

**CORRELACION DEL ANGULO DE FRICCION INTERNA Y CBR TIPO I PARA
ARENAS LIMOSAS (SM)**

**PAUL ANDRES ALVARADO SALCEDO
IVAN DARIO MUÑOZ AYALA**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**

**CORRELACION DEL ANGULO DE FRICCION INTERNA Y CBR TIPO I PARA
ARENAS LIMOSAS (SM)**

PAUL ANDRES ALVARADO SALCEDO

IVAN DARIO MUÑOZ AYALA

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

INGENIERO GERARDO BAUTISTA GARCÍA

Magíster en Ingeniería Civil

Área de Geotecnia



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ADMINISTRACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2010**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Abril del 2010

DEDICATORIA

Este libro está dedicado a mi familia que siempre ha estado presente en cada uno de los momentos difíciles, más aún en este camino de retomar nuevamente este proceso que se está terminando con la presentación de este libro. A ellos por su infinita paciencia, por no dejarme desfallecer en ningún momento y por su comprensión en los momentos difíciles que fueron muchos.

A Dios que nunca abandona a las personas, por llenarme de fortaleza en todos los momentos.

Iván Darío Muñoz Ayala

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a todas aquellas personas que contribuyeron con su realización, especialmente a:

Dios por todas las bendiciones recibidas y por permitirme alcanzar este logro

A mi esposa y a mi hija por su amor incondicional, su paciencia, apoyo y compañía y por ser el motor que me impulso a alcanzar esta meta.

A mis padres por su apoyo incondicional durante todo este tiempo.

Paul Andrés Alvarado Salcedo

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro mayor agradecimiento y aprecio a:

Ingeniero Gerardo Bautista, director de este trabajo de grado, por esta oportunidad, por su apoyo, sus indicaciones y todo lo que nos permitió aprender de él.

A los señores Vicente Páez y Heli Rueda, personal del laboratorio de suelos de la UPB, por transmitirnos su experiencia, y por su constante colaboración y orientación durante la realización de este trabajo.

A la Universidad Pontificia Bolivariana, por todos los conocimientos adquiridos y por el acompañamiento brindado durante toda nuestra carrera universitaria, a todas las personas que de alguna manera contribuyeron a la realización de este trabajo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION	
1. OBJETIVOS	16
1.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
2. ANTECEDENTES	17
3. METODOLOGIA	19
3.1 Diagrama de Flujo de la metodología	20
4. MARCO TEORICO	21
4.1. Clasificación del suelo	21
4.1.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	21
4.1.2. Grupos de suelos de fracción gruesa	21
4.1.3. Grupos de suelos de fracción fina	22
4.1.4. Grupos casos de frontera o doble nomenclatura	23
4.1.4.1. Suelos gruesos doble nomenclatura	23
4.2. COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS	24
4.2.1. Ensayo de Proctor modificado	25
4.3. RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE DE LOS SUELOS	26
4.3.1. Determinación del esfuerzo de corte	29
4.3.2. Prueba de corte directo	29
4.3.3. Prueba de compresión triaxial	31

4.4.	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS SUELOS MEDIANTE EL ENSAYO C.B.R	32
4.4.1.	Condiciones de ensayo	33
4.4.2.	Ensayo CBR sobre muestra compactadas en laboratorio	34
4.4.3.	Método I	34
4.4.3.1.	Preparación de la muestra	34
4.4.3.2.	Curado de muestra	36
4.4.3.3.	Penetración de la muestra	37
4.4.3.4.	Cálculos	38
5.	RESULTADOS OBTENIDOS	40
5.1.	ANALISIS GRANULOMETRICOS DE LAS MUESTRAS	40
5.2.	LIMITES DE PLASTICIDAD DE LAS MUESTRAS	40
5.3.	PROCTOR MODIFICADO (ENSAYO DE COMPACTACION)	40
5.4.	CORTES DIRECTO	42
5.5.	CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO)	45
6.	ANALISIS GRANULOMETRICO DE LAS MUESTRAS	49
7.	CONCLUSIONES	55
8.	OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES	58
9.	RESEÑA BIBLIOGRAFICA	60
	ANEXOS	61

LISTA DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1.	Relación entre tipos de pruebas de compactación	26
Tabla 2.	Relaciones esfuerzo-penetración	33
Tabla 3.	Ejemplos cálculos	38
Tabla 4.	Datos granulometría de muestras seleccionadas	40
Tabla 5.	Datos de límites de plasticidad de muestras seleccionadas	40
Tabla 6.	Resultados de humedad óptima y densidad máxima para la muestra seleccionada	41
Tabla 7.	Resumen de datos obtenidos para la muestra de arena Limosa	41
Tabla 8.	Resultados corte directo para humedad del 8.5%	42
Tabla 9.	Resultados corte directo para humedad del 12.5%(óptima)	43
Tabla 10.	Resultados corte directo para humedad del 16.5%.	44
Tabla 11.	Resumen resultados obtenidos corte directo	45
Tabla 12.	Resultados CBR para humedad del 8.5%	45
Tabla 13.	Resultados CBR para humedad del 12.5% (Optima)	46
Tabla 14.	Resultados CBR para humedad del 16.5%	47
Tabla 15.	Resumen resultados CBR.	48

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Metodología de la investigación	20
Figura 2. Carta de plasticidad para la clasificación de los suelos de partículas finas	24
Figura 3. Modos de falla en probetas de suelo	27
Figura 4. Esfuerzos principales y envolvente de falla de una arena	28
Figura 5. Esfuerzos principales y envolvente de falla de una arcilla sin fricción	29
Figura 6. Aparato de corte directo	30
Figura 7. Envolvente de Mohr	31
Figura 8. Ángulo de Fricción Vs Humedad	50
Figura 9. Cohesión Vs Humedad	51
Figura 10. Densidad Máxima Seca Vs Humedad	52
Figura 11. CBR Vs Humedad	52
Figura 9. Ángulo de Fricción Vs CBR	53

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A Registro Fotográfico	63
ANEXO B Ensayos de Granulometría	73
ANEXO C Ensayos Límites de Plasticidad	78
ANEXO D Ensayos de Proctor Modificado	82
ANEXO E Ensayos de Corte Directo	87
ANEXO F Ensayos de CBR Tipo I	357
ANEXO G Normas de Invias I.N.V.E – 123 para la ejecución de ensayos Granulométricos	627
ANEXO H Normas de Invias I.N.V.E – 124 para la ejecución de Límites de Plasticidad	638
ANEXO I Normas de Invias I.N.V.E – 125 para la ejecución de Proctor Modificado	648
ANEXO J Normas de Invias I.N.V.E – 126 para la ejecución de Corte Directo	658
ANEXO F Normas de Invias I.N.V.E – 125 para la ejecución de CBR Tipo I	668

GLOSARIO

- **Cr:** Compacidad relativa.
- **LI:** Límite líquido.
- **S.O.P:** Secretaría de obras públicas.
- **SUCS:** Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: CORRELACION DEL ANGULO DE FRICCION INTERNA Y CBR TIPO I PARA ARENAS LIMOSAS (SM)

AUTORES: PAUL ANDRES ALVARADO SALCEDO
IVAN DARIO MUÑOZ AYALA

FACULTAD: INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR: GERARDO BAUTISTA GARCÍA

RESUMEN

Esta tesis tuvo como objetivo principal la determinación de la relación entre el ángulo de fricción interna y el CBR tipo I para arenas limosas mediante la realización de los ensayos de corte directo y ensayo de CBR (california Bearing Ratio) tipo I.

