos está representado por la ecuación  $CBR = - 20,64 + 3,307 VIC$  y puede ser utilizado de forma confiable para estimar valores de CBR de suelos compactados a partir de valores VIC obtenidos mediante la aplicación del Martillo de Clegg.

El modelo de regresión arriba señalado puede ser utilizado eventualmente en cualquier terracería, sitio u obra de relleno, en el cual se utilice un tipo de suelo con características similares al material estudiado y dentro del rango de valores de CBR y VIC presentados en esta investigación.

## 5.2 Recomendaciones

- Desarrollar más investigaciones concernientes a la relación que pueda presentar el VIC con otras propiedades de los suelos utilizadas como parámetros de calidad de los procesos constructivos.
- Ampliar el campo de investigación y aplicación del Martillo de Clegg mediante la realización de correlaciones de VIC vs CBR, en cada tipo de suelo presente en los 2 sistemas de clasificación de mayor importancia en el país y en el campo ingenieril: SUCS y AASHTO.
- Diseñar un programa de investigación de campo en el cual se ejecuten ensayos con Martillo Clegg y CBR y se genere un modelo de regresión, el cual pueda ser utilizado en conjunto con el modelo presentado en esta investigación para conformar un modelo más sólido y de mayor confiabilidad para estimar valores CBR a partir de valores VIC.
- Impulsar proyectos de investigación en los cuales se utilice con mayor amplitud el Martillo de Clegg y por ende el VIC; esto, con la finalidad de enriquecer la bibliografía que hasta ahora nace en el país sobre dicho equipo.
- Al realizar ensayos con el Martillo Clegg, se recomienda que se efectúen al menos 5 mediciones (golpes de martillo) en un mismo ensayo para confirmar la estabilización de las lecturas del VIC al 5to golpe.
- Verificar las condiciones del Martillo Clegg y del dispositivo lector antes de realizar cualquier ensayo con este equipo.

## 6. Referencias bibliográficas

### 6.1 Libros y publicaciones consultadas

1. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). 2001. Standard Specifications for Transportation Material and Methods of Sampling and Testing. Edición 21. USA.
2. American Society for Testing and Materials (ASTM). 2001. Annual Book of ASTM Standard. Construction Section, Soil and Rock. USA.
3. Chen, W. F. & Richard Liew J. Y. 2003. The civil engineering handbook. Segunda edición. USA. Editorial CRC press LLC.
4. Clegg, B. 1976. An impact testing device for insitu base course evaluation, proceedings of the 8<sup>va</sup> australiano road, research board conference.
5. Crespo Villalaz, Carlos. 1999. Mecánica de suelos y cimentaciones. Cuarta edición. México. Editorial LIMUSA.
6. Delgado Vargas Manuel. 1999. Ingeniería de Cimentaciones. Colombia. Editorial Alfaomega.
7. Dr. W.D.H. Woodward et al, 2004. Predicting the performance of type 1 slate aggregate. Universidad de Ulster, Irlanda del Norte.
8. Hernández Sampieri Roberto et al. 1991. Metodología de la investigación. México. Editorial McGraw Hill Interamericana.
9. Hewes & Oglesby. 1982. Ingeniería de carreteras. Calles, viaductos y pasos a desnivel. México, DF. Editorial Continental SA.

10. Hornbostel Caleb. 2000. Materiales de Construcción, tipos, usos y aplicaciones. México. Editorial LIMUSA.
11. Juarez Badillo, et al., 2001. Mecánica de suelos, tomo II. México. Editorial LIMUSA.
12. Jumikis Alfreds. 1962. Soil Mechanics. USA. Editorial D. Van Nostrand Company Inc.
13. Larson Harold J. 1995. Introducción a la teoría de probabilidades e inferencia estadística. USA. Editorial LIMUSA.
14. Montgomery, D.C and Peck, E. A. 1982. Introduction to linear regression analysis. Wiley, New York.
15. Roman D. Hryciw & Thomas G. Thomann. Julio 1993. Stress-History-Based Model for Cohesionless Soils, Journal of Geotechnical Engineering, Vol 119.
16. Ruiz, et al. 2000. Geología aplicada a la ingeniería civil. México. Editorial LIMUSA.
17. Sower & Sower. 1990. Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones. México. Editorial LIMUSA.
18. Spieqel Murray R. 1991. Estadística. México. Editorial McGraw – Hill.
19. Taylor Donald. 1948. Fundamentals of Soil Mechanics. USA. Editorial John Wiley & Sons, Inc.



## 6.2 Páginas web consultadas

20. Alicia Vila et al. España. Correlación y análisis de Regresión. Proyecto financiado por la Secretaría de Estado de Educación y Universidades y la Universidad Oberta de Calunya (UOC). Disponible en <http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/regresionlineal.pdf>. Consultado en Octubre de 2007.
21. Bazan Loyola José Manuel. Estadística Inferencial, regresión y correlación (en línea). Disponible en <http://www.monografias.com/trabajos26/estadistica-inferencial/estadisticainferencial.shtml>. Consultado en Noviembre 2008.
22. Departamento de Estadística del Centro de Ciencias Básicas. Universidad Autónoma de Aguascalientes. México. Valores críticos de la distribución F. Disponible en <http://www.fileden.com/files/2007/2/27/827779/UaaLae/Tabla%20distrib%20F.pdf>. Consultado en Noviembre 2008.
23. Dr. Baden Clegg Pty Ltd. 1986. Correlation with California bearing ratio. Disponible en <http://www.clegg.com.au/informationlist12.asp>. Consultado en Noviembre 2007.
24. Dr. Baden Clegg Pty Ltd. 2006. A brief description of the Clegg impact soil tester (en línea). Disponible en <http://www.clegg.com.au/products.asp>. Consultado en Noviembre 2007.
25. ELE Internacional. Aparato de ensayos de impacto de suelos Clegg. Disponible en <http://elesusa.com/pdf/spanish/compactacion.pdf>. Consultado en noviembre 2007.

26. Enciclopedia Virtual Wikipedia en español. 2008. Ingeniería Geotécnica (en línea). Disponible en [http://es.wikipedia.org/wiki/ingenier%C3%ADa\\_geot%C3%A9cnica](http://es.wikipedia.org/wiki/ingenier%C3%ADa_geot%C3%A9cnica). Consultado en Octubre 2007.
27. Enciclopedia Virtual Wikipedia en español. 2008. Límites de Atterberg, cuchara de Casagrande (en línea). Disponible en [http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=cuchara\\_de\\_casagrande&action=edit&section=1](http://es.wikipedia.org/w/index.php?title=cuchara_de_casagrande&action=edit&section=1). Consultado en noviembre de 2008.
28. Enciclopedia Virtual Wikipedia en español. 2008. Propiedades mecánicas de los materiales (en línea). Disponible en [http://es.wikipedia.org/wiki/propiedades\\_mec%C3%A1nicas\\_de\\_los\\_materiales#propiedades\\_mec.C3.A1nicas\\_de\\_los\\_hormigones](http://es.wikipedia.org/wiki/propiedades_mec%C3%A1nicas_de_los_materiales#propiedades_mec.C3.A1nicas_de_los_hormigones). Consultado en octubre 2007.
29. Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación. Universidad de la República de Uruguay. Tabla de distribución t-student con n grados de libertad. Disponible en <http://www.fhuce.edu.uy/antrop/cursos/mat/archivos/tablat.pdf>. Consultado en Noviembre 2008.
30. Instituto Nicaragüense de Fomento Municipal. Localización del municipio de La Libertad. Disponible en [http://www.inifom.gob.ni/municipios/documentos/CHONTALES/la\\_libertad.pdf](http://www.inifom.gob.ni/municipios/documentos/CHONTALES/la_libertad.pdf). Consultado en Noviembre 2008.
31. Julia García Salinero. Departamento de investigación Fuden. 2005. Análisis de datos en los estudios epidemilógicos III, Correlación y regresión. Disponible en [http://www.nureinvestigacion.es/FICHEROS\\_ADMINISTRADOR/F\\_METODOLOGICA/formacion18.pdf](http://www.nureinvestigacion.es/FICHEROS_ADMINISTRADOR/F_METODOLOGICA/formacion18.pdf). Consultado en diciembre 2007.

32. López Bautista Ezequiel Abraham. Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala. Sub-área de Métodos de Cuantificación estadística general. Correlación lineal simple. Disponible en <http://cete.iespana.es/cursos/estadgen/correlreg.pdf>. Consultado en Noviembre 2008.
33. Narcilio, Guillermo A., Santamarina, Juan Carlos. Georgia Institute of Technology. USA. Clasificación de Suelos: fundamentos físicos, prácticas actuales y recomendaciones. Disponible en <http://materias.fi.uba.ar/6408/santamarina.pdf>. Consultado en octubre de 2007.
34. Patenstorm. 1998. Turf impact analysis system (en línea). Disponible en <http://www.patenstorm.us/patents/5736631-fulltext.html> Consultado en noviembre 2007.
35. Pértegas Díaz, S. & Pita Fernández S. 2002. Determinación del tamaño muestral para calcular la significación del coeficiente de correlación lineal (en línea). Disponible en <http://www.fisterra.com/mbe/investiga/pearson/pearson.asp>. Consultado en diciembre 2007.
36. Secretaría de Comunicaciones y transporte, México. Julio, 2008. Métodos de muestreo y prueba de material, límites de consistencia. Disponible en <http://normas.imt.mx/NORMATIVA/I%20MMP/1%20Suelos%20y%20Terracerias/M-MMP-1-07-03.pdf>). Consultado en noviembre de 2008.
37. Universidad Católica de Valparaíso. Chile. Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería en Construcción. Determinación de la capacidad soporte CBR del suelo. Disponible en [http://icc.ucv.cl/geotecnia/03\\_docencia/02\\_laboratorio/manual\\_laboratorio/cbr.pdf](http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/cbr.pdf). Consultado en octubre de 2007.

38. Universidad Católica del Norte. Mecánica de suelos, límites de consistencia. Disponible en <http://www.ucn.cl/facultadesinstitutos/laboratorio/mecanica4.htm>. Consultado en septiembre 2007.
39. Universidad Técnica de Oruro (UTO), Bolivia. Octubre, 2007. Apuntes sobre ingeniería civil, Procedimiento para límite plástico. Disponible en <http://ingenieracivil.blogspot.com/2007/10/procedimiento-limite-plastico.html>. Consultado en noviembre 2008.

# ANEXOS

# ANEXO 1

## Resultados de ensayos de caracterización

## A.1.1 Análisis del tamaño de partículas de los suelos por tamizado



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS INGENIERÍA CIVIL				
<b>ANÁLISIS DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS DE LOS SUELOS POR TAMIZADO</b>				
<b>PROYECTO:</b> <u>Monografía - UNAN/Managua</u>		<b>FECHA:</b> <u>20/09/2008</u>		
<b>SONDEO:</b> <u>S1</u>		<b>MUESTRA:</b> <u>M1E1</u>		
<b>DESCRIPCIÓN:</b> <u>Material de Celda - Mina Orosí</u>		<b>Método de ensayo:</b> <u>Lavado</u>		
<b>Peso total de la muestra (gr):</b> <u>3221,20</u>				
<b>Peso después de lavado (gr):</b> <u>1572,80</u>				
GRANULOMETRÍA ASTM D 422				
Tamiz	PR	%RP	%RA	%QP
1 1/2"	0,00	0	0	100
1"	86,80	3	3	97
3/4"	45,10	1	4	96
1/2"	134,00	4	8	92
3/8"	98,30	3	11	89
N° 4	208,70	6	18	82
N° 10	218,80	7	25	75
N° 20	198,80	6	31	69
N° 40	173,80	5	36	64
N° 60	140,70	4	41	59
N° 100	119,40	4	44	56
N° 140	81,90	3	47	53
N° 200	49,90	2	48	52
Plato	1665,00	52	100	
<b>Suma</b>	<b>3221,20</b>	<b>100</b>		
GRAVA	ARENA			FINOS
	Gruesa	Media	Fina	
18	7	12	12	52

**Curva Granulométrica**

Diámetros de partícula necesarios para realizar el cálculo del Coeficiente de Curvatura y el Coeficiente de Uniformidad

**D10:** \_\_\_\_\_  
**D30:** \_\_\_\_\_  
**D60:** \_\_\_\_\_  
**Cc:** \_\_\_\_\_  
**Cu:** \_\_\_\_\_

## A.1.2 Límites de Consistencia

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS INGENIERÍA CIVIL			
			
<b>LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE LOS SUELOS</b>			
<b>PROYECTO:</b>	<u>Monografía - UNAN/Managua</u>		<b>FECHA:</b>
<b>SONDEO:</b>	<u>S1</u>		<u>20/09/2008</u>
<b>DESCRIPCIÓN:</b>	<u>Material de Celda - Mina Orosí</u>		<b>MUESTRA:</b>
			<u>M1E1</u>
<b>Método de ensayo:</b>	<u>Límite líquido 1-punto</u>		
LÍMITE LIQUIDO ASTM D 4318			
ID	1		
Número de golpes	29		
Factor de corrección	1,018		
Tara (gr)	49,00		
Tara+Mat Hum (gr)	96,70		
Tara+Mat Seco (gr)	82,70		
Humedad (%)	42,29		
LÍMITE PLASTICO ASTM D 4318			
ID	1		
Tara (gr)	49,70		
Tara+Mat Hum (gr)	54,90		
Tara+Mat Seco (gr)	53,70		
Humedad (%)	30,00		
<b>índice de Plasticidad = 12</b>			



## A.1.3 Clasificación SUCS

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS INGENIERÍA CIVIL CLASIFICACIÓN DE SUELOS PARA PROPÓSITOS DE INGENIERÍA (SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS)					
<b>PROYECTO:</b>	Monografía - UNAN/Managua				
<b>SONDEO:</b>	S1				
<b>DESCRIPCIÓN:</b>	Material de Celda - Mina Orosí				
	<b>FECHA:</b>	20/09/2008			
	<b>MUESTRA:</b>	M1E1			
<b>Peso total de la muestra (gr):</b>	3221,20			<b>Método de ensayo:</b>	Lavado
<b>Peso después de lavado (gr):</b>	1572,80				
GRANULOMETRÍA ASTM D 422					
Tamiz	PR	%RP	%RA	%QP	
1 1/2"	0,00	0	0	100	
1"	86,80	3	3	97	
3/4"	45,10	1	4	96	
1/2"	134,00	4	8	92	
3/8"	98,30	3	11	89	
N° 4	208,70	6	18	82	
N° 10	218,80	7	25	75	
N° 20	198,80	6	31	69	
N° 40	173,80	5	36	64	
N° 60	140,70	4	41	59	
N° 100	119,40	4	44	56	
N° 140	81,90	3	47	53	
N° 200	49,90	2	48	52	
Plato	1665,00	52	100		
<b>Suma</b>	<b>3221,20</b>	<b>100</b>			
LÍMITE LÍQUIDO ASTM D 4318					
ID	1				
Número de golpes	29				
Factor de corrección	1,018				
Tara (gr)	49,00				
Tara+Mat Hum (gr)	96,70				
Tara+Mat Seco (gr)	82,70				
Humedad (%)	42,29				
LÍMITE PLÁSTICO ASTM D 4318					
ID	1				
Tara (gr)	49,70				
Tara+Mat Hum (gr)	54,90				
Tara+Mat Seco (gr)	53,70				
Humedad (%)	30,00				
<b>Curva Granulométrica</b>					
<b>RESULTADOS</b>					
<b>Clasificación SUCS:</b>	ML				
<b>(ASTM D 2487)</b>					
<b>Límite Líquido:</b>	42,29				
<b>Límite Plástico:</b>	30,00				
<b>Índice de Plasticidad:</b>	12,29				
<b>D10:</b>	-				
<b>D30:</b>	-				
<b>D60:</b>	-				
<b>Cc:</b>	-				
<b>Cu:</b>	-				
<b>GRAVA</b>	<b>ARENA</b>			<b>FINOS</b>	
			31		
	<b>Gruesa</b>	<b>Media</b>	<b>Fina</b>		
18	7	12	12	52	
OBSERVACIONES					
El material encontrado corresponde a un suelo clasificado como ML en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Este tipo de suelos se describe como limo arenoso.					

## A.1.4 Compactación de suelos aplicando el esfuerzo modificado

Especimen	Pesos (gr)				Humedad	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	
ID	Tara	Tara+Mat Hum	Tara+Mat Seco	Molde+Mat Hum Comp	%	Húmeda	Seca
M1	50,01	126,51	121,75	10797,50	6,64	2,10	1,97
M2	49,05	142,46	134,24	11065,00	9,65	2,23	2,03
M3	49,82	175,14	160,76	11187,70	12,96	2,29	2,02
M4	49,88	194,50	174,34	11039,20	16,20	2,21	1,91

**Densidad seca vs Humedad**

<b>Método de ensayo:</b>	C
<b>Vol del molde (cm<sup>3</sup>)</b>	2061,29
<b>Peso del Molde (gr)</b>	6475,30
<b>No de Capas</b>	5
<b>Energía de compactación</b>	56 golpes

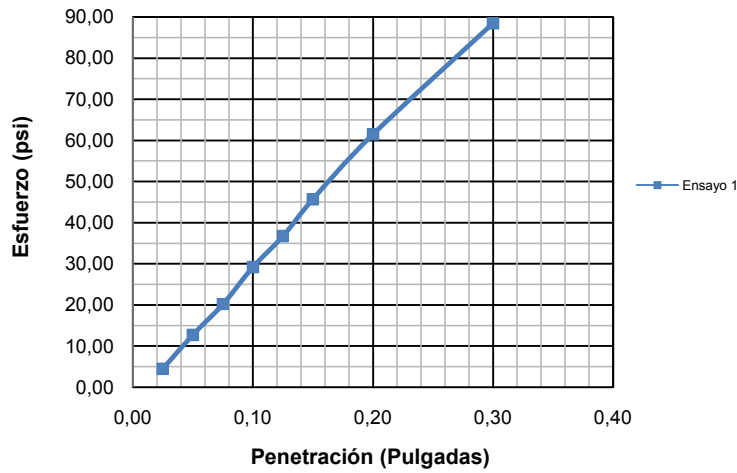
  

<b>Densidad Seca Máxima:</b>	<b>2.04 gr/cm<sup>3</sup></b>
<b>Humedad Óptima:</b>	<b>11,40%</b>
<b>Clasificación SUCS:</b>	<b>ML</b>

## A.1.5 CBR de laboratorio 1

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS INGENIERÍA CIVIL																
CBR DE LABORATORIO																
PROYECTO:		Monografía - UNAN/Managua														
SONDEO:		S1														
DESCRIPCIÓN:		Material de Celda - Mina Orosí														
MÉTODO DE ENSAYO:		ASTM D 1883														
DÍAS DE INMERSIÓN:		4														
FECHA:						17/10/2008										
MUESTRA:						M1E1										
MÉTODO DE COMPACTACIÓN:						ASTM D-1557										
ÁREA DEL PISTÓN:						19,355 cm <sup>2</sup>										
ENSAYOS DE COMPACTACION Y HUMEDAD																
Ensayo No	1	Unidades		2	Unidades		3	Unidades								
Humedad Óptima	11,40	%		11,40	%		11,40	%								
Densidad seca máxima	2,04	gr/cm <sup>3</sup>		2,04	gr/cm <sup>3</sup>		2,04	gr/cm <sup>3</sup>								
No de Golpes	10	NA		25	NA		56	NA								
Peso muestra húmeda compacta+ molde	8712,32	gr		9010,47	gr		9302,65	gr								
Peso molde	4104,70	gr		4099,10	gr		4118,30	gr								
Volumen del molde	2420,64	cm <sup>3</sup>		2367,74	cm <sup>3</sup>		2413,35	cm <sup>3</sup>								
Densidad húmeda	1,903	gr/cm <sup>3</sup>		2,074	gr/cm <sup>3</sup>		2,148	gr/cm <sup>3</sup>								
Contenido de humedad-compactación	11,840	%		11,750	%		11,520	%								
Densidad seca-compactación	1,702	gr/cm <sup>3</sup>		1,856	gr/cm <sup>3</sup>		1,926	gr/cm <sup>3</sup>								
ENSAYOS VALOR CBR DE LABORATORIO																
Penetración pulg	mm	Lectura de Carga		Carga total		Esfuerzo		Lectura de Carga		Carga total		Esfuerzo				
		0,01 KN	kg	lb	kgf/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN	kg	lb	kgf/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN	kg	lb	kgf/cm <sup>2</sup>	psi
MOLDE No		CBR - E1				CBR - E2				CBR - E3						
0,025	0,63	0,060	6,118	13,488	0,316	4,496	0,070	7,138	15,736	0,369	5,245	0,060	6,118	13,488	0,316	4,496
0,050	1,27	0,170	17,335	38,217	0,896	12,739	0,180	18,355	40,465	0,948	13,488	0,180	18,355	40,465	0,948	13,488
0,075	1,90	0,270	27,532	60,698	1,422	20,233	0,280	28,552	62,946	1,475	20,982	0,290	29,572	65,194	1,528	21,731
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>0,390</b>	<b>39,769</b>	<b>87,675</b>	<b>2,055</b>	<b>29,225</b>	<b>0,430</b>	<b>43,848</b>	<b>96,667</b>	<b>2,265</b>	<b>32,222</b>	<b>0,450</b>	<b>45,887</b>	<b>101,163</b>	<b>2,371</b>	<b>33,721</b>
0,125	3,17	0,490	49,966	110,155	2,582	36,718	0,580	59,144	130,388	3,056	43,463	0,650	66,282	146,124	3,425	48,708
0,150	3,81	0,610	62,203	137,132	3,214	45,711	0,740	75,459	166,357	3,899	55,452	0,900	91,774	202,326	4,742	67,442
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>0,820</b>	<b>83,617</b>	<b>184,341</b>	<b>4,320</b>	<b>61,447</b>	<b>1,100</b>	<b>112,169</b>	<b>247,287</b>	<b>5,795</b>	<b>82,429</b>	<b>1,350</b>	<b>137,662</b>	<b>303,489</b>	<b>7,112</b>	<b>101,163</b>
0,300	7,62	1,180	120,327	265,272	6,217	88,424	1,770	180,490	397,908	9,325	132,636	2,310	235,554	519,303	12,170	173,101
Ensayo No	1		2		3											
Corrección	-		0,075		0,100											
Sobrecarga Saturación, (lb)	10		10		10											
Sobrecarga Penetración, (lb)	10		10		10											
C.B.R. Corregido a 0,1"	2,92%		4,85%		6,74%											
C.B.R. Corregido a 0,2"	4,10%		6,60%		9,29%											

**Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)**



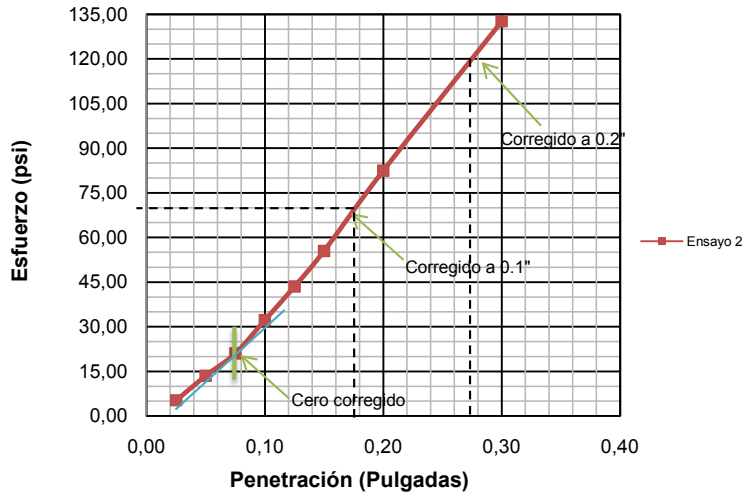
Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	No corregido	No corregido
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R) 10 Golpes(%)**

-

**Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)**



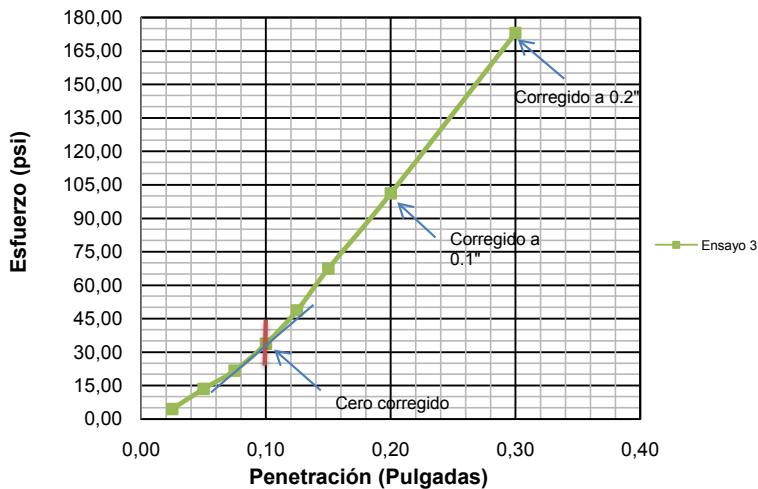
Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	20,982	0,075
Penetración a 0,1"	69,500	0,175
Penetración a 0,2"	120,000	0,275

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	48,518	4,852
0.2"	99,018	6,601

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R) 25 Golpes(%)**

-

**Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)**



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	33,721	0,100
Penetración a 0,1"	101,163	0,200
Penetración a 0,2"	173,101	0,300

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	67,442	6,744
0.2"	139,380	9,292

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R) 56 Golpes(%)**

-

## A.1.6 CBR de laboratorio 2

	1	Unidades	2	Unidades	3	Unidades
Ensayo No						
Humedad Óptima	11,40	%	11,40	%	11,40	%
Densidad seca máxima	2,04	gr/cm3	2,04	gr/cm3	2,04	gr/cm3
No de Golpes	10	NA	25	NA	56	NA
Peso muestra húmeda compacta+ molde	8685,80	gr	8952,20	gr	9232,80	gr
Peso molde	4104,70	gr	4099,10	gr	4118,30	gr
Volumen del molde	2420,64	cm3	2367,74	cm3	2413,35	cm3
Densidad húmeda	1,893	gr/cm3	2,050	gr/cm3	2,119	gr/cm3
Contenido de humedad-compactación	12,300	%	12,110	%	12,710	%
Densidad seca-compactación	1,685	gr/cm3	1,828	gr/cm3	1,880	gr/cm3

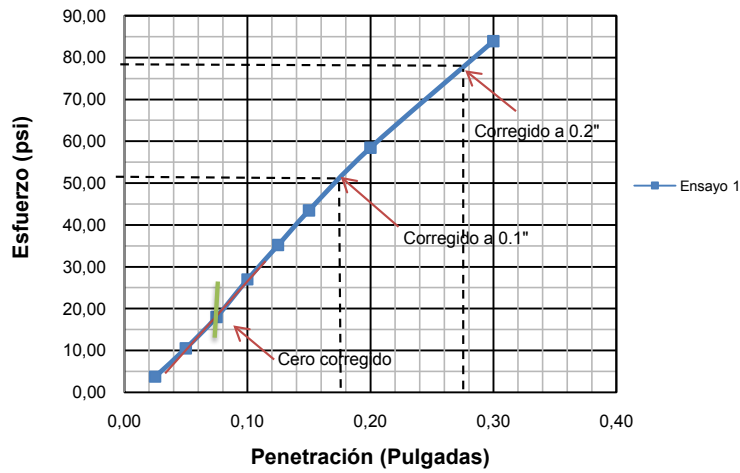
  

Penetración	Lectura de Carga	Carga total		Esfuerzo		Lectura de Carga	Carga total		Esfuerzo		Lectura de Carga	Carga total		Esfuerzo		
		kg	lb	kgf/cm2	psi		kg	lb	kgf/cm2	psi		kg	lb	kgf/cm2	psi	
MOLDE No		CBR - E1				CBR - E2				CBR - E3						
0,025	0,63	0,050	5,099	11,240	0,263	3,747	0,080	8,158	17,985	0,421	5,995	0,030	3,059	6,744	0,158	2,248
0,050	1,27	0,140	14,276	31,473	0,738	10,491	0,190	19,375	42,713	1,001	14,238	0,090	9,177	20,233	0,474	6,744
0,075	1,90	0,240	24,473	53,954	1,264	17,985	0,310	31,611	69,690	1,633	23,230	0,210	21,414	47,209	1,106	15,736
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>0,360</b>	<b>36,710</b>	<b>80,930</b>	<b>1,897</b>	<b>26,977</b>	<b>0,430</b>	<b>43,848</b>	<b>96,667</b>	<b>2,265</b>	<b>32,222</b>	<b>0,400</b>	<b>40,789</b>	<b>89,923</b>	<b>2,107</b>	<b>29,974</b>
0,125	3,17	0,470	47,927	105,659	2,476	35,220	0,580	59,144	130,388	3,056	43,463	0,600	61,183	134,884	3,161	44,961
0,150	3,81	0,580	59,144	130,388	3,056	43,463	0,730	74,439	164,109	3,846	54,703	0,830	84,636	186,590	4,373	62,197
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>0,780</b>	<b>79,538</b>	<b>175,349</b>	<b>4,109</b>	<b>58,450</b>	<b>1,040</b>	<b>106,050</b>	<b>233,799</b>	<b>5,479</b>	<b>77,933</b>	<b>1,260</b>	<b>128,484</b>	<b>283,256</b>	<b>6,638</b>	<b>94,419</b>
0,300	7,62	1,120	114,208	251,783	5,901	83,928	1,700	173,352	382,171	8,956	127,390	2,230	227,397	501,319	11,749	167,106

Ensayo No	1	2	3
Corrección	0,075	0,100	0,075
Sobrecarga Saturación, (lb)	10	10	10
Sobrecarga Penetración, (lb)	10	10	10
C.B.R. Corregido a 0,1"	3,30%	4,57%	6,23%
C.B.R. Corregido a 0,2"	4,00%	6,35%	8,95%

**Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)**

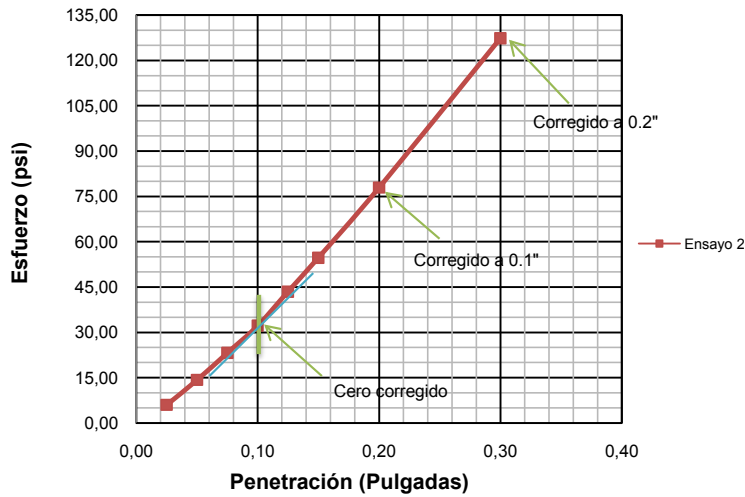


Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	17,985	0,075
Penetración a 0,1"	51,000	0,175
Penetración a 0,2"	78,000	0,275

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	33,015	3,302
0.2"	60,015	4,001

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R) 10 Golpes(%)**  
4,001

**Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)**

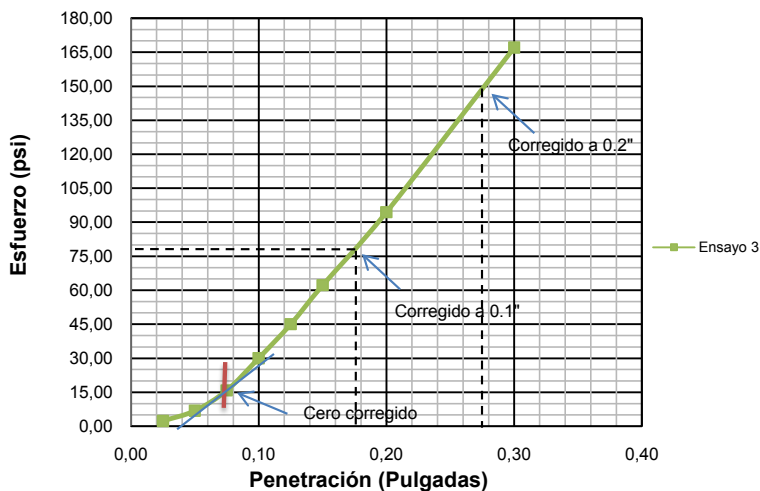


Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	32,222	0,010
Penetración a 0,1"	77,933	0,200
Penetración a 0,2"	127,390	0,300

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	45,711	4,571
0.2"	95,168	6,345

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R) 25 Golpes(%)**  
6,345

**Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)**



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	15,736	0,075
Penetración a 0,1"	78,000	0,175
Penetración a 0,2"	150,000	0,275

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	62,264	6,226
0.2"	134,264	8,951

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R) 56 Golpes(%)**  
8,951

# ANEXO 2

## Resultados de ensayos de correlación-regresión

## A.2.1 Humedad Teórica del 6%

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS INGENIERÍA CIVIL	
<b>ENSAYOS DE CORRELACIÓN</b>	
<b>PROYECTO:</b>	<u>Monografía - UNAN/Managua</u>
<b>ENSAYO:</b>	<u>E1</u>
<b>DESCRIPCIÓN:</b>	<u>Material de Celda - Mina Orosí</u>
<b>FECHA:</b>	<u>31/10/2008</u>
<b>MUESTRA:</b>	<u>M1</u>
Molde de ensayo:	<u>CBR - 6"</u>
Martillo de ensayo:	<u>Proctor</u>
No de capas:	<u>5</u>
Volumen de molde:	<u>3229,97cm<sup>3</sup></u>
Peso del martillo:	<u>4,54 kg</u>
Humedad teórica:	<u>6,00%</u>
Peso del molde:	<u>4103,50gr</u>
Altura de caída:	<u>18 pulg</u>
Cantidad de agua:	<u>540 cc</u>
Área del pistón:	<u>19,355cm<sup>2</sup></u>
Valor Impacto de Clegg:	<u>5to golpe</u>
Peso total muestra seca:	<u>9000,00gr</u>
Días de inmersión:	<u>0</u>

ENSAYO DE COMPACTACIÓN					
ESPECIMEN Id	1	2	3	4	5
Energía de compactación, golpes	30	40	50	60	70
Peso-tara, gr	50,33	49,81	49,69	49,93	49,61
Peso-tara+suelo humedo, gr	144,30	180,03	183,30	185,25	223,74
Peso-tara+suelo seco, gr	137,84	170,89	173,67	176,22	212,06
Peso-molde+suelo compacto, gr	10676,40	10830,20	10958,20	11030,00	11081,00
<b>Contenido de Humedad, %</b>	<b><u>7,38</u></b>	<b><u>7,55</u></b>	<b><u>7,77</u></b>	<b><u>7,15</u></b>	<b><u>7,19</u></b>
Densidad Húmeda, gr/cm <sup>3</sup>	2,03	2,08	2,12	2,14	2,16
<b>Densidad Seca, gr/cm<sup>3</sup></b>	<b><u>1,895</u></b>	<b><u>1,936</u></b>	<b><u>1,969</u></b>	<b><u>2,001</u></b>	<b><u>2,015</u></b>

ENSAYOS CON MARTILLO CLEGG					
ESPECIMEN	VALOR IMPACTO DE CLEGG (VIC), (g)				
Id	1er golpe	2do golpe	3er golpe	4to golpe	5to golpe
1	28,60	32,90	32,90	32,80	<b>32,80</b>
2	23,60	32,30	35,70	35,70	<b>35,70</b>
3	26,30	32,60	34,90	36,70	<b>36,80</b>
4	24,80	29,40	35,00	37,60	<b>37,70</b>
5	28,80	34,00	41,90	42,90	<b>42,90</b>