El trabajo comenzó con la selección del material el cual se tomó del sector donde se encuentra el muro en tierra armada en la parte superior del Bloque D.

Una vez seleccionado el material se procedió a realizar los ensayos de clasificación para corroborar que efectivamente se tratara de arenas limosas (SM). Posteriormente se realizaron los ensayos de compactación para determinar la humedad óptima; conocida la humedad optima se procedió a realizar 90 ensayos de corte directo y 90 ensayos de CBR tipo, de los cuales la tercera parte se realizaron con muestras compactadas con una humedad de 8,5%, otra tercera parte con una humedad de 12,5% y una tercera parte adicional con una humedad de 16,5%.

Con los resultados de los ensayos de corte directo y CBR tipo I se buscaron tendencias entre las diferentes propiedades físicas de las arenas limosas estudiadas, para finalmente hacer las conclusiones y recomendaciones respectivas.

PALABRAS CLAVES: CBR tipo I, arenas limosas (SM).

GENERAL SUMMARY OF WORK OF DEGREE

TITLE: CORRELACION DEL ANGULO DE FRICCION INTERNA Y
CBR TIPO I PARA ARENAS LIMOSAS (SM)

AUTHORS: PAUL ANDRES ALVARADO SALCEDO
IVAN DARIO MUÑOZ AYALA

FACULTY: CIVIL ENGINEERING

DIRECTOR: GERARDO BAUTISTA GARCÍA

ABSTRACT

The objective of this work was to determinate the relation between the internal rub angle and CBR type I to slimy sands, realizing direct cut tests and CBR type I tests (California Bearing Ratio)-

This work began selecting material, which was taking in the sector where the armada soil wall on the top of building D. is

When the material was selected, was realized the classification tests to prove that the samples was slimy sands. Then was realized the compact tests to determine the optimal humidity; knowing the optimal humidity, was realizing 90 direct cut tests and 90 CBR test type I, which the third part was made with compact samples with an optimal humidity of 8.5%, other third part with an optimal humidity of 12.5% and another third part with an optimal humidity of 16.5%.

With the results of the direct cut and CBR type I tests, looking for tendency between the different slimy sand's physicals properties, to finally made the conclusions and recommendations-

KEY WORDS: CBR type I tests (California Bearing Ratio), slimy sands.

INTRODUCCION

La determinación del ángulo de fricción interna y el CBR tipo I para una arena limosa es de gran importancia, ya que estos dos parámetros son una medida de la resistencia del suelo.

El ángulo de fricción interna es el parámetro que más influye en la capacidad portante de un suelo arenoso ya que los tres términos de la ecuación de capacidad portante (cualquier método) dependen de dicho parámetro. Además dicho ángulo también es importante en el cálculo de factores de seguridad de estabilidad de taludes.

Para los suelos arenosos, especialmente de matriz limosa el ensayo de corte directo resulta algo difícil ya que debido a la cohesión tan baja de dichos suelos las muestras se salen de la formaleta en el momento de extraerla o se desmoronan en el momento de pasarlas al aparato de corte directo. Por tal motivo es importante conocer el ángulo de fricción interna a partir de los resultados de un ensayo de fácil ejecución como lo es el ensayo de CBR tipo I.

Con este trabajo se obtuvieron relaciones directas entre algunas de las propiedades físicas del suelo estudiado (incluido el ángulo de fricción interna) y el CBR para diferentes humedades de compactación.

Los resultados obtenidos en esta tesis son válidos únicamente para el tipo de suelo estudiado y para las humedades de compactación usadas. Es probable que las tendencias halladas aquí varíen si se utilizan humedades menores.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Determinar la relación directa entre el ángulo de fricción interna y el CBR para arenas limosas.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Buscar suelos arenosos para los cuales sea válida la investigación .

- Buscar la humedad óptima del suelo seleccionado ya que con ella se logra la máxima densidad.

- Realizar los ensayos de corte directo y CBR sobre muestras compactadas con humedad óptima, con 4 puntos porcentuales por encima y 4 por debajo de ésta.

- Buscar correlaciones entre el ángulo de fricción interna, el CBR, la humedad de compactación y la densidad lograda..

2. ANTECEDENTES

La Universidad Pontificia Bolivariana ha venido desarrollando investigaciones del comportamiento de diferentes parámetros de los suelos, con el fin de ofrecer una base de datos que se pueda aplicar en la realidad al gremio de la construcción y consultoría a nivel nacional y departamental, de esta forma se mejorará la calidad de las obras civiles realizadas sobre dichos suelos y la prestación de servicio que en la actualidad presta la Universidad en el área de elaboración y análisis de ensayos de laboratorios de suelos.

La universidad Pontificia en el año 2007 realizó dos investigaciones para tesis de grado, la primera de ellas consistió en buscar la incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas arenosas realizada por las estudiantes Sara Paola Flórez Jamza y Yelissa Villamizar Méndez. En la segunda se estudió la incidencia de la compactación en la resistencia al corte de arcillas de baja compresibilidad.

En estas tesis se obtuvieron los siguientes resultados:

NOMBRE TESIS	AUTOR	AÑO	OBJETIVO GENERAL	RESULTADOS GENERALES OBTENIDOS			
				Humedad deseada (%)	Cohesión (Kg/cm ²)	Ángulo de Fricción (°)	Humedad Obtenida (%)
Incidencia de la compactación en la Resistencia al Corte de Arcillas de Baja Compresibilidad	Ricardo Andrés Cepeda Vargas y Juan David Trujillo Bolívar	2007	Comparar las variaciones de los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción) con respecto a las humedades y grados de compactación para arcillas de baja compresibilidad.	14	0.802	44.66	14.11
				17	0.584	50.23	17.28
				20	0.62	44.92	20.38
				23	0.59	35.08	23.44
Incidencia de la compactación en la resistencia al Corte de Arcillas Arenosas	Sara Paola Flórez Jamza y Yelissa Villamizar Méndez	2007	Comparar las variaciones de los parámetros de resistencia al corte (cohesión y ángulo de fricción) con respecto a las humedades y grados de compactación para arcillas arenosas de baja compresibilidad.	12	0.47	31.78	12.37
				14	0.52	37.40	14.26
				16	0.50	34.76	16.31
				18	0.44	28.46	18.27

Tabla Nº 1 Resultados obtenidos anteriormente en otras tesis.