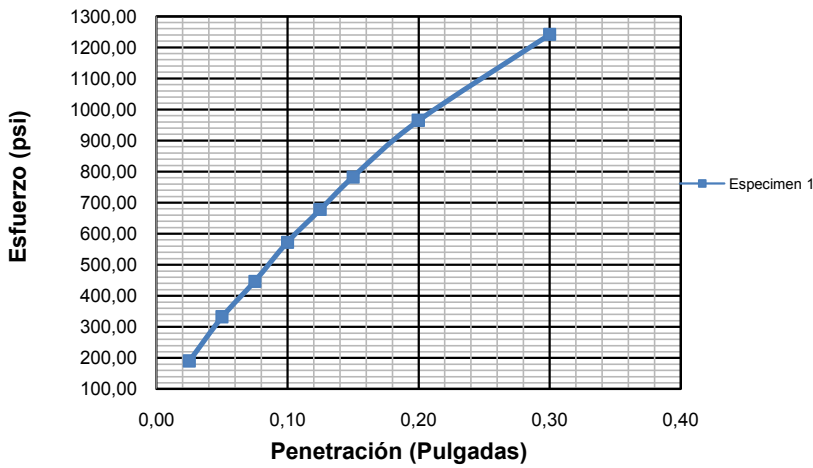
  

ENSAYO VALOR CBR DE LABORATORIO																			
Penetración		Lectura de Carga			Carga			Esfuerzo			Lectura de Carga			Carga			Esfuerzo		
pulg	mm	0,01 KN	kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi			
ESPECIMEN		1					2					3							
0,025	0,63	2,53	257,99	568,77	13,33	189,59	2,61	266,15	586,75	13,75	195,58	4,62	471,11	1038,62	24,34	346,21			
0,050	1,27	4,43	451,73	995,90	23,34	331,97	4,63	472,13	1040,87	24,39	346,96	9,12	929,98	2050,26	48,05	683,42			
0,075	1,90	5,96	607,75	1339,86	31,40	446,62	6,57	669,95	1476,99	34,61	492,33	12,26	1250,17	2756,16	64,59	918,72			
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>7,64</b>	<b>779,06</b>	<b>1717,54</b>	<b>40,25</b>	<b>572,51</b>	<b>8,66</b>	<b>883,07</b>	<b>1946,85</b>	<b>45,63</b>	<b>648,95</b>	<b>15,06</b>	<b>1535,69</b>	<b>3385,62</b>	<b>79,34</b>	<b>1128,54</b>			
0,125	3,17	9,05	922,84	2034,52	47,68	678,17	10,74	1095,17	2414,45	56,58	804,82	17,33	1767,17	3895,94	91,30	1298,65			
0,150	3,81	10,45	1065,09	2348,13	55,03	782,71	12,50	1274,65	2810,11	65,86	936,70	19,25	1962,95	4327,57	101,42	1442,52			
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>12,87</b>	<b>1312,37</b>	<b>2893,29</b>	<b>67,81</b>	<b>964,43</b>	<b>15,56</b>	<b>1586,68</b>	<b>3498,03</b>	<b>81,98</b>	<b>1166,01</b>	<b>22,55</b>	<b>2299,46</b>	<b>5069,44</b>	<b>118,80</b>	<b>1689,81</b>			
0,300	7,62	16,57	1689,67	3725,08	87,30	1241,69	20,36	2076,14	4577,11	107,27	1525,70	28,11	2866,42	6319,38	148,10	2106,46			
Ensayo No	1					2					3								
Corrección	-					-					-								
C.B.R. a 0,1"	57,25%					64,89%					112,85%								
C.B.R. a 0,2"	64,30%					77,73%					112,65%								



ENSAYO VALOR CBR DE LABORATORIO											
Penetración		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo		Lectura de Carga		Esfuerzo	
pulg	mm	0,01 KN	kg	lb	kg/cm2	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm2	psi
ESPECIMEN 4						ESPECIMEN 5					
0,025	0,63	3,60	367,10	809,31	18,97	269,77	2,06	210,06	463,11	10,85	154,37
0,050	1,27	6,83	696,47	1535,45	35,98	511,82	5,93	604,69	1333,12	31,24	444,37
0,075	1,90	10,06	1025,83	2261,58	53,00	753,86	10,07	1026,85	2263,83	53,05	754,61
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>13,31</b>	<b>1357,24</b>	<b>2992,21</b>	<b>70,12</b>	<b>997,40</b>	<b>14,81</b>	<b>1510,20</b>	<b>3329,42</b>	<b>78,03</b>	<b>1109,81</b>
0,125	3,17	16,18	1649,90	3637,41	85,24	1212,47	19,08	1945,62	4289,35	100,52	1429,78
0,150	3,81	18,83	1920,13	4233,15	99,21	1411,05	23,31	2376,96	5240,30	122,81	1746,77
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>22,95</b>	<b>2340,25</b>	<b>5159,37</b>	<b>120,91</b>	<b>1719,79</b>	<b>28,15</b>	<b>2870,50</b>	<b>6328,37</b>	<b>148,31</b>	<b>2109,46</b>
0,300	7,62	28,77	2933,72	6467,75	151,57	2155,92	35,82	3652,62	8052,66	188,72	2684,22
Ensayo No						4					
Corrección						-					
C.B.R. a 0,1"						99,74%					
C.B.R. a 0,2"						114,65%					
Ensayo No						5					
Corrección						-					
C.B.R. a 0,1"						110,98%					
C.B.R. a 0,2"						140,63%					

Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)



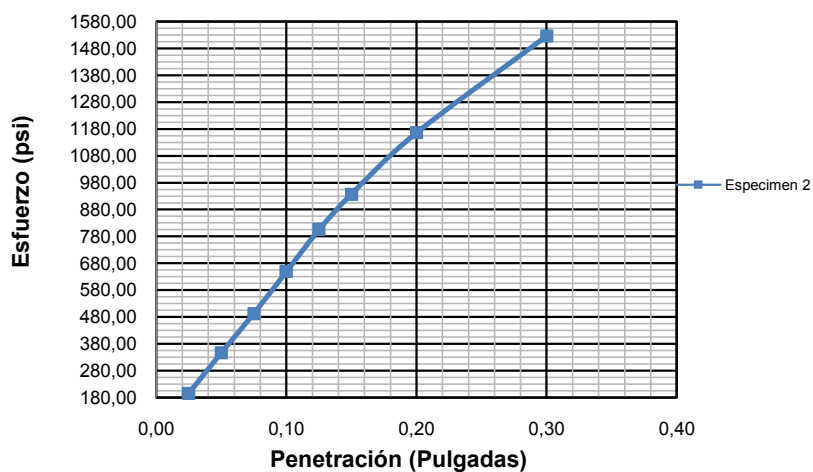
Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)

64,30

Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)

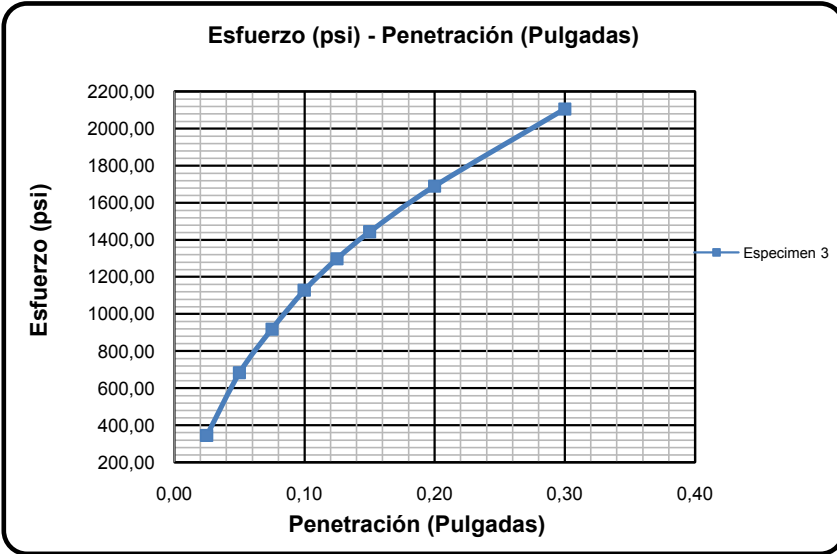


Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)

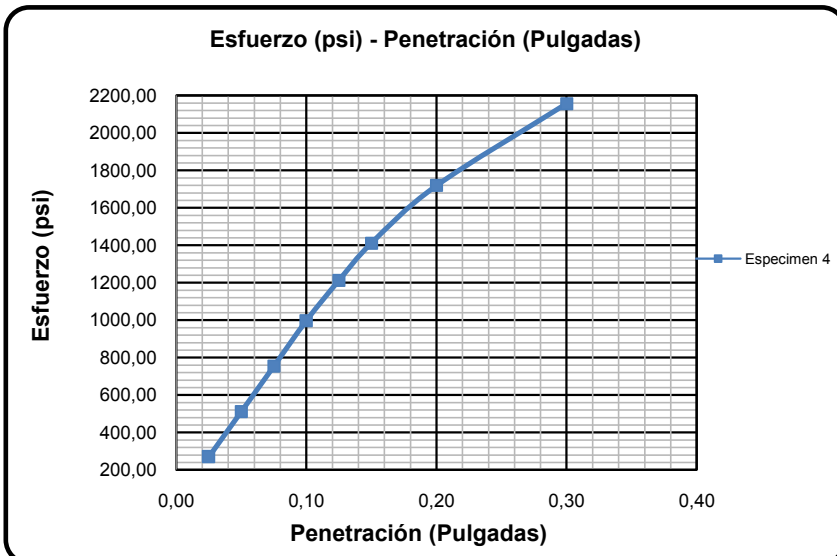
77,73



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

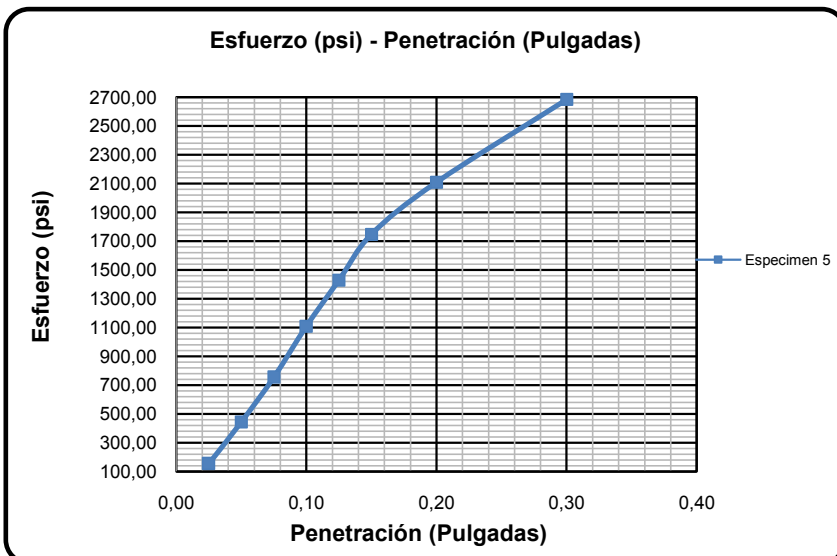
**California Bearing Ratio (Valor C.B.R.) (%)**  
112,85



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R.) (%)**  
114,65



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R.) (%)**  
140,63

## A.2.2 Humedad Teórica del 9%

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS INGENIERÍA CIVIL	
<b>ENSAYOS DE CORRELACIÓN</b>	
<b>PROYECTO:</b>	<u>Monografía - UNAN/Managua</u>
<b>ENSAYO:</b>	<u>E2</u>
<b>DESCRIPCIÓN:</b>	<u>Material de Celda - Mina Orosí</u>
<b>FECHA:</b>	<u>31/10/2008</u>
<b>MUESTRA:</b>	<u>M2</u>
Molde de ensayo:	<u>CBR - 6"</u>
Martillo de ensayo:	<u>Proctor</u>
No de capas:	<u>5</u>
Volumen de molde:	<u>3229,97cm<sup>3</sup></u>
Peso del martillo:	<u>4,54 kg</u>
Humedad teórica:	<u>9,00%</u>
Peso del molde:	<u>4103,50gr</u>
Altura de caída:	<u>18 pulg</u>
Cantidad de agua:	<u>810 cc</u>
Área del pistón:	<u>19,355cm<sup>2</sup></u>
Valor Impacto de Clegg:	<u>5to golpe</u>
Peso total muestra seca:	<u>9000,00gr</u>
Días de inmersión:	<u>0</u>

ENSAYO DE COMPACTACIÓN					
ESPECIMEN Id	1	2	3	4	5
Energía de compactación, golpes	30	40	50	60	70
Peso-tara, gr	50,04	50,22	49,80	50,08	50,58
Peso-tara+suelo humedo, gr	186,31	197,94	172,86	177,74	216,55
Peso-tara+suelo seco, gr	172,79	183,46	160,68	165,16	200,28
Peso-molde+suelo compacto, gr	10967,10	11189,00	11332,90	11329,20	11359,30
<b>Contenido de Humedad, %</b>	<b><u>11,01</u></b>	<b><u>10,87</u></b>	<b><u>10,98</u></b>	<b><u>10,93</u></b>	<b><u>10,87</u></b>
Densidad Húmeda, gr/cm <sup>3</sup>	2,12	2,19	2,24	2,24	2,25
<b>Densidad Seca, gr/cm<sup>3</sup></b>	<b><u>1,914</u></b>	<b><u>1,979</u></b>	<b><u>2,017</u></b>	<b><u>2,017</u></b>	<b><u>2,026</u></b>

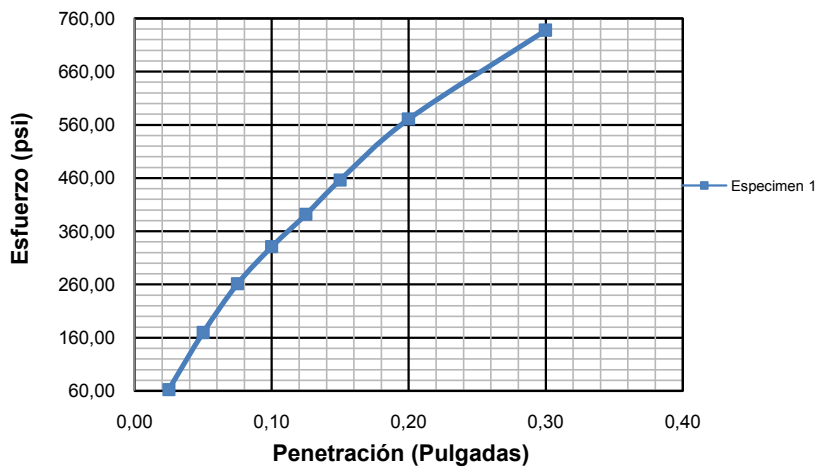
ENSAYOS CON MARTILLO CLEGG					
ESPECIMEN	VALOR IMPACTO DE CLEGG (VIC), (g)				
Id	1er golpe	2do golpe	3er golpe	4to golpe	5to golpe
1	15,80	19,10	20,10	21,70	<b>21,70</b>
2	17,90	20,40	21,80	24,30	<b>24,30</b>
3	18,00	20,30	21,70	23,50	<b>23,50</b>
4	21,00	22,20	23,60	23,60	<b>23,60</b>
5	18,30	22,60	23,70	24,00	<b>24,00</b>

ENSAYO VALOR CBR DE LABORATORIO																			
Penetración		Lectura de Carga			Carga			Esfuerzo			Lectura de Carga			Carga			Esfuerzo		
pulg	mm	0,01 KN	kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi			
ESPECIMEN		1					2					3							
0,025	0,63	0,84	85,66	188,84	4,43	62,95	1,99	202,92	447,37	10,48	149,12	0,72	73,42	161,86	3,79	53,95			
0,050	1,27	2,26	230,46	508,07	11,91	169,36	3,19	325,29	717,14	16,81	239,05	1,57	160,10	352,95	8,27	117,65			
0,075	1,90	3,49	355,88	784,58	18,39	261,53	4,36	444,60	980,17	22,97	326,72	3,05	311,01	685,67	16,07	228,56			
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>4,42</b>	<b>450,71</b>	<b>993,66</b>	<b>23,29</b>	<b>331,22</b>	<b>5,69</b>	<b>580,22</b>	<b>1279,16</b>	<b>29,98</b>	<b>426,39</b>	<b>4,55</b>	<b>463,97</b>	<b>1022,88</b>	<b>23,97</b>	<b>340,96</b>			
0,125	3,17	5,23	533,31	1175,75	27,55	391,92	7,10	724,00	1596,14	37,41	532,05	6,20	632,22	1393,82	32,66	464,61			
0,150	3,81	6,09	621,01	1369,09	32,09	456,36	8,53	869,82	1917,62	44,94	639,21	7,90	805,58	1775,99	41,62	592,00			
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>7,62</b>	<b>777,02</b>	<b>1713,04</b>	<b>40,15</b>	<b>571,01</b>	<b>10,77</b>	<b>1098,23</b>	<b>2421,19</b>	<b>56,74</b>	<b>807,06</b>	<b>10,52</b>	<b>1072,74</b>	<b>2364,99</b>	<b>55,42</b>	<b>788,33</b>			
0,300	7,62	9,84	1003,40	2212,12	51,84	737,37	13,83	1410,27	3109,11	72,86	1036,37	14,71	1500,00	3306,94	77,50	1102,31			
Ensayo No	1					2					3								
Corrección	-					-					-								
C.B.R. a 0,1"	33,12%					42,64%					47,44%								
C.B.R. a 0,2"	38,07%					53,80%					55,49%								

ENSAYO VALOR CBR DE LABORATORIO											
Penetración		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo		Lectura de Carga		Esfuerzo	
pulg	mm	0,01 KN	kg	lb	kg/cm2	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm2	psi
ESPECIMEN				4				5			
0,025	0,63	1,11	113,19	249,54	5,85	83,18	1,49	151,94	334,97	7,85	111,66
0,050	1,27	2,91	296,74	654,19	15,33	218,06	3,35	341,60	753,11	17,65	251,04
0,075	1,90	4,21	429,30	946,45	22,18	315,48	4,95	504,76	1112,80	26,08	370,93
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>5,67</b>	<b>578,18</b>	<b>1274,67</b>	<b>29,87</b>	<b>424,89</b>	<b>6,95</b>	<b>708,70</b>	<b>1562,42</b>	<b>36,62</b>	<b>520,81</b>
0,125	3,17	7,16	730,12	1609,63	37,72	536,54	8,77	894,29	1971,57	46,20	657,19
0,150	3,81	8,67	884,09	1949,09	45,68	649,70	10,45	1065,60	2349,25	55,06	783,08
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>11,40</b>	<b>1162,48</b>	<b>2562,82</b>	<b>60,06</b>	<b>854,27</b>	<b>13,06</b>	<b>1331,75</b>	<b>2936,00</b>	<b>68,81</b>	<b>978,67</b>
0,300	7,62	15,15	1544,87	3405,86	79,82	1135,29	16,78	1711,08	3772,29	88,41	1257,43
Ensayo No				4				5			
Corrección				-				-			
C.B.R. a 0,1"				42,49%				52,08%			
C.B.R. a 0,2"				56,95%				65,24%			

Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)



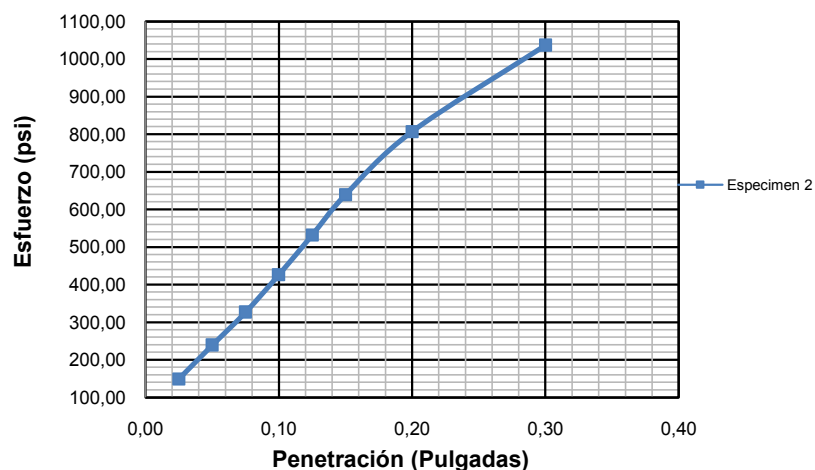
Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)

38,07

Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)



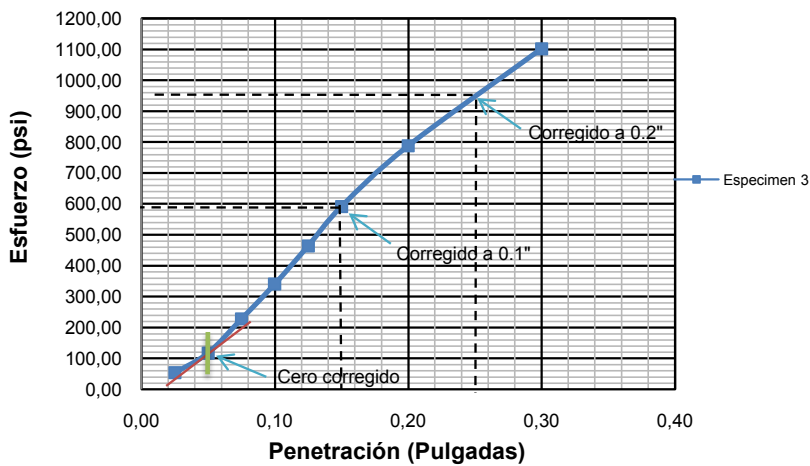
Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)

53,80

**Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)**

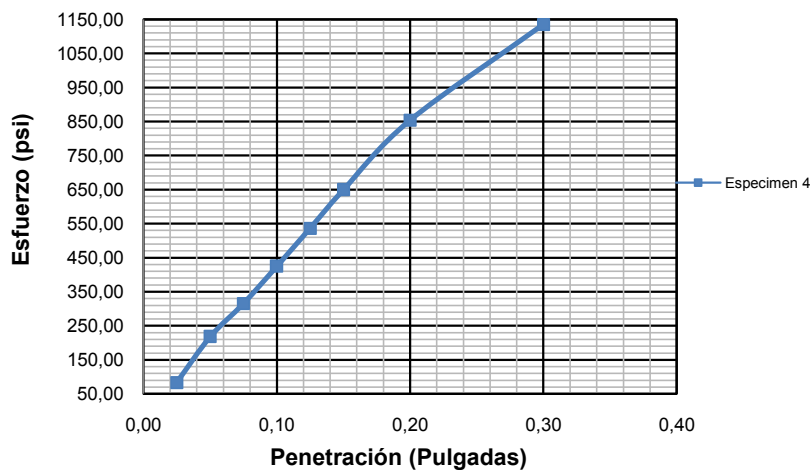


Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	117,650	0,050
Penetración a 0,1"	592,000	0,150
Penetración a 0,2"	950,000	0,250

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	474,350	47,44
0.2"	832,350	55,49

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)**  
55,49

**Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)**

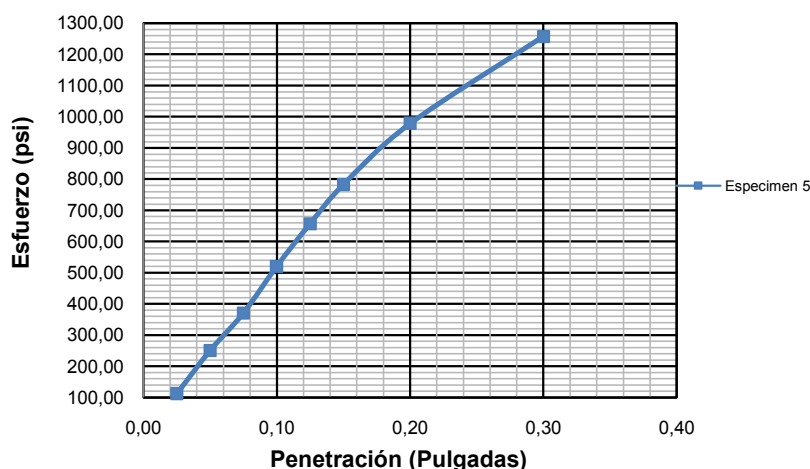


Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)**  
56,95

**Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)**



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)**  
65,24

## A.2.3 Humedad Teórica del 11.40%

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS INGENIERÍA CIVIL	
<b>ENSAYOS DE CORRELACIÓN</b>	
<b>PROYECTO:</b>	Monografía - UNAN/Managua
<b>ENSAYO:</b>	E4
<b>DESCRIPCIÓN:</b>	Material de Celda - Mina Orosí
<b>FECHA:</b>	01/11/2008
<b>MUESTRA:</b>	M4
Molde de ensayo:	CBR - 6"
Martillo de ensayo:	Proctor
No de capas:	5
Volumen de molde:	3229,97cm <sup>3</sup>
Peso del martillo:	4,54 kg
Humedad teórica:	11,40%
Peso del molde:	4103,50gr
Altura de caída:	18 pulg
Cantidad de agua:	1026 cc
Área del pistón:	19,355cm <sup>2</sup>
Valor Impacto de Clegg:	5to golpe
Peso total muestra seca:	9000,00gr
Días de inmersión:	0

ENSAYO DE COMPACTACIÓN					
ESPECIMEN Id	1	2	3	4	5
Energía de compactación, golpes	30	40	50	60	70
Peso-tara, gr	50,33	50,22	49,08	50,00	50,00
Peso-tara+suelo humedo, gr	178,07	164,93	212,55	207,06	204,22
Peso-tara+suelo seco, gr	163,33	152,46	194,60	189,79	188,01
Peso-molde+suelo compacto, gr	10990,10	11079,40	11201,10	11254,10	11365,00
<b>Contenido de Humedad, %</b>	<b>13,04</b>	<b>12,20</b>	<b>12,34</b>	<b>12,35</b>	<b>11,75</b>
Densidad Húmeda, gr/cm <sup>3</sup>	2,13	2,16	2,20	2,21	2,25
<b>Densidad Seca, gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>1,886</b>	<b>1,925</b>	<b>1,956</b>	<b>1,970</b>	<b>2,012</b>

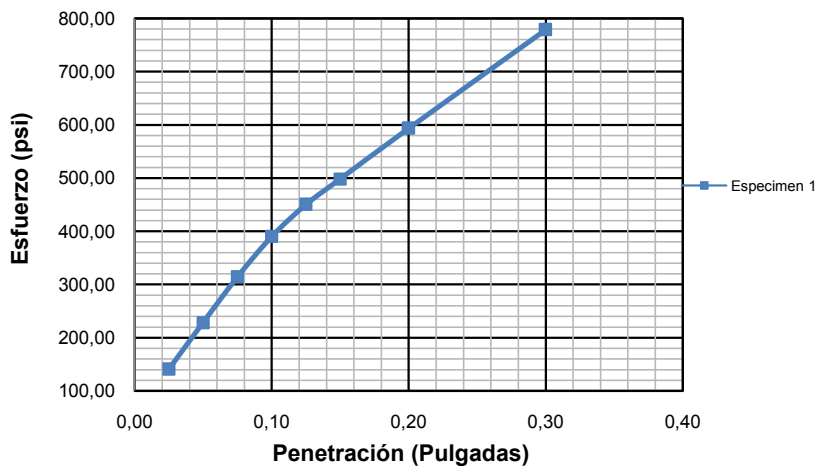
ENSAYOS CON MARTILLO CLEGG					
ESPECIMEN	VALOR IMPACTO DE CLEGG (VIC), (g)				
Id	1er golpe	2do golpe	3er golpe	4to golpe	5to golpe
1	16,00	18,40	19,60	19,60	<b>19,60</b>
2	16,30	18,80	19,40	20,10	<b>20,80</b>
3	14,10	16,70	17,80	18,80	<b>18,80</b>
4	15,80	18,20	18,30	18,30	<b>18,30</b>
5	17,00	17,90	19,70	21,50	<b>21,50</b>

ENSAYO VALOR CBR DE LABORATORIO																			
Penetración		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo	
		pulg	mm	0,01 KN	kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi	
ESPECIMEN		1						2						3					
0,025	0,63	1,88	191,71	422,64	9,90	140,88	1,93	196,81	433,88	10,17	144,63	1,60	163,15	359,69	8,43	119,90			
0,050	1,27	3,05	311,01	685,67	16,07	228,56	3,20	326,31	719,39	16,86	239,80	3,17	323,25	712,64	16,70	237,55			
0,075	1,90	4,20	428,28	944,20	22,13	314,73	4,42	450,71	993,66	23,29	331,22	4,40	448,68	989,16	23,18	329,72			
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>5,21</b>	<b>531,27</b>	<b>1171,25</b>	<b>27,45</b>	<b>390,42</b>	<b>5,44</b>	<b>554,73</b>	<b>1222,96</b>	<b>28,66</b>	<b>407,65</b>	<b>5,79</b>	<b>590,42</b>	<b>1301,64</b>	<b>30,50</b>	<b>433,88</b>			
0,125	3,17	6,01	612,85	1351,10	31,66	450,37	6,58	670,97	1479,24	34,67	493,08	7,11	725,02	1598,39	37,46	532,80			
0,150	3,81	6,65	678,11	1494,98	35,04	498,33	7,55	769,89	1697,31	39,78	565,77	8,20	836,17	1843,43	43,20	614,48			
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>7,92</b>	<b>807,62</b>	<b>1780,49</b>	<b>41,73</b>	<b>593,50</b>	<b>9,17</b>	<b>935,08</b>	<b>2061,50</b>	<b>48,31</b>	<b>687,17</b>	<b>10,03</b>	<b>1022,78</b>	<b>2254,83</b>	<b>52,84</b>	<b>751,61</b>			
0,300	7,62	10,39	1059,48	2335,76	54,74	778,59	11,45	1167,57	2574,06	60,32	858,02	12,37	1261,39	2780,89	65,17	926,96			
Ensayo No	1						2						3						
Corrección	-						-						-						
C.B.R. a 0,1"	39,04%						40,77%						43,39%						
C.B.R. a 0,2"	39,57%						45,81%						50,11%						

ENSAYO VALOR CBR DE LABORATORIO																	
Penetración		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo					
pulg	mm	0,01 KN	kg	lb	kg/cm2	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm2	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm2	psi	
ESPECIMEN 4						ESPECIMEN 5											
0,025	0,63	1,75	178,45	393,42	9,22	131,14	0,60	61,18	134,89	3,16	44,96						
0,050	1,27	2,99	304,90	672,18	15,75	224,06	1,96	199,86	440,63	10,33	146,88						
0,075	1,90	4,11	419,10	923,96	21,65	307,99	3,23	329,37	726,13	17,02	242,04						
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>5,28</b>	<b>538,41</b>	<b>1186,99</b>	<b>27,82</b>	<b>395,66</b>	<b>4,48</b>	<b>456,83</b>	<b>1007,14</b>	<b>23,60</b>	<b>335,71</b>						
0,125	3,17	6,34	646,50	1425,29	33,40	475,10	5,80	591,44	1303,89	30,56	434,63						
0,150	3,81	7,24	738,27	1627,62	38,14	542,54	7,12	726,04	1600,64	37,51	533,55						
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>8,91</b>	<b>908,57</b>	<b>2003,05</b>	<b>46,94</b>	<b>667,68</b>	<b>9,33</b>	<b>951,40</b>	<b>2097,47</b>	<b>49,16</b>	<b>699,16</b>						
0,300	7,62	11,37	1159,42	2556,08	59,90	852,03	12,53	1277,70	2816,86	66,01	938,95						
Ensayo No						4						5					
Corrección						-						-					
C.B.R. a 0,1"						39,57%						33,57%					
C.B.R. a 0,2"						44,51%						46,61%					

Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)



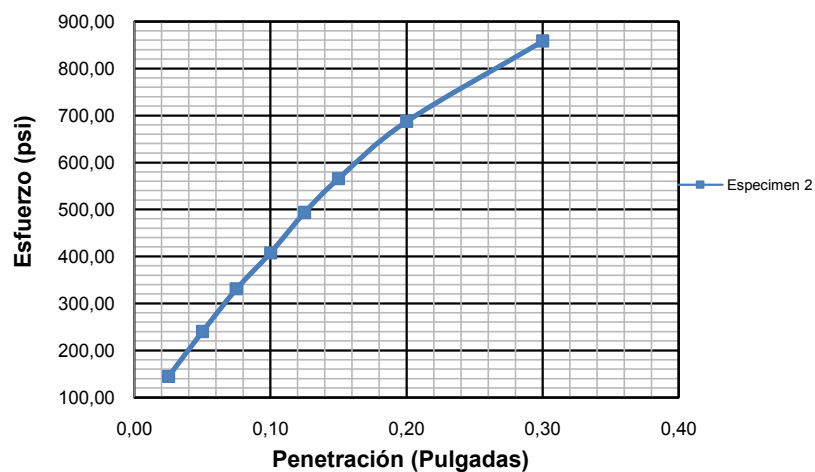
Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)

39,57

Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)

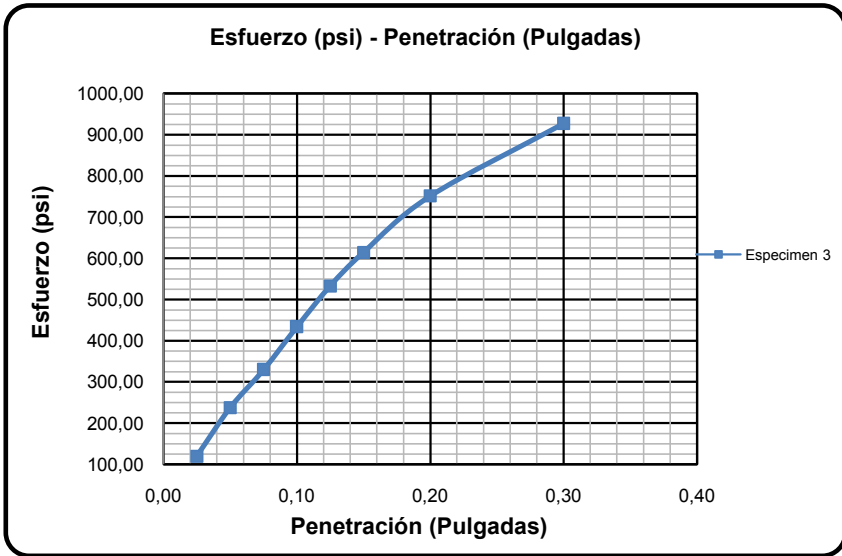


Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)

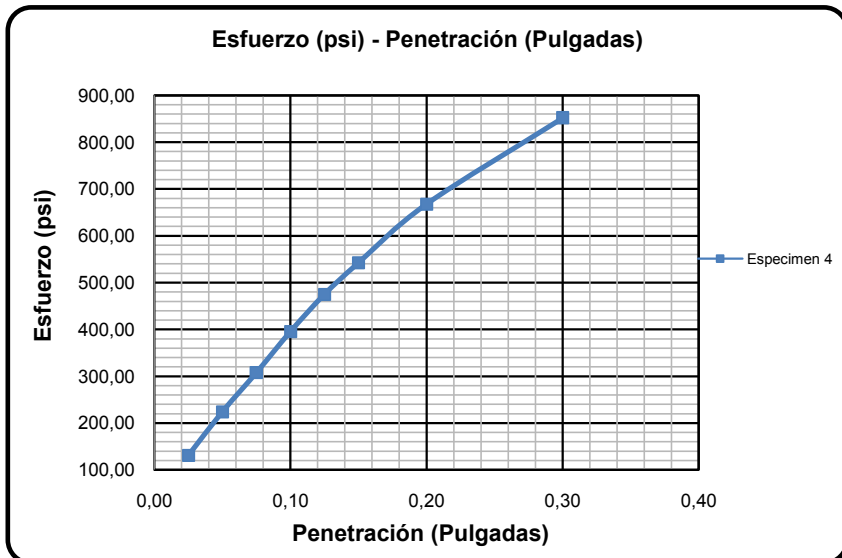
45,81



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

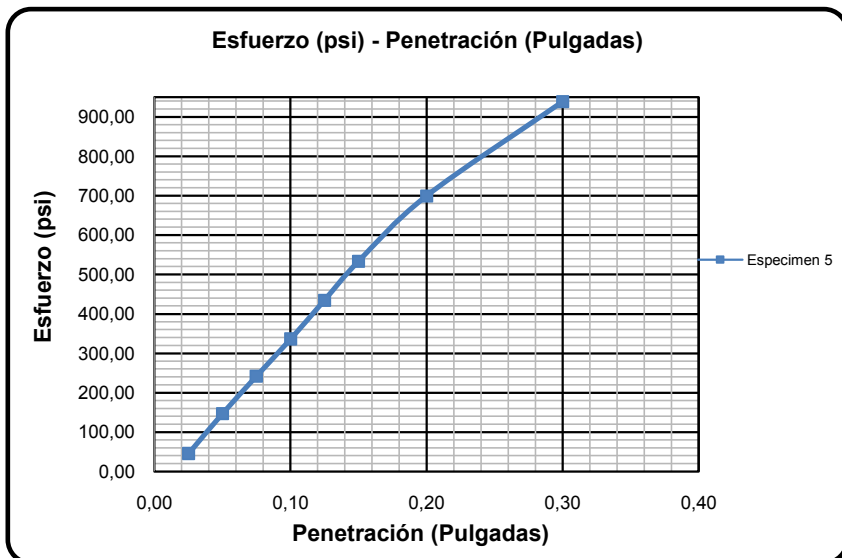
**California Bearing Ratio (Valor C.B.R.) (%)**  
50,11