3. METODOLOGÍA

Para darle cumplimiento a los objetivos trazados en este trabajo, se llevaron a cabo los siguientes pasos:

- El trabajo comenzó ubicando posibles sitios donde se podría hallar el material buscado. En cada sitio se mostraron muestra para clasificar los suelos.
- Con las muestras tomadas se hicieron los ensayos de clasificación, usando en los demás paso de la investigación el material correspondiente a arenas limosas y desechando los demás suelos.
- Con la arena limosa seleccionada se realizaron ensayos de compactación Tipo Proctor modificado para determinar la Humedad óptima y la densidad seca máxima.
- Se realizaron 90 ensayos de corte directo y 90 ensayos de CBR tipo I. 30 de los cuales se hicieron con la humedad optima, 30 más con una humedad cuatro puntos por debajo de la optima y otros 30 con una humedad cuatro puntos por encima de la optima.
- Con los resultados de todos los ensayos se analizo la variación entre ángulo de fricción interna, CBR, Densidad y cohesión para la diferentes humedades
- Con las tendencias halladas se redactaron unas conclusiones y se realizaron las observaciones y recomendaciones respectivas.
- Finalmente se redacto el informe final.

3.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGIA

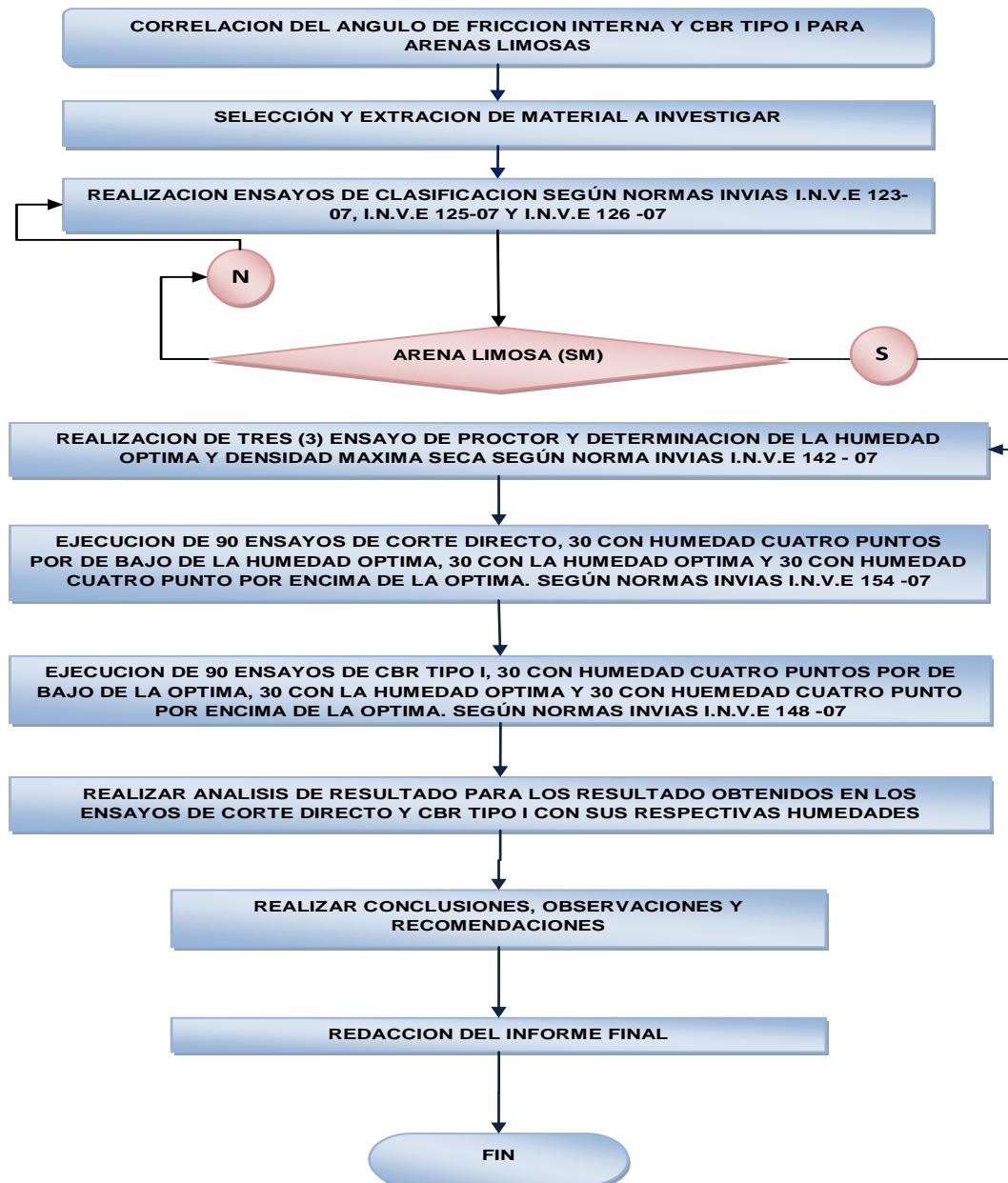


Figura 1. Metodología de la Investigación

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Clasificación del suelo

4.1.1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

Este sistema fue planteado por Casagrande en 1942 en la construcción de aeropuertos militares, utilizados por El ejército de Los Estados Unidos durante la segunda guerra mundial. El SUCS clasifica a los suelos en dos clases.

Suelos gruesos: que son de tipo grava y arenosa con menos del 50% pasan por la malla N° 200. Para las cuales se les asigno un símbolo (G) que es suelos gravosos y (S) suelo arenoso.

Suelos Finos: con el 50% o más pasa la malla N° 200. Para las cuales se les asigno un símbolo (M) limo inorgánico, (C) para arcillas inorgánicas y (O) para limos y arcillas orgánicos¹.

Otros símbolos adicionales para la clasificación de los suelos:

- W: bien graduada
- P: mal graduada
- L: baja compresibilidad ($LL < 50\%$)
- H: alta compresibilidad ($LL > 50\%$)

Si relacionamos todos estos símbolos se pueden obtener otros grupos de suelos unos pertenecientes a los de fracción gruesa y otros a los de fracción fina.

4.1.2. Grupos de suelos de fracción gruesa: se dividen en cuatro grupos de suelo.

¹ DAS BRAJA M. Principios de Ingeniería Geotécnica. Thompson.

GW y SW: perteneciente a una grava y arena bien graduadas, completamente limpia de finos (< al 5%). El coeficiente de Uniformidad Cu debe ser mayor a 4 y el Coeficiente de Curvatura debe estar entre 1 y 3 para GW y para SW el Cu > 6 y el Cc esté entre 1 y 3.

GP y SP: perteneciente a una grava y arena mal graduadas, completamente limpias de finos (< al 5%). Este grupo presenta un aspecto uniforme pero no cumplen con el Cu y Cc del grupo anterior.

GM y SM: perteneciente a una grava y arena limosa, con considerable cantidad de finos no plásticos (> al 12%), la plasticidad de estos finos tiene una tendencia de nula a media, por tal motivo es necesario que los límites de plasticidad se localicen por debajo de la Línea A de la fig. 2 mejor que su índice de plasticidad sea < 4.