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R.) (%)**  
44,51



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R.) (%)**  
46,61



## A.2.4 Humedad Teórica del 12%

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS INGENIERÍA CIVIL	
<b>ENSAYOS DE CORRELACIÓN</b>	
<b>PROYECTO:</b>	Monografía - UNAN/Managua
<b>ENSAYO:</b>	E3
<b>DESCRIPCIÓN:</b>	Material de Celda - Mina Orosí
<b>FECHA:</b>	01/11/2008
<b>MUESTRA:</b>	M3
Molde de ensayo:	CBR - 6"
Volumen de molde:	3229,97cm <sup>3</sup>
Peso del molde:	4103,50gr
Área del pistón:	19,355cm <sup>2</sup>
Días de inmersión:	0
Martillo de ensayo:	Proctor
Peso del martillo:	4,54 kg
Altura de caída:	18 pulg
Valor Impacto de Clegg:	5to golpe
No de capas:	5
Humedad teórica:	12,00%
Cantidad de agua:	1080 cc
Peso total muestra seca:	9000,00gr

ENSAYO DE COMPACTACIÓN					
ESPECIMEN Id	1	2	3	4	5
Energía de compactación, golpes	30	40	50	60	70
Peso-tara, gr	50,44	49,83	49,69	49,95	49,62
Peso-tara+suelo humedo, gr	166,94	184,89	193,22	189,75	214,03
Peso-tara+suelo seco, gr	152,57	167,38	174,84	172,51	193,79
Peso-molde+suelo compacto, gr	11012,80	11167,90	11178,10	11197,40	11228,70
<b>Contenido de Humedad, %</b>	<b>14,07</b>	<b>14,90</b>	<b>14,69</b>	<b>14,07</b>	<b>14,04</b>
Densidad Húmeda, gr/cm <sup>3</sup>	2,14	2,19	2,19	2,20	2,21
<b>Densidad Seca, gr/cm<sup>3</sup></b>	<b>1,875</b>	<b>1,904</b>	<b>1,910</b>	<b>1,925</b>	<b>1,934</b>

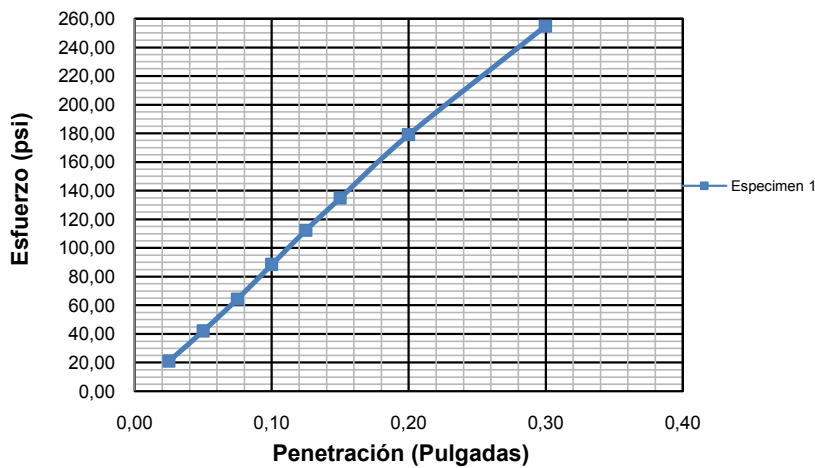
ENSAYOS CON MARTILLO CLEGG					
ESPECIMEN	VALOR IMPACTO DE CLEGG (VIC), (g)				
Id	1er golpe	2do golpe	3er golpe	4to golpe	5to golpe
1	5,60	6,80	7,20	8,30	<b>8,30</b>
2	5,30	5,90	7,00	7,30	<b>7,70</b>
3	5,30	5,90	6,80	7,20	<b>7,50</b>
4	5,70	6,50	7,20	7,70	<b>7,70</b>
5	5,20	6,60	7,20	8,60	<b>8,60</b>

ENSAYO VALOR CBR DE LABORATORIO																			
Penetración		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo	
pulg	mm	0,01 KN		kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN		kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi	0,01 KN		kg	lb	kg/cm <sup>2</sup>	psi
ESPECIMEN		1				2				3									
0,025	0,63	0,28	28,55	62,95	1,48	20,98	0,11	11,22	24,73	0,58	8,24	0,14	14,28	31,47	0,74	10,49			
0,050	1,27	0,56	57,10	125,89	2,95	41,96	0,27	27,53	60,70	1,42	20,23	0,37	37,73	83,18	1,95	27,73			
0,075	1,90	0,86	87,70	193,34	4,53	64,45	0,46	46,91	103,41	2,42	34,47	0,57	58,12	128,14	3,00	42,71			
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>1,18</b>	<b>120,33</b>	<b>265,27</b>	<b>6,22</b>	<b>88,42</b>	<b>0,66</b>	<b>67,30</b>	<b>148,37</b>	<b>3,48</b>	<b>49,46</b>	<b>0,76</b>	<b>77,50</b>	<b>170,85</b>	<b>4,00</b>	<b>56,95</b>			
0,125	3,17	1,50	152,96	337,21	7,90	112,40	0,89	90,75	200,08	4,69	66,69	0,97	98,91	218,06	5,11	72,69			
0,150	3,81	1,80	183,55	404,66	9,48	134,89	1,12	114,21	251,79	5,90	83,93	1,19	121,35	267,52	6,27	89,17			
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>2,39</b>	<b>243,71</b>	<b>537,29</b>	<b>12,59</b>	<b>179,10</b>	<b>1,53</b>	<b>156,02</b>	<b>343,96</b>	<b>8,06</b>	<b>114,65</b>	<b>1,64</b>	<b>167,23</b>	<b>368,69</b>	<b>8,64</b>	<b>122,90</b>			
0,300	7,62	3,40	346,70	764,35	17,91	254,78	2,32	236,57	521,56	12,22	173,85	2,48	252,89	557,53	13,07	185,84			
Ensayo No	1				2				3										
Corrección	-				0,075				-										
C.B.R. a 0,1"	8,84%				6,55%				5,70%										
C.B.R. a 0,2"	11,94%				8,37%				8,19%										

ENSAYO VALOR CBR DE LABORATORIO											
Penetración		Lectura de Carga		Carga		Esfuerzo		Lectura de Carga		Esfuerzo	
pulg	mm	0,01 KN	kg	lb	kg/cm2	psi	0,01 KN	kg	lb	kg/cm2	psi
ESPECIMEN		4					5				
0,025	0,63	0,12	12,24	26,98	0,63	8,99	0,14	14,28	31,47	0,74	10,49
0,050	1,27	0,25	25,49	56,20	1,32	18,73	0,29	29,57	65,19	1,53	21,73
0,075	1,90	0,36	36,71	80,93	1,90	26,98	0,49	49,97	110,16	2,58	36,72
<b>0,100</b>	<b>2,54</b>	<b>0,48</b>	<b>48,95</b>	<b>107,91</b>	<b>2,53</b>	<b>35,97</b>	<b>0,73</b>	<b>74,44</b>	<b>164,11</b>	<b>3,85</b>	<b>54,70</b>
0,125	3,17	0,63	64,24	141,63	3,32	47,21	0,96	97,89	215,82	5,06	71,94
0,150	3,81	0,75	76,48	168,61	3,95	56,20	1,22	124,41	274,27	6,43	91,42
<b>0,200</b>	<b>5,08</b>	<b>1,03</b>	<b>105,03</b>	<b>231,55</b>	<b>5,43</b>	<b>77,18</b>	<b>1,64</b>	<b>167,23</b>	<b>368,69</b>	<b>8,64</b>	<b>122,90</b>
0,300	7,62	1,59	162,13	357,45	8,38	119,15	2,34	238,61	526,05	12,33	175,35
Ensayo No		4					5				
Corrección		-					0,075				
C.B.R. a 0,1"		3,60%					7,13%				
C.B.R. a 0,2"		5,15%					8,45%				

Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)



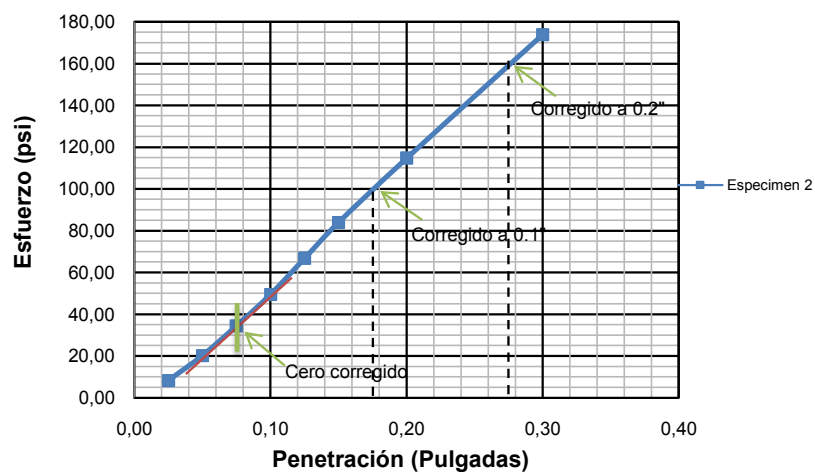
Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)

11,94

Esfuerzo (psi) - Penetración (Pulgadas)

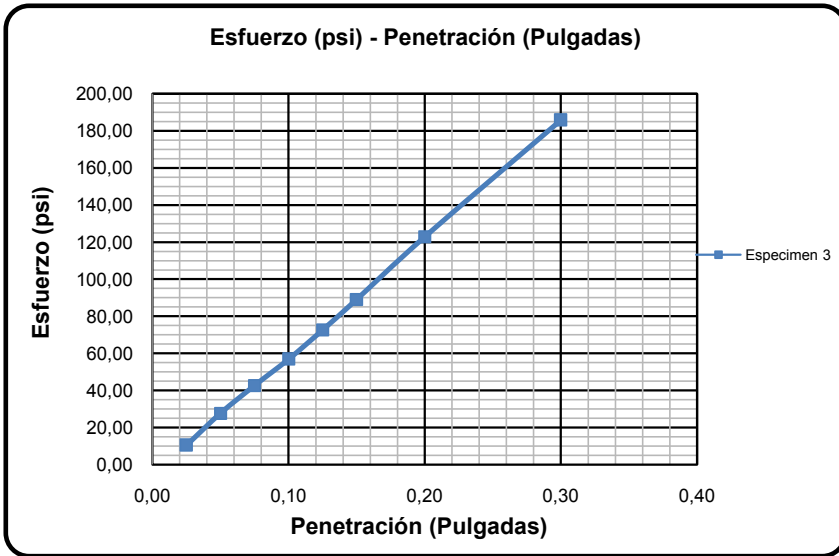


Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	34,470	0,075
Penetración a 0,1"	100,000	0,175
Penetración a 0,2"	160,000	0,275

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	65,530	6,553
0.2"	125,530	8,369

California Bearing Ratio (Valor C.B.R) (%)

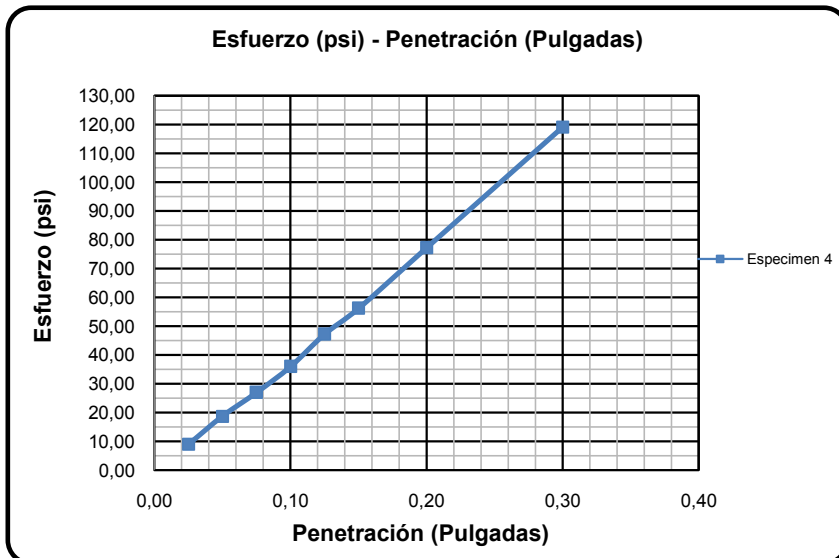
8,37



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

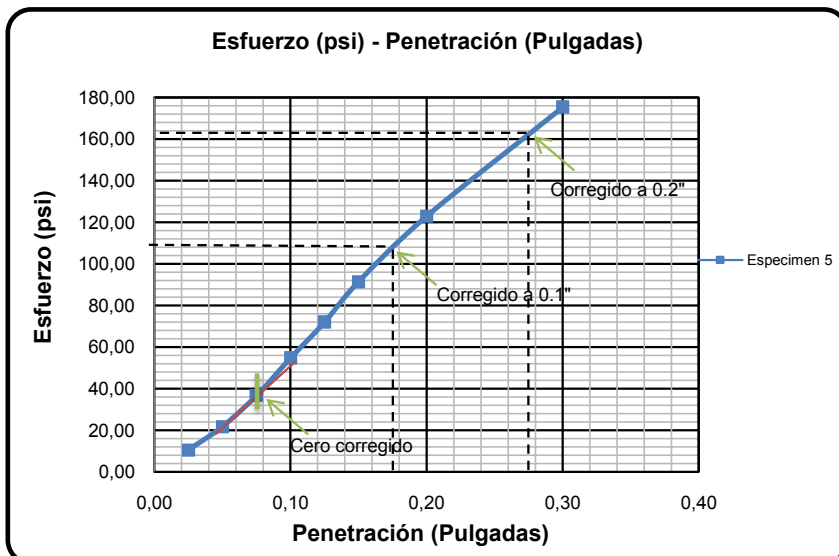
**California Bearing Ratio (Valor C.B.R.) (%)**  
8,19



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	-	-
Penetración a 0,1"	-	-
Penetración a 0,2"	-	-

Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	-	-
0.2"	-	-

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R.) (%)**  
5,15



Coordenadas corregidas de	Esfuerzo psi	Penetración pulg
Punto Cero	36,720	0,075
Penetración a 0,1"	108,000	0,175
Penetración a 0,2"	163,500	0,275

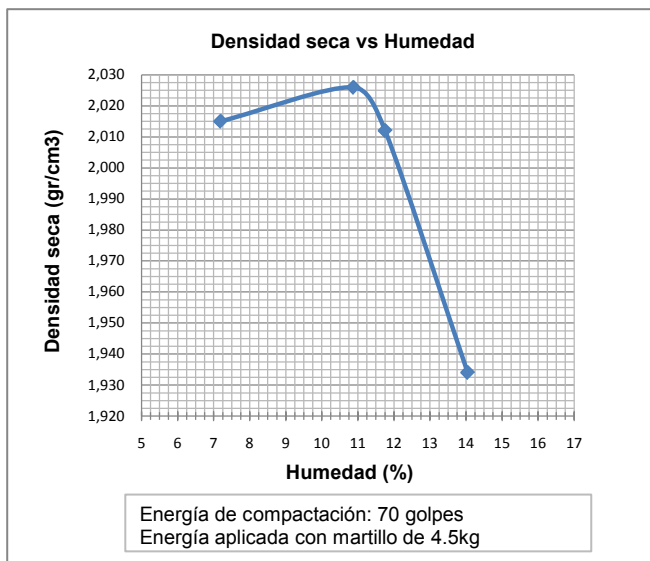
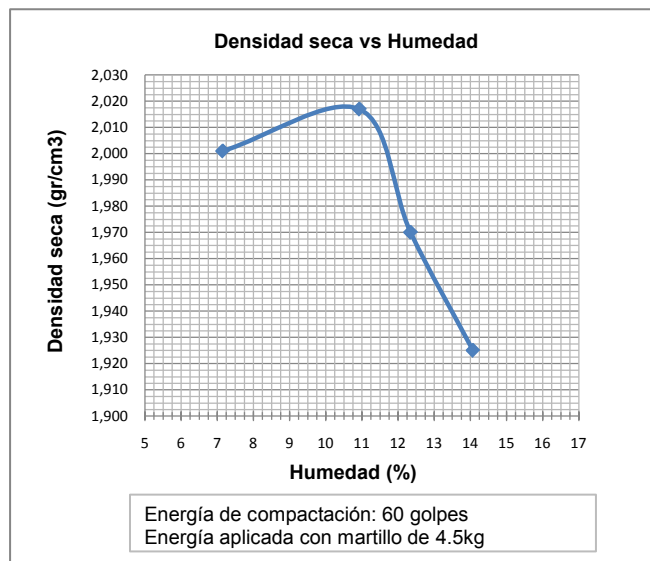
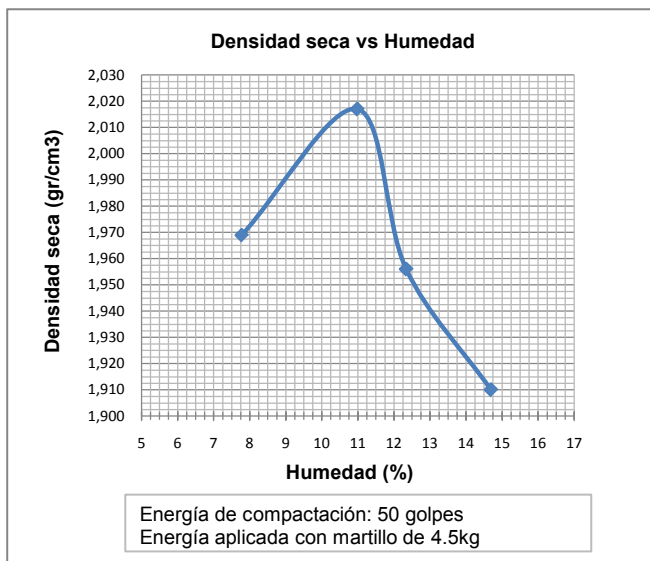
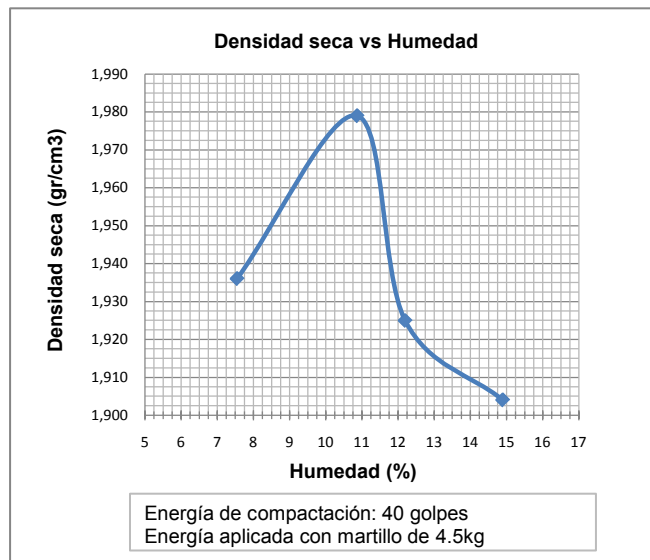
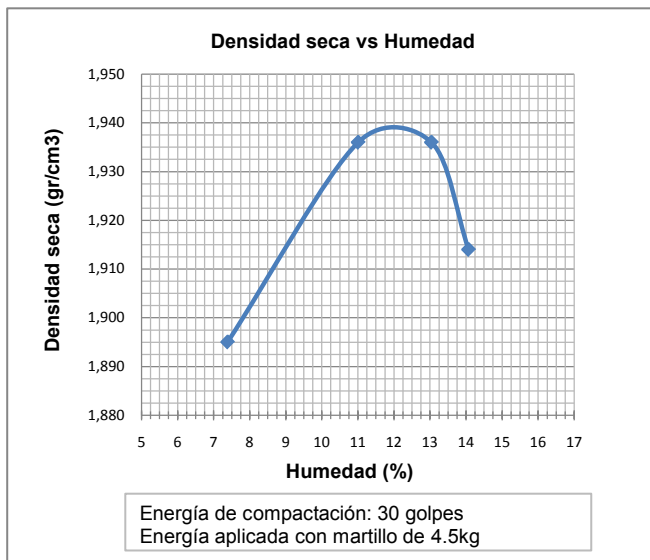
Valores corregidos a la penetración de	Esfuerzo psi	CBR %
0.1"	71,280	7,128
0.2"	126,780	8,452

**California Bearing Ratio (Valor C.B.R.) (%)**  
8,45

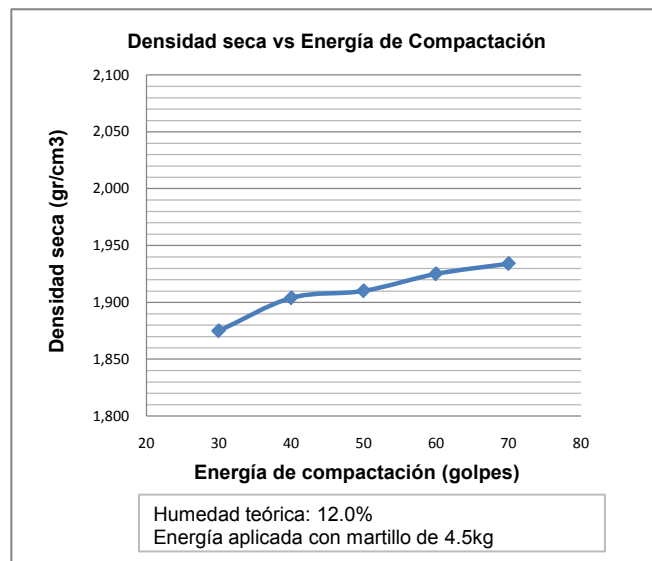
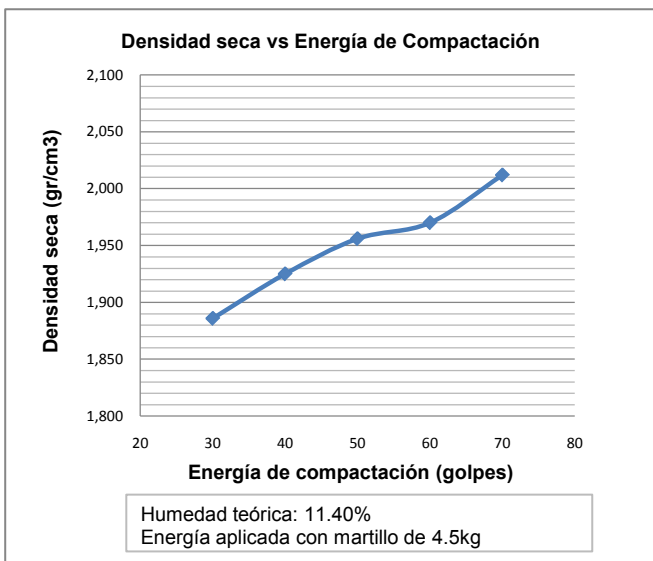
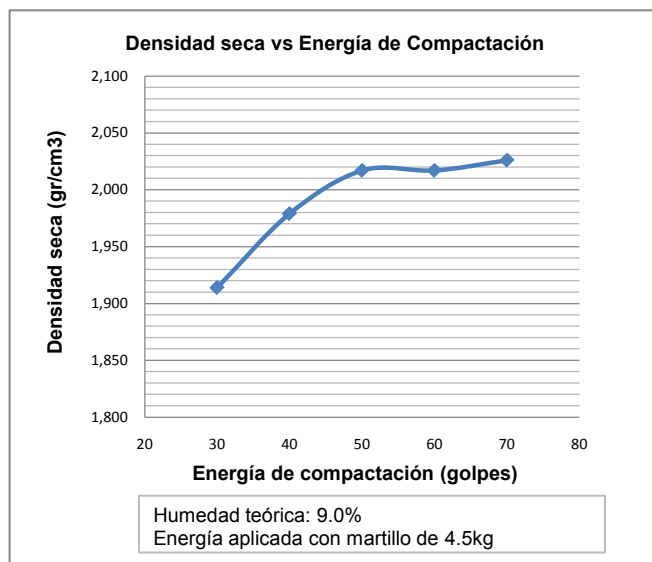
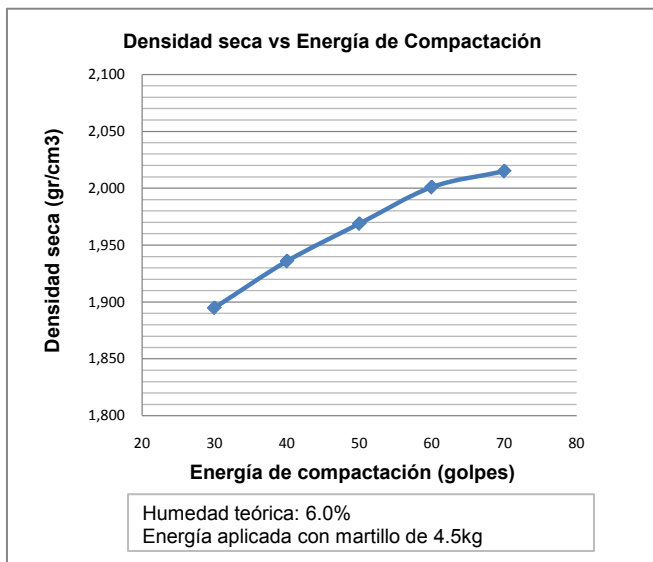
# ANEXO 3

## Gráficas de ensayos de correlación-regresión

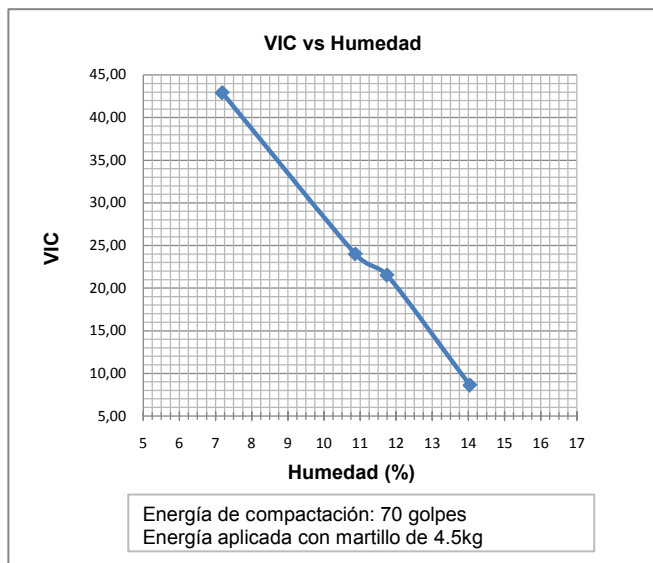
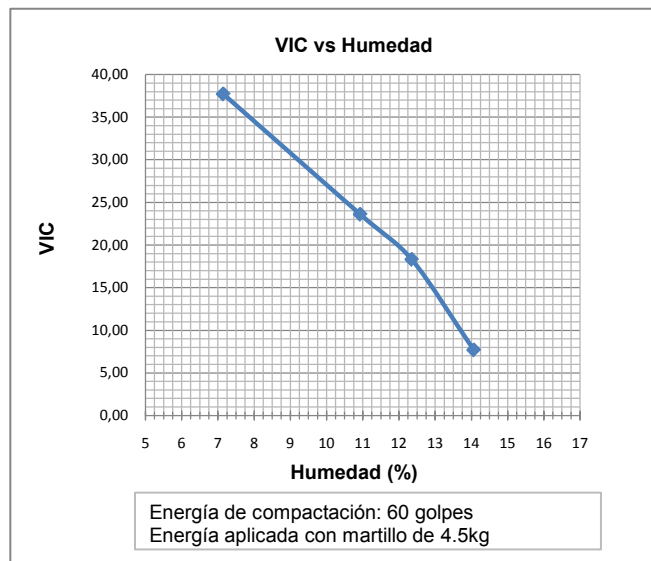
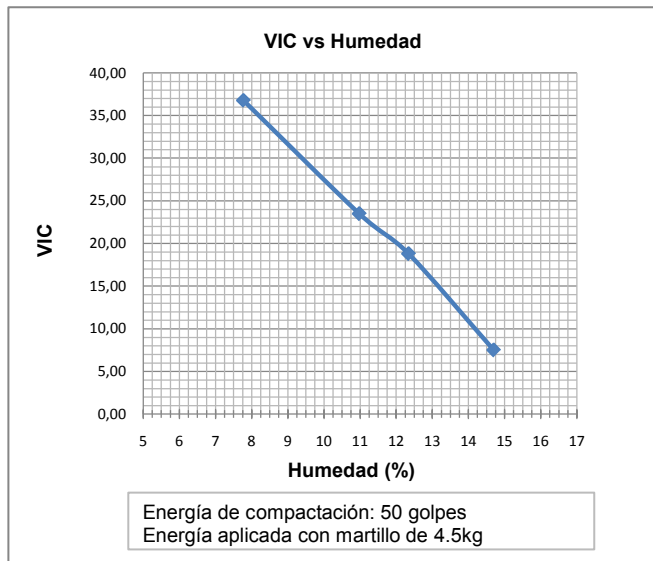
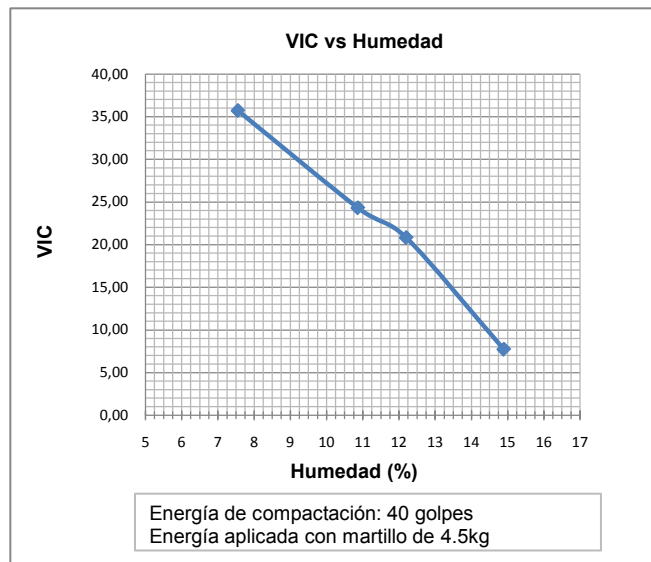
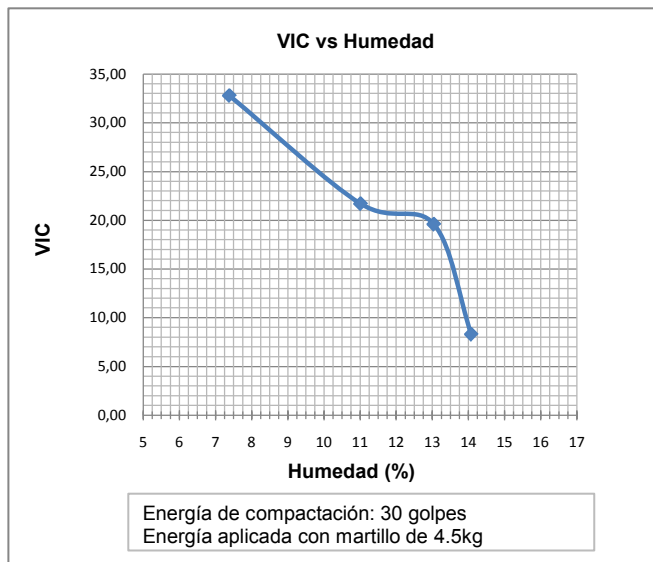
A.3.1 - Gráficas densidad seca vs humedad



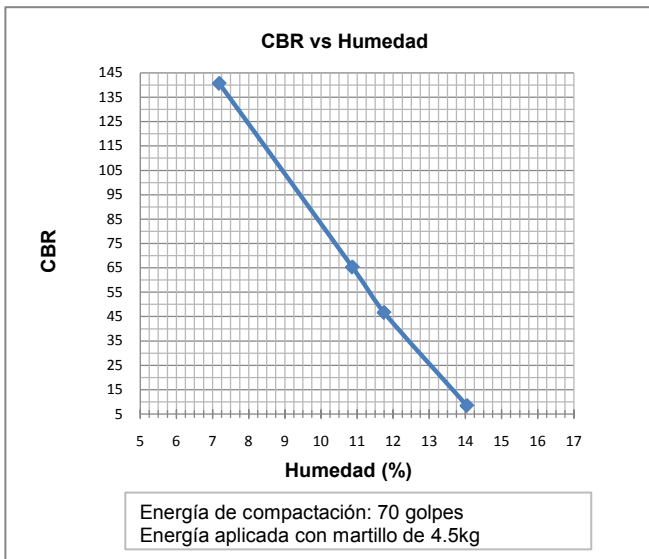
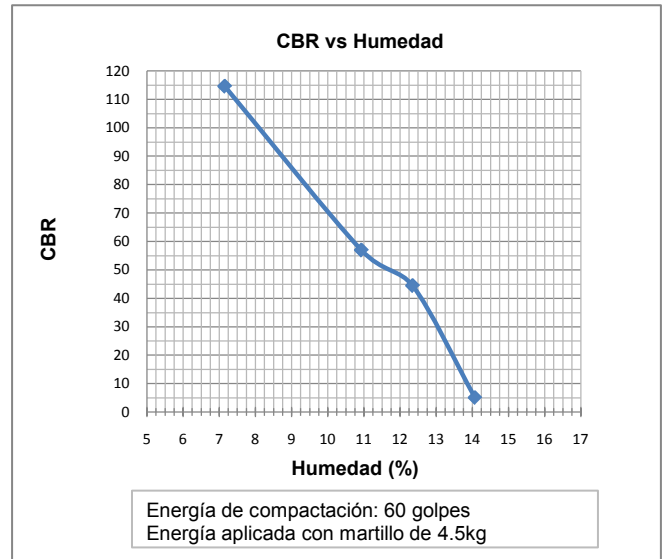
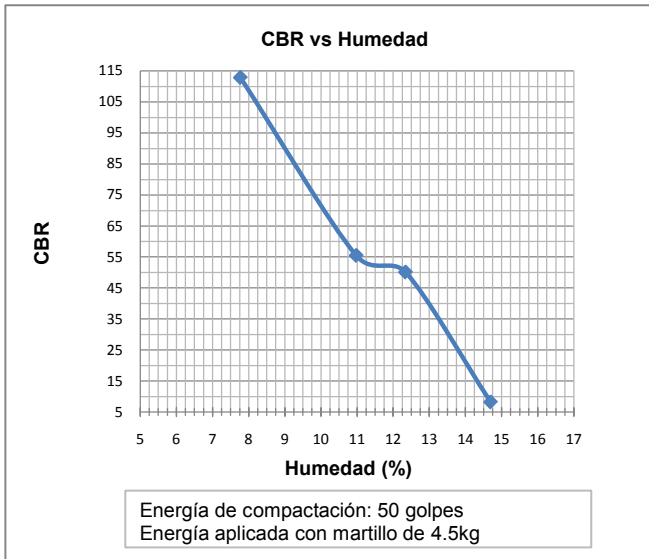
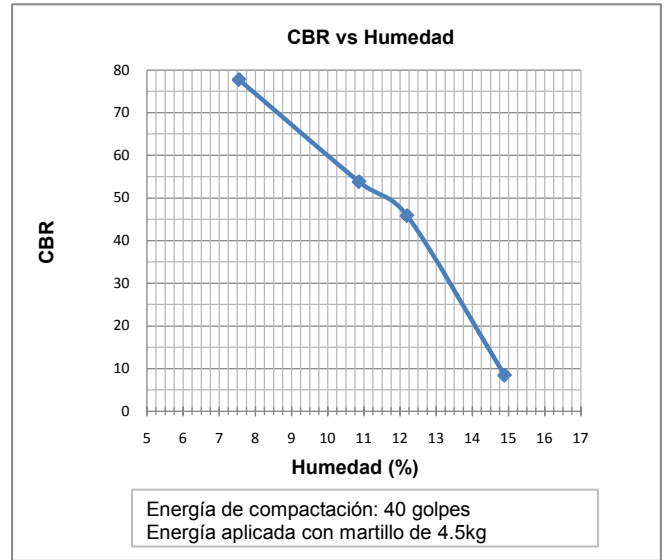
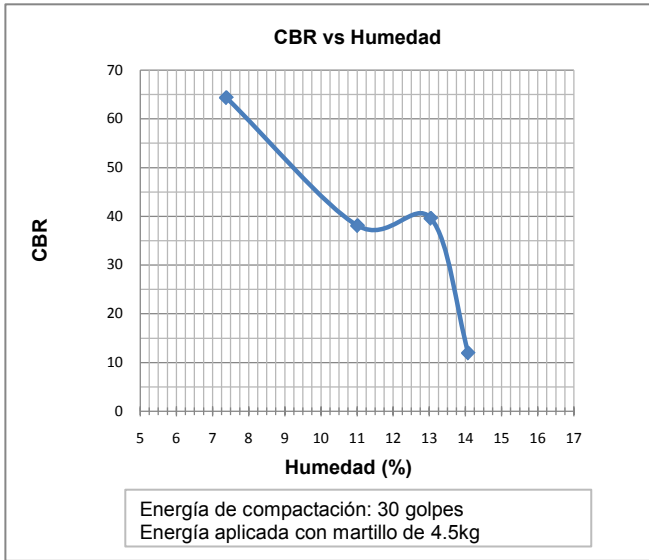
A.3.2 - Gráficas densidad seca vs energía de compactación