GC y SC: pertenecientes a una grava y arena arcillosa, con considerable cantidad de finos plásticos (> a 12%), la plasticidad de estos finos tiene una tendencia de media a alta, por tal motivo es necesario que los límites de plasticidad se localicen sobre o por encima de la Línea A de la fig. 2 mejor que su índice de plasticidad sea > 7².

4.1.3. Grupos de suelos de fracción fina: se dividen entre grupos.

CL y CH: perteneciente a una arena inorgánica de baja y alta compresibilidad, es decir un Límite líquido (LL < 50%) para CL y un (LL > 50%) para CH. El CL comprende la zona sobre la línea A y CH la zona de la línea A de la fig. 2.

ML y MH: perteneciente a limos inorgánicos de baja y alta compresibilidad, es decir con un (LL < 50%) e Índice de plasticidad < 4 y ubicados por debajo de la línea A de la fig. 2 para los ML y un (LL > 50%) y ubicados sobre o por encima de la línea A de la fig. 2 para los MH.

OL y OH: perteneciente a limos y arcillas orgánicas que ocupan las mismas zonas que el grupo de ML y MH. Pero otorgan cierta cantidad de material orgánico que

² JUAREZ BADILLO – RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Ed. Limusa. Tomo I

permite incrementar el LL sin alterar el Ip, esto hace que el suelo se traslade hacia la derecha en la carta de plasticidad fig. 2 pasando a dominar un lugar mas alejado de la línea A.

Pt: perteneciente a suelos altamente orgánicos, como la turba y suelos pantanosos altamente compresibles. El LL de estos puede estar entre 300% y 500% quedando en la carta de plasticidad fig. 2 nítidamente por debajo de la línea.

4.1.4. Grupos casos de frontera o doble nomenclatura: Tanto como para los suelos gruesos y para los finos existen casos de frontera o suelos que es necesario colocarles doble nomenclatura, es decir cuando una muestra de suelo no cae claramente en alguna zona de la carta de la carta de plasticidad fig. 2 debe usar símbolos dobles.

4.1.4.1. Suelos gruesos doble nomenclatura:

GW-SW se utilizara para un material bien graduado con menos de 5% de finos y su fracción gruesa está conformada por igual cantidad de grava y arena.

ML-CL y MH-CH se utiliza para una arcilla limosa de baja y alta compresibilidad la cual caen sobre la línea A de la fig. 2 con $4% < I_p < 7%$ ³.

Para una buena clasificación del suelo es necesario conocer la siguiente información:

- Porcentaje de Grava, es decir el peso del suelo que pasa la malla N° 3" (76,2mm) y es retenido en la malla N°4 (4,699 mm).
- Porcentaje de Arena, es decir el peso del suelo que pasa la malla N° 4 (4,699 mm).y es retenido en la malla N° 200 (0,074 mm).
- Porcentaje de limo y arcillas, es decir el peso del suelo que pasa la malla N° 200.

³ JUAREZ BADILLO – RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos.Ed. Limusa. Tomo I

- Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de curvatura.
- Limite líquido e Índice de plasticidad de la porción de suelo que pasa la malla N° 40.

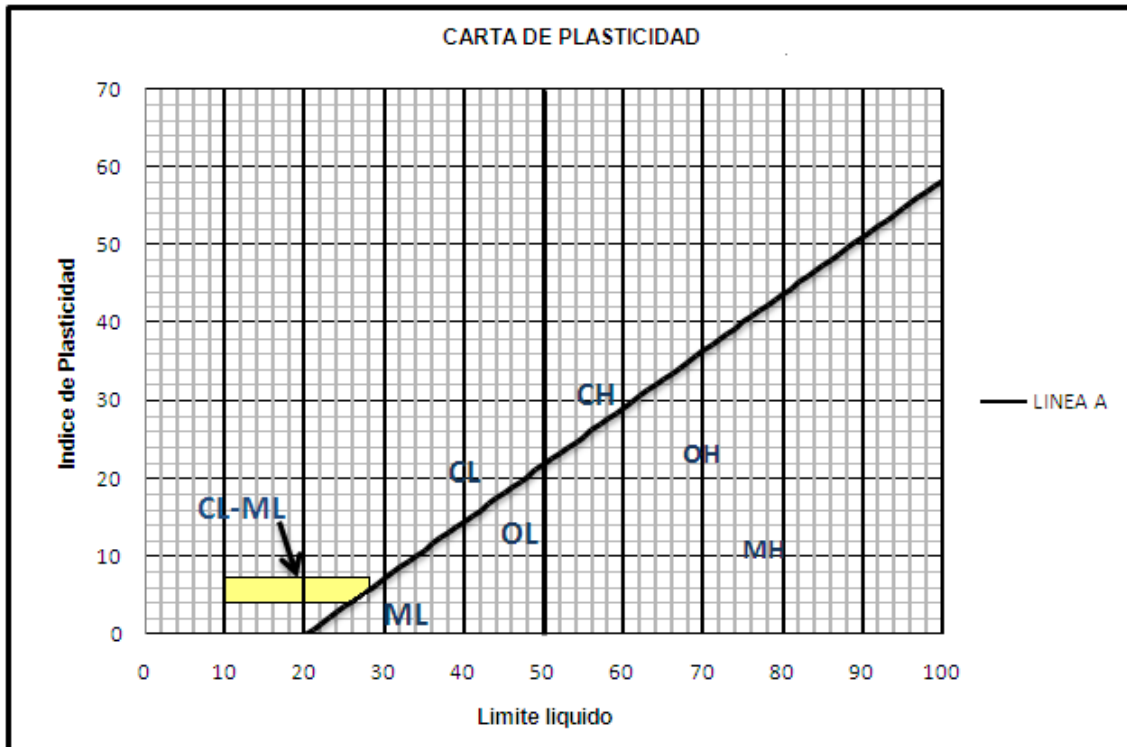


Figura 2. Carta de Plasticidad para clasificación de suelos de partículas finas en el laboratorio.

4.2. COMPACTACION DE LOS SUELOS

La compactación de los suelos es utilizada para aumentar la resistencia y disminuir la compresibilidad de los mismos, mediante la obtención de la densidad máxima seca para la cual se requiere un contenido de agua optima a través de la aplicación de una energía de compactación.

Cuando el contenido de agua se incrementa y se utiliza algún tipo de sistema de compactación (energía de compactación) el peso de los sólidos del suelo crecen en forma progresiva, sin embargo llega a un punto donde el incremento de dicha

agua tiende a reducir el peso específico seco debido a que el agua desplaza y ocupa el lugar de las partículas sólidas del suelo. De esta manera se puede obtener una grafica entre contenido de agua y densidad máxima seca, estableciendo en el punto máximo de la grafica la humedad optima y densidad máxima seca de compactación⁴.

4.2.1. Ensayo de Proctor modificado

La esencia de esta prueba es determinar el peso específico seco γ_d que pueda obtener un material, así como la humedad óptima ω_o a que debería hacerse la compactación.

Al agregar cierta cantidad de agua a un tipo de suelo, esta actúa como un lubricante entre las partículas del suelo, permitiéndole a esta un acomodo entre las misma. Entre más contenido de agua se le agregue mejor será el acomodo entre las partículas; a este contenido de agua se le llama Humedad Optima.

Este ensayo está basado en el ensayo de Proctor Estándar, por tanto siempre que se relacione el peso específico seco máximo y humedad óptima es recomendable observar la siguiente tabla.

⁴ CRESPO CARLOS. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Ed. Limusa.

Prueba	Proctor S.O.P	AASHTO Modificado T-180 y ASTM-D-1557			
Tipo de Material utilizado en la Prueba	Material arcilloso pasa la malla N°4, o con 10% retenido en esta malla y pasando la malla de 3/8"	Variante A	Variante B	Variante C	Variante D
		Material arcilloso que pase la malla N°4	Material arcilloso que pase la malla N°4	con retenido en la malla N°4 pero pasando la malla de 3/4"	con retenido en la malla N°4 pero pasando la malla de 3/4"
Equipo					
Diametro molde	101,60mm	101,60mm	152,4mm	101,60mm	152,4mm
Peso del Pison (Kg)	2,5	4,54	4,54	4,54	4,54
Diam,del Pison(mm)	50,8	50,8	50,8	50,8	50,8
Altura de caida	30,5 cm	45,7cm	45,7cm	45,7cm	45,7cm
N°de golpes	30	25	56	25	56
N° de Capas	3	5	5	5	5

Tabla 1. Relación entre tipos de pruebas de compactación

4.3. RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE DE LOS SUELOS

En la Mecánica de suelos es muy importante la determinación de la resistencia al esfuerzo cortante. Valorar correctamente ese concepto constituye un paso previo imprescindible para intentar, con esperanzas de éxito, aplicado a la estabilidad de obras civiles⁵.

C. A. Coulomb publicó primer trabajo serio que intentó explicar la génesis de la resistencia de los suelos. Consistió en dar a la fricción entre las partículas del

⁵ JUAREZ BADILLO – RICO RODRIGUEZ. Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de Suelos.Ed. Limusa. Tomo I

suelo la resistencia al corte y desplegar a este orden de fenómenos las normas que sigue la fricción entre los cuerpos, según la mecánica.

A un espécimen sometido a un esfuerzo cortante tiende a crear un deslizamiento entre sí de las partículas a de alguna parte de la masa del suelo con respecto al resto del mismo.

Según la Fig. 3a hay un disgregamiento de las partículas. En la fig. 3b la masa se resbala a lo largo de ciertas líneas de rotura, o si la masa del suelo es plástica es producida fluencia plástica fig. 3.c La resistencia al corte del suelo es la que tiende a contrarrestar estos movimientos dentro de la masa del suelo⁶.

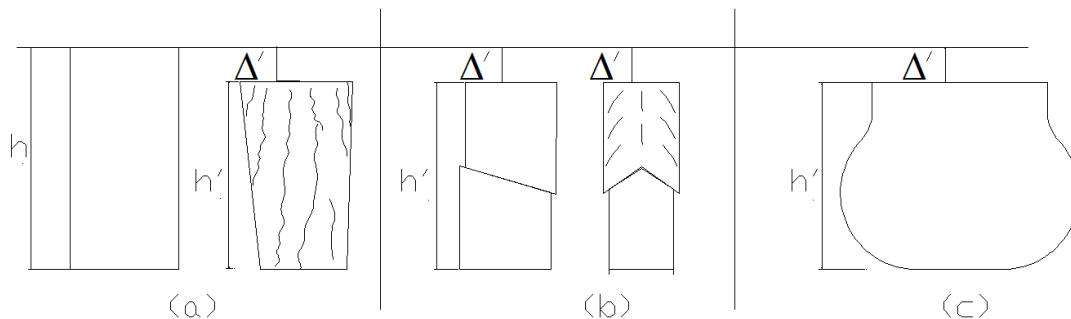


Figura 3. Modos de falla en probetas de suelo.

La resistencia al corte se designa τ de un suelo y viene dada por la ecuación de Coulomb:

$$(1) \quad \tau = c + \sigma \tan \phi$$

En la que:

τ = Resistencia al corte del suelo, en Kg/ cm².

c = Cohesión del suelo, en Kg/cm².

⁶ CRESPO CARLOS. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Ed. Limusa.

σ = Presión intergranular, Kg/cm².

ϕ = Ángulo de fricción interna del suelo, el cual se supone una constante.

Generalmente los suelos simultáneamente poseen cohesión y fricción interna; sin embargo existen dos casos extremos.

- Las arenas secas y lavadas que no tienen cohesión y en las que la carga de ruptura se obtiene por un valor de:

$$(2) \quad \tau = \sigma \tan \phi$$

La fig 4. Muestra que la envolvente del círculo de Mohr pasa por el origen.

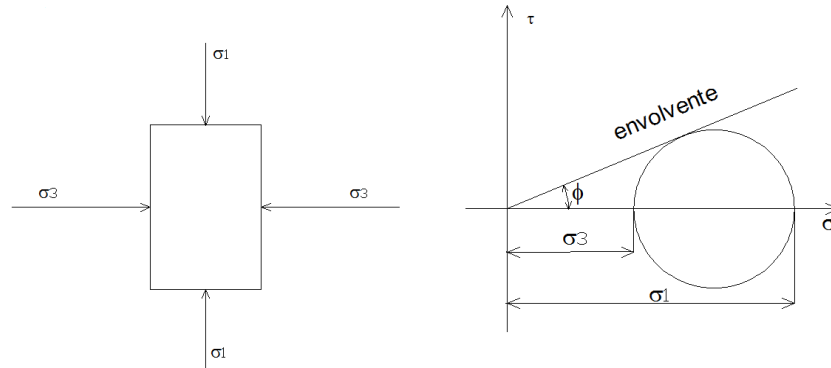


Figura 4. Esfuerzos principales y envolvente de falla de una arena

- Las arcillas que se comportan como si el ángulo de fricción interna del suelo fuese igual a cero, lo cual se obtiene que la carga de ruptura es constante e igual a la cohesión del suelo como se ve en la figura 11.3; entonces:

$$(3) \quad \tau = c$$

Los esfuerzos principales son σ_1 y σ_3 , que es el esfuerzo unitario de ruptura a compresión no confinada.

La adherencia entre las partículas del suelo es causada por la atracción entre ellas en virtud de las fuerzas moleculares se define como cohesión.