A.3.3 - Gráficas VIC vs humedad

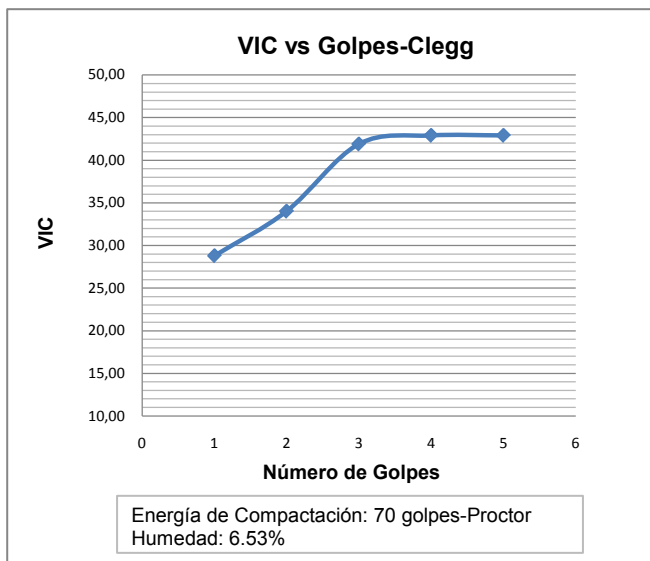
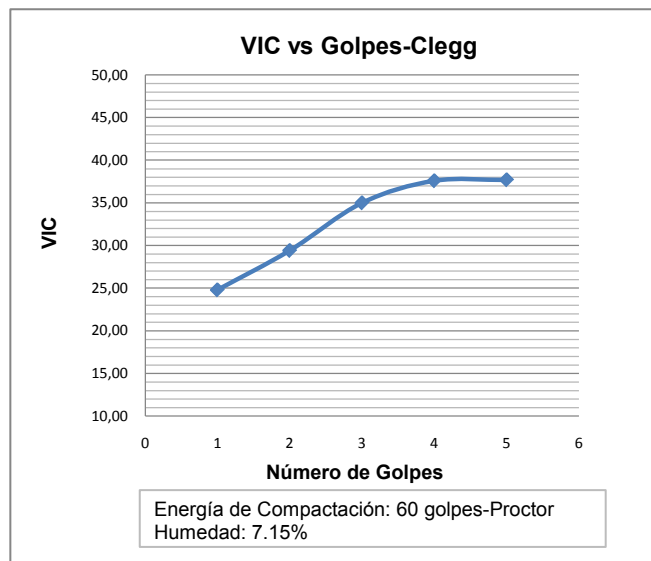
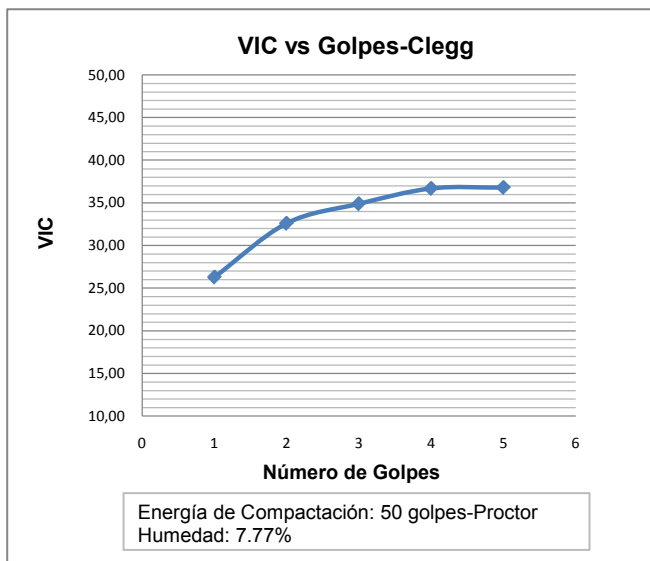
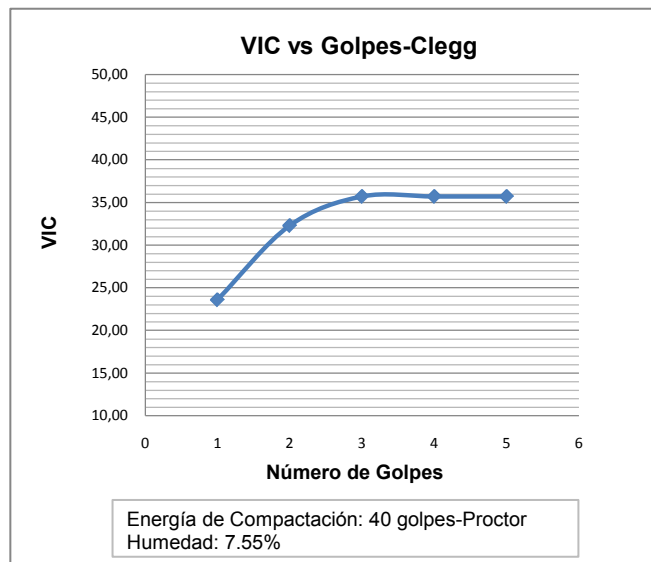
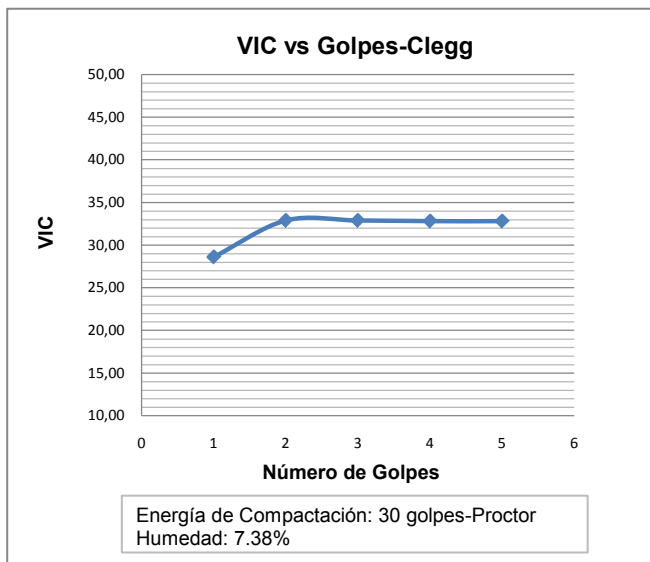


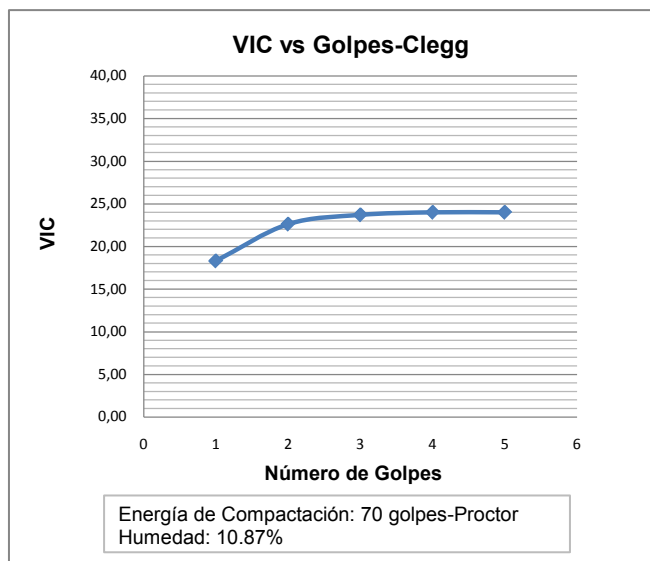
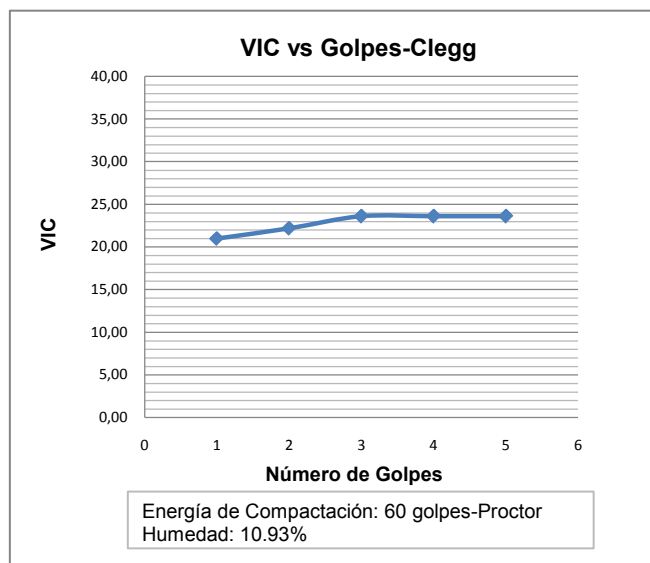
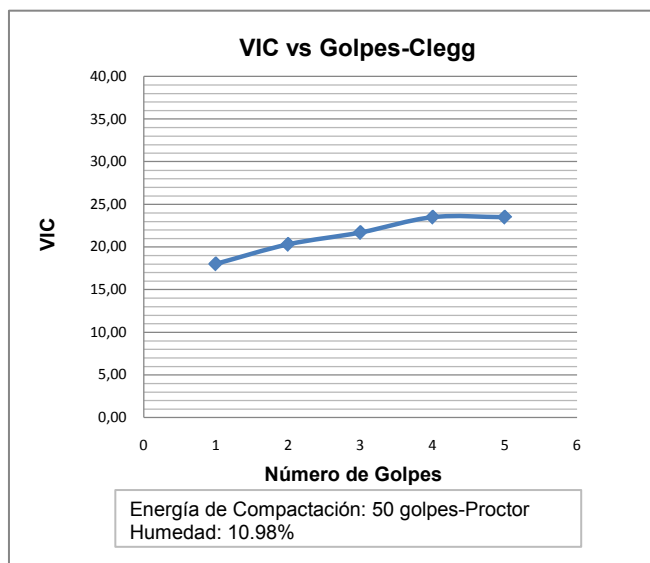
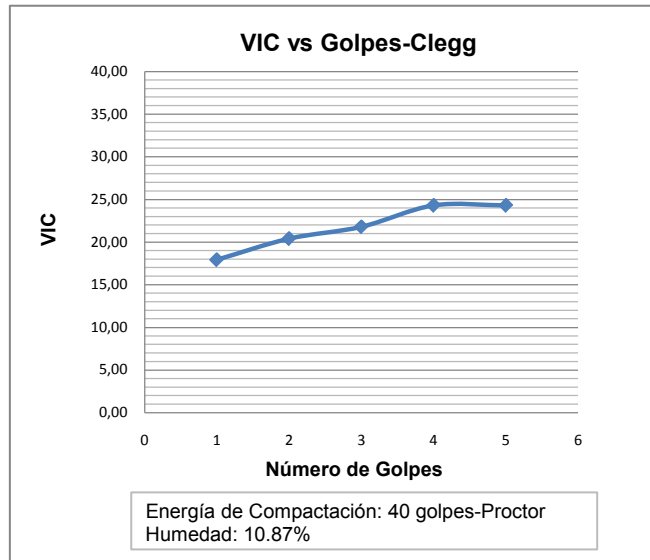
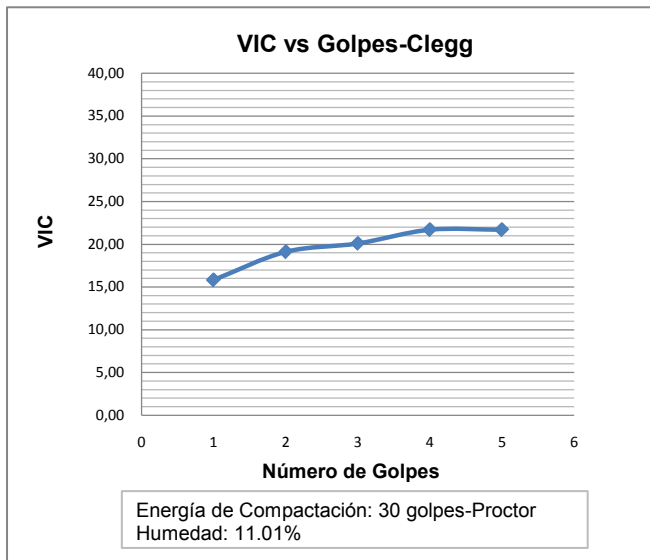
A.3.4 - Gráficas CBR vs humedad