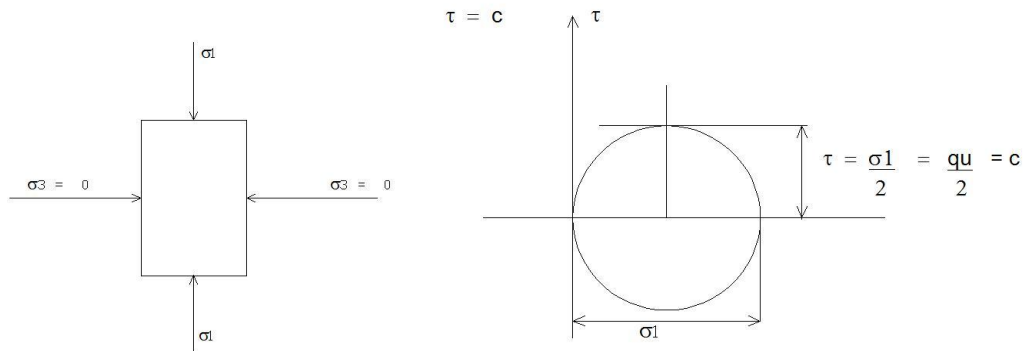


Figura 5. Esfuerzos principales y envolvente de falla de una arcilla sin fricción

El ϕ es un valor de convenio introducido para no complicar, tomado en cuenta como constante aunque no lo es. Éste Ángulo depende de la uniformidad de las partículas del suelo, de la presión normal, de la forma y del tamaño de los granos.

4.3.1. Determinación del esfuerzo de corte

El ángulo de fricción interna de un suelo y su cohesión, constituyentes del esfuerzo cortante del mismo, se puede lograr de varias maneras que pueden ser: a) con el aparato de corte directo creado por Arthur Casagrande, y b) por el ensayo de compresión triaxial. En las arcillas además puede determinarse con la prueba de la veleta o con la prueba de compresión axial no confinada⁷.

4.3.2. Prueba de corte directo

La máquina empleada es el ideado por Casagrande y se ve en con una versión moderna de esta en la fig. 6

El testigo inalterado se pone en su interior sometiéndose a un esfuerzo tangencial τ y a una carga P . Variando las cargas P , se van mirando los correspondientes esfuerzos de ruptura τ , con esos valores se dibuja la envolvente de los círculos de

⁷ CRESPO CARLOS. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Ed. Limusa.

Mhor que dará a conocer el valor de c , ordenada en el origen, y el ángulo ϕ de inclinación de la línea según figura 7.



Figura 6. Aparato de corte directo

Para una arena en estado muy compactado y bajo presiones normales de 2 Kg/cm² el valor de ϕ está entre 5 y 10 grados mayor que su ángulo de reposo, según Terzaghi, también dice que el ángulo de fricción interna de una arena completamente sumergida es de uno a dos grados menor que el valor de ϕ para la misma arena e igual compacidad relativa, pero en un estado completamente seco⁸.

La relación entre la compacidad y el ángulo de fricción interna de un suelo granular es expresada por Meyerhof por medio de las siguientes expresiones.

- Para los suelos con más de 5% de arena fina y limo que sean granulares:

⁸ CRESPO CARLOS. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Ed. Limusa.

$$(4) \quad \phi = 25 + 0.15 Cr$$

Expresando (compacidad relativa) Cr en porcentaje.

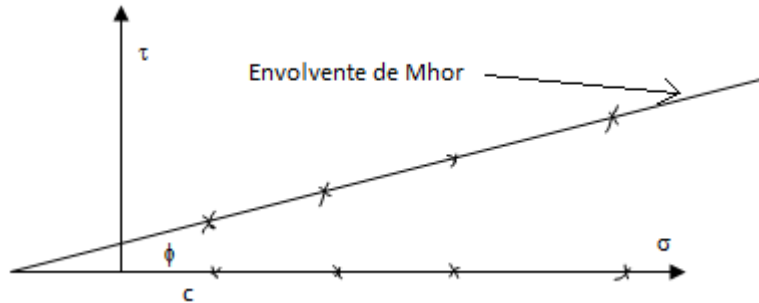


Figura 7 Envolvente de Mohr

- Para suelos granulares con menos de 5% de arena fina y limo:

$$(5) \quad \phi = 30 + 0.15 Cr$$

Expresando Cr en porcentaje.

4.3.3. Prueba de compresión triaxial.

Se realiza envolviendo en una membrana impermeable una muestra cilíndrica del suelo que se desea probar, cuyas bases quedan en contacto con cabezas sólidas provistas de piedras porosas que sirven de filtro; los filtros están conectados a tubos delgados provistos de válvulas que permiten gobernar la salida o entrada del agua a la muestra. Dichos tubos de drenaje están conectados a una bureta graduada mediante la cual se puede conocer el volumen de agua expulsado o absorbido por el suelo. La unión entre la membrana y las cabezas se ata con banda de hule para garantizar un sello hermético. Todo el conjunto queda encerrado en una cámara que se conecta a un tanque de agua a presión⁹.

⁹ CRESPO CARLOS. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Ed. Limusa.

La tapa superior de la cámara es atravesada por un vástago delgado que pasa por un depósito de grasa a presión, el que evita las fugas de agua a lo largo de la pared del vástago y reduce a un mínimo de fricción de ésta contra la tapa.

La prueba de compresión triaxial puede ejecutarse de diferentes maneras.

1. Prueba rápida o sin drenaje: En la primera etapa se realiza con el drenaje cerrado, para la segunda etapa del ensayo se mantiene la llave del drenaje cerrada.
2. Prueba rápida consolidada: En la primera etapa se hace con drenaje cerrado y en la segunda etapa del ensayo se realiza con el drenaje abierto.
3. Prueba lenta: Para la primera etapa de la prueba se realiza totalmente con la llave del drenaje abierta al igual que para la segunda fase del ensayo

4.4. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LOS SUELOS MEDIANTE EL ENSAYO C.B.R

El índice de soporte de California C.B.R (California Bearing Ratio), es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, cuyas condiciones de densidad y humedad son controladas con cuidado. El CBR es la relación que se da entre el esfuerzo requerido para introducir un pistón estandarizado y patronado en la muestra de suelo a ensayar que está dentro de un molde y el esfuerzo requerido para inyectar el pistón hasta una profundidad en una muestra de piedra triturada que figura como patrón y el CBR se expresa en porcentaje¹⁰.

$$(6) \text{ CBR} = \frac{\text{CARGA EN EL SUELO ENSAYADO}}{\text{CARGA EN LA MUESTRA PATRON}} \times 100$$

¹⁰ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

La carga unitaria cuyos valores a diferentes profundidades de penetración en la muestra de piedra triturada tomada como patrón son los mostrados en la Tabla 9.

PENETRACIÓN (pulgadas)	CARGA UNITARIA (lb/ pg ²)
0.1	1000
0.2	1500
0.3	1900
0.4	2300
0.5	2600

Tabla 2. Relaciones esfuerzo-penetración para la muestra patrón

Generalmente el CBR se determina para una penetración de 0.1 y 0.2 pulgadas del pistón. Se elige el valor más grande de los dos como valor que representa la muestra.

4.4.1 Condiciones de ensayo

El CBR puede variar con su humedad al momento de compactar, con su densidad y también al momento de ensayarse. Lo que se busca es reproducir las condiciones de campo o de la obra en el laboratorio al momento de ensayarse lo cual implica tener un control cuidadoso de todos estos factores¹¹.

En la mayoría de ocasiones se trata de representar la condición más crítica que pueda llegar a presentar un suelo en el campo, por tal motivo se lleva al suelo a la saturación antes de ser falladas, también se pueden hacer ensayos con muestras inalteradas traídas del campo¹².

Por otra parte se pueden hacer ensayos en el lugar de los trabajos con la humedad existente o saturado, usando equipos diseñados para tal fin y acudiendo a elementos disponibles en el sitio de los trabajos.

¹¹ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

¹² SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

En las zonas tropicales en las cuales estamos ubicados la posibilidad de las capas granulares e incluida la subrasante son pocas. Esto puede pasar en casos extremos cuando no hay un manejo mínimo e inadecuado de los drenajes superficiales y subterráneos¹³.

4.4.2 Ensayo CBR sobre muestras compactadas en el laboratorio

Para tal fin debemos contar con el siguiente equipo:

- Martillo (pisón) de compactación de 10 libras de peso con 18 pulgadas de caída.
- Moldes para ensayo CBR con sus collares de extensión y placa base.
- Falso fondo.
- Pesas de sobrecarga (5 Lb cada una).
- Máquina para aplicar carga a velocidad controlada.
- Discos perforados con vástago ajustable.
- Trípode con dial medidor de perforaciones.
- Balanzas, flexómetro, papeles filtro, horno y alberca etc.

4.4.3. Método I

Éste se realiza en arenas, gravas y suelos sin cohesión. Generalmente suelos clasificados según el sistema unificado como GW; GP; SW; y SP. Otros con doble nomenclatura GW-GM, GP-GM, SW-SM, GM y SM pero que la fracción fina no posea plasticidad¹⁴.

4.4.3.1. Preparación de la Muestra:

- Pulverizar más o menos 45 kilogramos de suelo y pasarlo por el tamiz de $\frac{3}{4}$ " , descartando la parte retenida en él, remplazándolo por una cantidad

¹³ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

¹⁴ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

igual en peso tomado de la muestra representativa que pase por el tamiz $\frac{3}{4}$ " que quede retenida en el tamiz No. 4

- Realizar el ensayo de compactación similar al de Proctor modificado pero para el molde de C.B.R., con un volumen aproximado de $1/12.22$ pies³. El martillo a usar tiene 10 libras de peso con 18 pulgadas de caída, compactando la muestra en 5 capas de 55 golpes del martillo. Con esto se determina la humedad óptima de compactación para la energía aplicada¹⁵.
- Al material sobrante no usado se mezcla con la cantidad de agua apropiada para alcanzar la humedad óptima hallada anteriormente.
- Pesarse los tres moldes de CBR, después se pone al anillo de extensión y la base perforada de los moldes, atornillar para que quede un solo conjunto y poner el falso fondo con el papel de filtro.
- Se deben compactar tres muestras, se debe tomar de las capas superiores e inferiores antes de compactar muestras de suelo para verificar su humedad. La primera muestra se compacta aplicando 55 golpes a cada una de las cinco capas, la otra muestra debe hacerse aplicando 26 golpes y la última con 12 (Se puede empezar con cualquier cantidad de golpes). Si hay una variación en la humedad de alguna muestra en más de 0.5% con respecto al óptimo deberá desecharse y hacer una nueva¹⁶.
- Retirar el collar de extensión de los moldes enrasando la parte superior de la muestra ayudado por una regla.
- Quitar la placa de base junto con el falso fondo para pesar el molde con la muestra compactada (esto para cada una de las tres muestras).
- En cada una de las muestras se colocó el papel filtro sobre el falso fondo el cual al voltear la muestra queda en la parte superior y se fijan a sus palcas base.

¹⁵ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

¹⁶ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

- La que ahora es la parte superior de la muestra se ponen las pesas de sobrecarga las cuales tratan de representar el peso ejercido por capas de pavimento que supuestamente descansaran sobre el suelo ensayado.

La pesa que tiene 5 libras representa 3 pulgadas aproximadamente de material situado sobre el ensayado. La sobrecarga total no deberá ser menor a 10 libras¹⁷.

El número de pesas que se debe poner, se puede calcular estimando el espesor aproximado total a colocar dividiéndolo por tres.

4.4.3.2. Curado de las muestras

Las muestras antes de ser ensayadas se someterán a curado permanente 24 horas en un cuarto húmedo para que desaparezcan los posibles excesos de poros creados en el proceso de compactación.

Lo usado comúnmente es sumirlas en agua por 24 horas o más, tratando de obtener su saturación debe evitarse, a excepción que se estime forzoso que la muestra pueda alcanzar dicho estado en determinadas épocas del periodo de servicio del pavimento. Sería aceptable en casos con condiciones extremas de ambientales y de ubicación.

En caso de tomar la decisión de sumergir las probetas se debe tener en cuenta que en un ítem anterior que corresponde al de la preparación de las muestras habla de poner las pesas, inmediatamente antes de ponerlas se debe colocar un disco perforado con un vástago ajustable¹⁸.

Teniendo las muestras sumergidas, se pone sobre cada molde un trípode con un dial, teniendo en cuenta que el vástago de éste ha contacto con el disco perforado para tomar la lectura di inicio.

¹⁷ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

¹⁸ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

Se retira el trípode volviendo a colocarse al día siguiente para tomar una nueva lectura, cuando la lectura sea constante que la del día anterior se sacan las muestras. Si no se dejan los días que se necesiten hasta que sea igual la lectura, generalmente ocurre en un tiempo máximo de 4 días.

4.4.3.3. Penetración de la muestra

- Cuando las muestras se han sumergido se sacan dejándolas escurrir por 15 minutos. Este paso se evita cuando no han sido sumergidas las muestras.
- Poner uno de los moldes sobre el soporte de carga del aparato para ensayar ajustando el pistón de ésta centrándolo con la muestra. Elevar el gato del aparato hasta que el pistón aplique una carga de 10 libras. Después de pone el dial medidor de carga a cero¹⁹.
Para este momento la muestra debe tener igual número de pesas de sobrecarga al momento del curado.
- El dial de las deformaciones también debe ajustarse a cero cuando el vástago hace contacto con el borde del molde.
- Ajustar la velocidad de avance del pistón según las normas vigentes para penetrar en el suelo a 0.05 pulgadas/minuto, anotando las lecturas para las penetraciones de 0.005, 0.025, 0.05, 0.075, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4 y 0.5 pulgadas²⁰.
- Después se detiene el ensayo y se empieza a descargar el gato, quitar el molde de la máquina y quitar las pesas.
- Sacar una muestra cercanos al orificio de penetración, para hallar la humedad de penetración cuando la muestra haya sido sumergida e inmediatamente sacar la muestra del molde.
- Se deben repetir las etapas para las otras dos muestras desde la ***preparación de la muestra.***