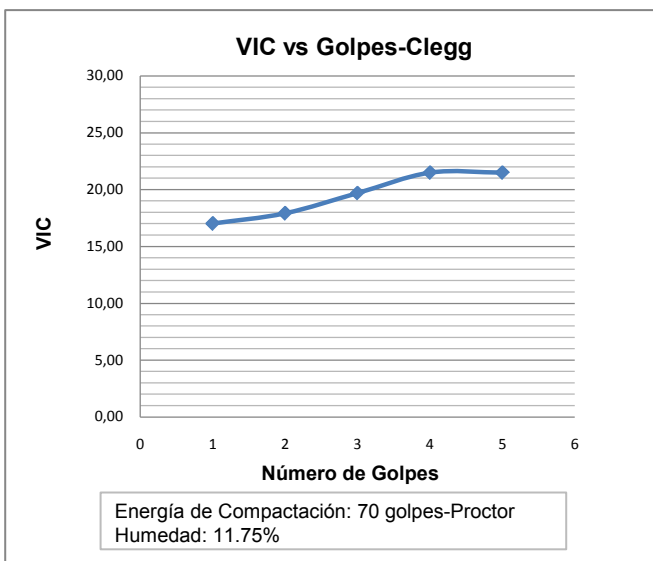
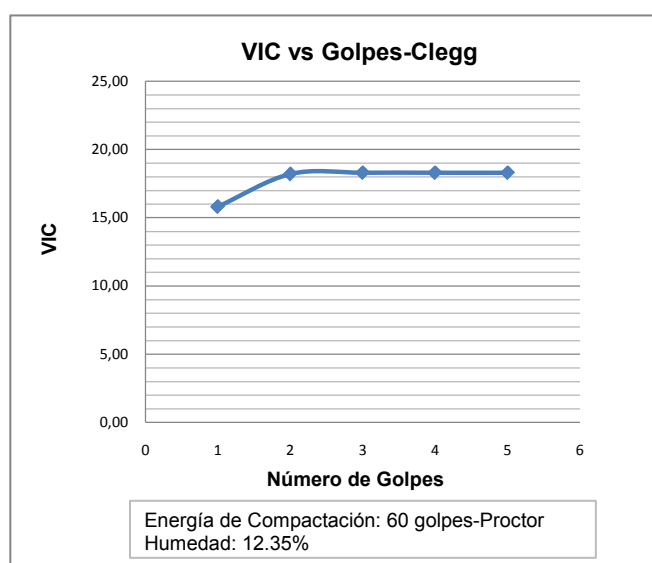
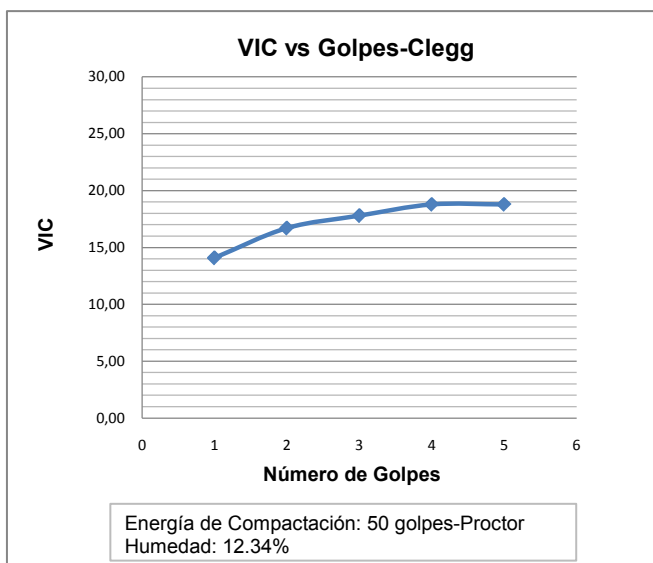
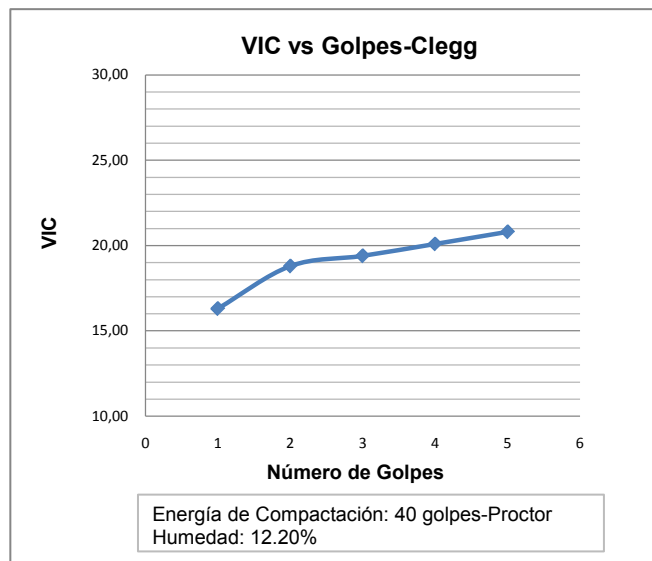
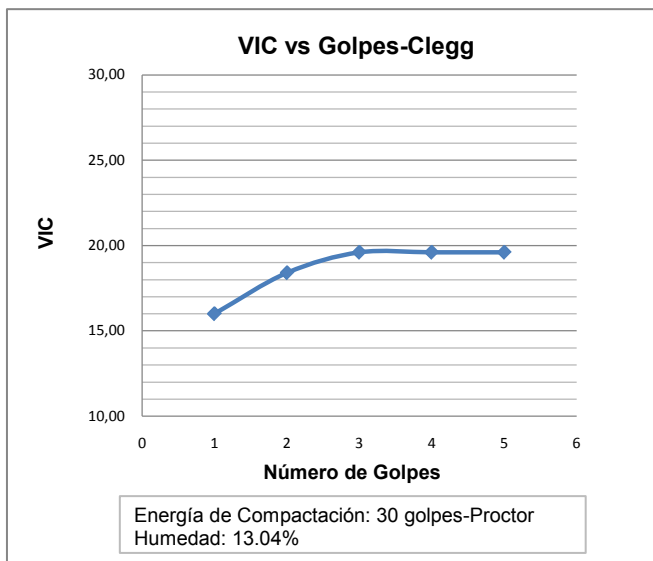


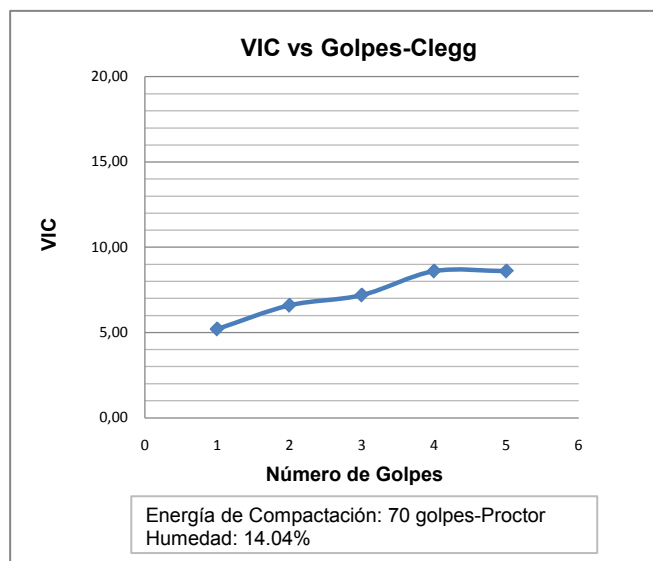
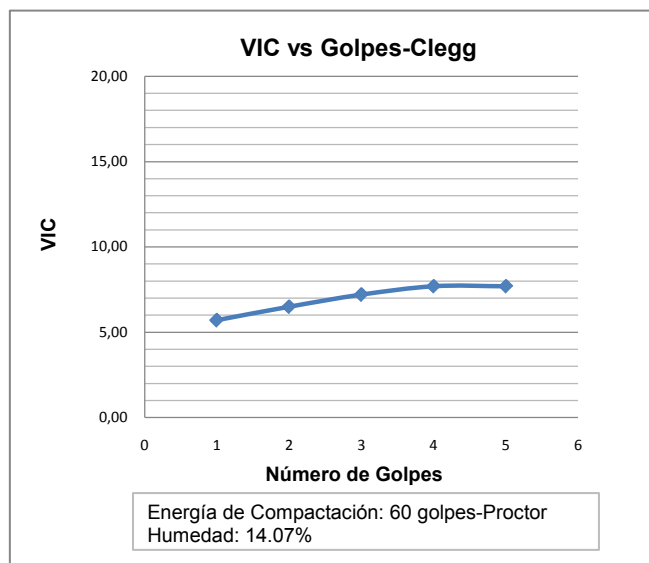
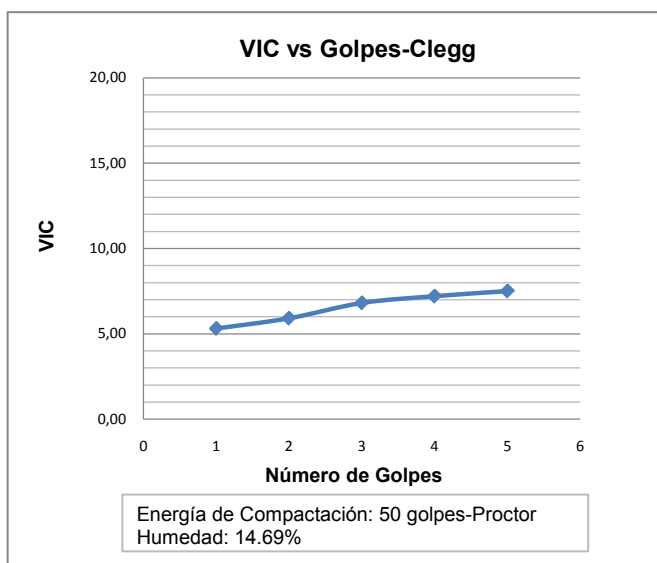
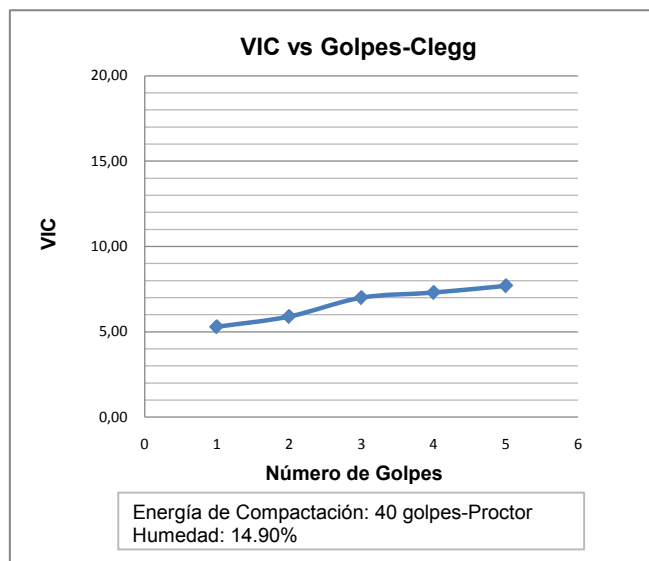
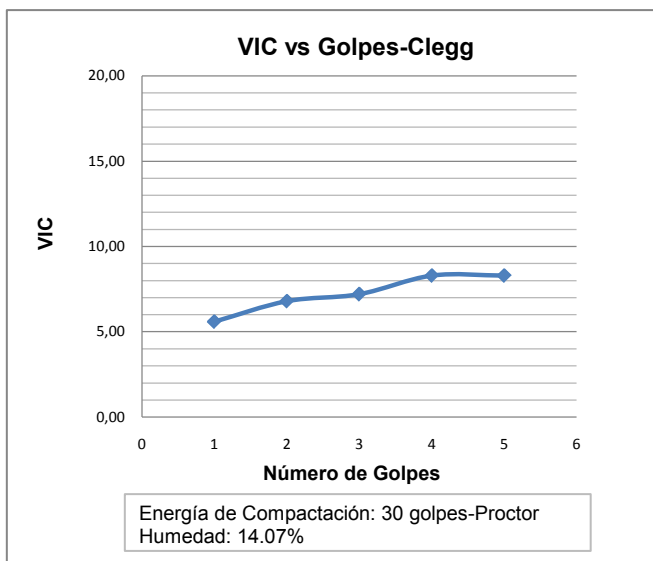


A.3.5 - Gráficas VIC vs Golpes - Clegg









# ANEXO 4

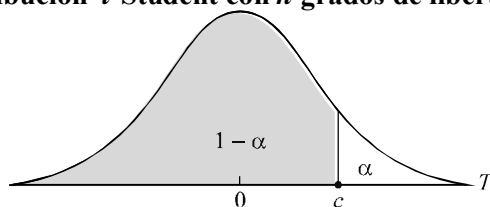
## Tablas utilizadas en la investigación

A.4.1 Tabla del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos. <sup>(5)</sup>

DIVISIONES PRINCIPALES			Símbolo del subgrupo	NOMBRES TIPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO			
Suelos de grano grueso Más de la mitad del material es retenido en el tamiz n° 200	<b>Gravas</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el Tamiz n° 4 (4.76 mm)	<b>Gravas limpias</b> (sin o con pocos finos)	GW	Gravas bien graduadas, mezclas de grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica, según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz n° 200). Los suelos de granos gruesos se clasifican como sigue:  < 5%: GW, GP, SW, SP. > 12%: GM, GC, SM, SC.  5 al 12% > casos límites que requieren usar doble símbolo.	$C_U = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_C = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3		
			GP	Gravas mal graduadas, mezcla de grava-arena, pocos finos o sin finos.			No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW	
		<b>Gravas con finos</b> (apreciable cantidad de finos)	GM	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP < 4	Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límites que requieren doble símbolo.	
			GC	Gravas arcillosas mezclas grava-arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con IP > 7		
			<b>Arenas limpias</b> (pocos o sin finos)	SW		Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		$C_U = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_C = (D_{30})^2/D_{10} \times D_{60}$ entre 1 y 3
	SP	Arenas mal graduadas, arenas con grava, poco finos o sin finos		Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW				
	<b>Arenas con finos</b> (apreciable cantidad de finos)	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP < 4		Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan símbolo doble		
		SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.	Límites de Atterberg sobre la línea A o IP > 7				
		<b>Suelos de granos Fino</b> Más de la mitad del Material pasa por el Tamiz n° 200	<b>Limos y Arcillas</b> LL < 50	ML			Limos inorgánicos, y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.	<p><b>Ábaco de Casagrande</b></p> <p>El gráfico muestra el Índice de Plasticidad (IP) en el eje vertical (0 a 60) y el Límite Líquido (LL) en el eje horizontal (0 a 100). Una línea diagonal (Línea A) y una línea vertical (Línea B) dividen el espacio en zonas de clasificación de suelos. Las zonas etiquetadas incluyen CH, CL, OH ó MH, ML, CL/ML, y ML ó OL.</p>
	CL			Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas.				
OL	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.							
<b>Limos y Arcillas</b> LL > 50	MH		Limos inorgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.					
	CH	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta						
	OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada, limos orgánicos.						
<b>Suelos muy orgánicos</b>			PT	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico.				

## A.4.2 Tabla de distribución t - Student

\*\*\*\*\*Distribución t-Student con  $n$  grados de libertad.



$1 - \alpha$

$n$	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995
1	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657
2	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925
3	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841
4	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604
5	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032
6	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707
7	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499
8	0.706	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355
9	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250
10	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169
11	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106
12	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055
13	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012
14	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977
15	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947
16	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921
17	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898
18	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878
19	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861
20	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845
21	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831
22	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819
23	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807
24	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797
25	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787
26	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779
27	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771
28	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763
29	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756
30	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750
40	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704
60	0.679	0.848	1.046	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660
120	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.980	2.358	2.617
∞	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576

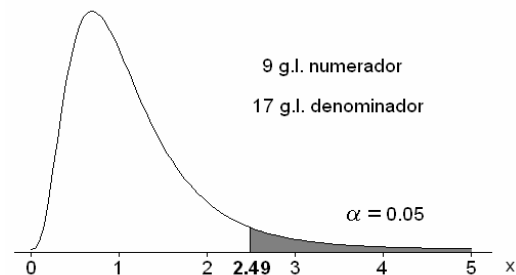
A.4.3 Tabla de distribución Fisher - Snedecor



Centro de Ciencias Básicas  
Departamento de Estadística

$\alpha = 0.05$

VALORES CRÍTICOS DE LA DISTRIBUCIÓN F



Grados de libertad del denominador	Grados de libertad del numerador																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	12	15	20	25	30	40	60	120	240	1000
1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54	241.88	243.90	245.95	248.02	249.26	250.10	251.14	252.20	253.25	253.79	254.19
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.41	19.43	19.45	19.46	19.46	19.47	19.48	19.49	19.49	19.49
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.74	8.70	8.66	8.63	8.62	8.59	8.57	8.55	8.54	8.53
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.64	5.63
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.68	4.62	4.56	4.52	4.50	4.46	4.43	4.40	4.38	4.37
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.00	3.94	3.87	3.83	3.81	3.77	3.74	3.70	3.69	3.67
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.57	3.51	3.44	3.40	3.38	3.34	3.30	3.27	3.25	3.23
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.28	3.22	3.15	3.11	3.08	3.04	3.01	2.97	2.95	2.93
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.07	3.01	2.94	2.89	2.86	2.83	2.79	2.75	2.73	2.71
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.91	2.85	2.77	2.73	2.70	2.66	2.62	2.58	2.56	2.54
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.79	2.72	2.65	2.60	2.57	2.53	2.49	2.45	2.43	2.41
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.69	2.62	2.54	2.50	2.47	2.43	2.38	2.34	2.32	2.30
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.60	2.53	2.46	2.41	2.38	2.34	2.30	2.25	2.23	2.21
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.53	2.46	2.39	2.34	2.31	2.27	2.22	2.18	2.15	2.14
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.48	2.40	2.33	2.28	2.25	2.20	2.16	2.11	2.09	2.07
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.42	2.35	2.28	2.23	2.19	2.15	2.11	2.06	2.03	2.02
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.38	2.31	2.23	2.18	2.15	2.10	2.06	2.01	1.99	1.97
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.34	2.27	2.19	2.14	2.11	2.06	2.02	1.97	1.94	1.92
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.90	1.88
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.28	2.20	2.12	2.07	2.04	1.99	1.95	1.90	1.87	1.85
21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.84	1.82
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.23	2.15	2.07	2.02	1.98	1.94	1.89	1.84	1.81	1.79
23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32	2.27	2.20	2.13	2.05	2.00	1.96	1.91	1.86	1.81	1.79	1.76
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.18	2.11	2.03	1.97	1.94	1.89	1.84	1.79	1.76	1.74
25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.74	1.72
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.15	2.07	1.99	1.94	1.90	1.85	1.80	1.75	1.72	1.70
27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25	2.20	2.13	2.06	1.97	1.92	1.88	1.84	1.79	1.73	1.70	1.68
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.68	1.66
29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22	2.18	2.10	2.03	1.94	1.89	1.85	1.81	1.75	1.70	1.67	1.65
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.09	2.01	1.93	1.88	1.84	1.79	1.74	1.68	1.65	1.63
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	2.00	1.92	1.84	1.78	1.74	1.69	1.64	1.58	1.54	1.52
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.95	1.87	1.78	1.73	1.69	1.63	1.58	1.51	1.48	1.45
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.92	1.84	1.75	1.69	1.65	1.59	1.53	1.47	1.43	1.40
80	3.96	3.11	2.72	2.49	2.33	2.21	2.13	2.06	2.00	1.95	1.88	1.79	1.70	1.64	1.60	1.54	1.48	1.41	1.37	1.34
100	3.94	3.09	2.70	2.46	2.31	2.19	2.10	2.03	1.97	1.93	1.85	1.77	1.68	1.62	1.57	1.52	1.45	1.38	1.33	1.30
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.83	1.75	1.66	1.60	1.55	1.50	1.43	1.35	1.31	1.27
1000	3.85	3.00	2.61	2.38	2.22	2.11	2.02	1.95	1.89	1.84	1.76	1.68	1.58	1.52	1.47	1.41	1.33	1.24	1.18	1.11



# ANEXO 5

## Fotos de ensayos de laboratorio



A.5.1 Ensayo de granulometría.



A.5.2 Ensayo de límite líquido.



A.5.3 Ensayo de límite plástico.



A.5.4 Ensayo Proctor Modificado.



A.5.5 Ensayo CBR.



A.5.6 Preparación de la muestra de ensayo.



A.5.7 Fabricación de especimen.



A.5.8 Compactación de especimen.



A.5.9 Ensayo CBR sin saturar.



A.5.10 Lecturas de carga – penetración.



A.5.11 Colocación de Martillo Clegg sobre espécimen.



A.5.12 Martillo a nivel de referencia para ejecución de ensayo VIC.



A.5.13 Lectura del VIC al 5to golpe.