¹⁹ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

²⁰ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

4.4.3.4. Cálculos

1. Determinar la densidad seca de cada muestra (55, 26 y 12 golpes por capa), como ejemplo podemos observar:

Número de golpes por capa		56
Molde No		8
Peso molde + muestra compactado	gr	9090
Peso molde	gr	4545
Peso de la muestra compactada	gr	4545
Volumen del molde	cm ³	2314,23
Densidad Húmeda	g/cm ³	1,964
Humedad	%	8,6
Densidad seca	Lb/pie ³	112,8

Tabla 3. Ejemplo cálculos

$$(7) \text{ Dens Hum} = \frac{\text{Peso muestra compactada}}{\text{Volumen muestra compactada}}$$

$$(8) \text{ Dens Seca} = \frac{\text{Densidad Húmeda}}{(1+\text{Humedad})/100} \times 62,4$$

2. Determinar los valores de esfuerzo que corresponde a las cargas aplicadas. Se deben convertir las lecturas del dial dependiendo de la constante del anillo (Ver manual), entonces teniendo el valor de la carga luego se divide por el área del pistón obteniendo así el esfuerzo aplicado²¹.

$$(9) \text{ Esfuerzo} = \text{Lec del dial} \times \frac{\text{Constante del anillo}}{\text{Área del pistón}}$$

3. Dibujar una curva esfuerzo Vs penetración de cada muestra con los datos anteriormente calculados.

²¹ SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

4. Verificar que la gráfica tenga una curvatura uniforme hacia abajo, si es así se toman los valores de CBR para las penetraciones de 0.1 y 0.2 pulgadas aplicando la fórmula:

$$(10) \text{ CBR (0,1pul)} = \frac{\text{Esfuerzo en el suelo ensayado (lb/pg}^2\text{)}}{\text{Esfuerzo en la muestra parón (0,1pul)}}$$

$$(11) \text{ CBR (0,2pul)} = \frac{\text{Esfuerzo en el suelo ensayado (lb/pg}^2\text{)}}{\text{Esfuerzo en la muestra parón (0,2pul)}}$$

Se toma el mayor valor de los dos como el valor que representa la resistencia para dicha muestra.

Por otra parte si la curva presenta un punto de inflexión es necesario hacer una corrección. Se hace trazando una línea tangente a la curva en su punto de mayor pendiente alargándola hasta interceptar el eje de las abscisas. Tomando este punto como nuevo cero y arrancando de él determinar las nuevas posiciones de los valores de 0.1 y 0.2 pulgadas y calcular los esfuerzos correspondientes²².

5. Después de obtenidos los valores de Densidad seca (γ_d) Vs CBR.

²² SANCHEZ SABOGAL FERNANDO. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

5.1. ANALISIS GRANULOMÉTRICOS DE LAS MUESTRAS

Una vez realizados los respectivos ensayos de granulometría estos arrojaron la siguiente información:

	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
% ARENAS	58,11	58,1	59,04	58,42
% GRAVAS	0,06	1,23	0,57	0,62
% FINOS	41,83	40,67	40,9	41,13

Tabla 4. Datos granulometría de muestras seleccionadas

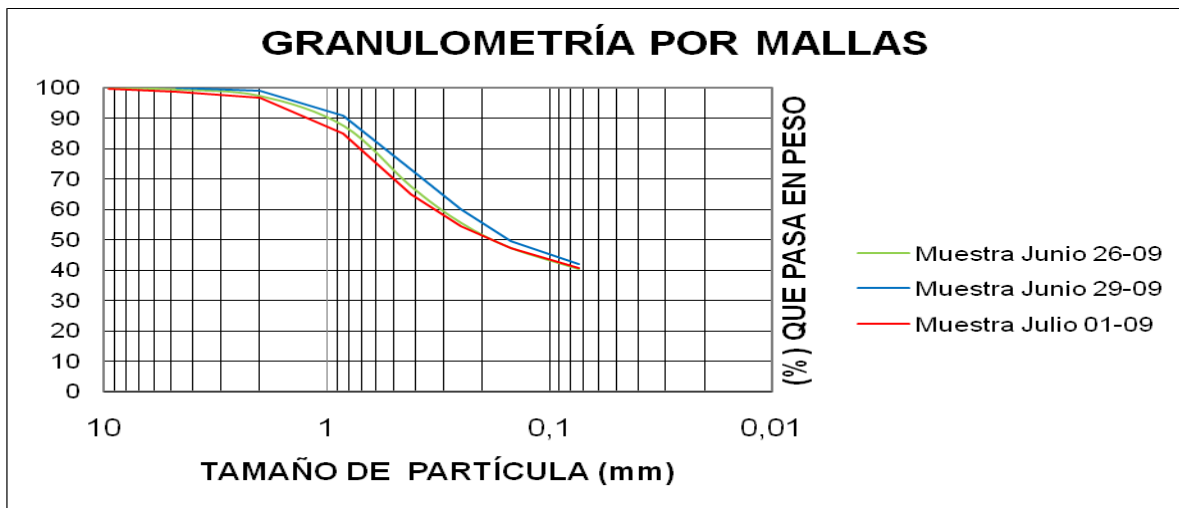


Figura 8. Curvas granulometría de muestras seleccionadas.

5.2. LÍMITES DE PLASTICIDAD DE LAS MUESTRAS

Se realizaron tres ensayos de límites de Atterberg, cuyos resultados fueron los siguientes:

	MUESTRA 1	MUESTRA 2	MUESTRA 3	PROMEDIO
LL	27,39	38,67	35,09	33,72
LP	19,03	31,11	25,63	25,26
Ip	8,36	7,56	9,46	8,46

Tabla 5. Datos de límites de plasticidad de muestras seleccionadas

Según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos este material pertenece al grupo SM, es decir una arena limosa.

5.3. PROCTOR MODIFICADO (ENSAYO DE COMPACTACION)

Para calcular la humedad con la cual se obtiene la mayor densidad seca, se realizaron tres ensayos de compactación tipo Proctor modificado. Los resultados de estos ensayos se muestran a continuación:

ENSAYO N°	HUMEDAD OPTIMA%	DENSIDAD MÁXIMA T/m ³
1	12,52	1,923
2	12,54	1,924
3	12,5	1,92
PROMEDIO	12,52	1,92

Tabla 6. Resultados de humedad óptima y densidad máxima para la muestra seleccionada.

La tabla. 8 muestra un resumen de los promedios obtenidos en los ensayos de clasificación y compactación.

MUESTRA SM	LOCALIZADA EN LOS PREDIOS DE LA UPB PARTE ORIENTAL DEL BLOQUE D MURO EN TIERRA ARMADA
% FINOS	40,96
% ARENAS	58,42
% GRAVAS	0,62
LL	33,72
LP	25,26
Ip	8,46
ω ÓPTIMA (%)	12,5
γ Seco (T/m ³)	12,5

Tabla 7. Resumen de datos obtenidos para la muestra de arena limosa

Con estos resultados se determino que las humedades de compactación en los ensayos de corte directo y CBR son: 8,5% (cuatro puntos de bajo de la humedad optima), 12,5%(humedad optima), 16,5%(cuatro puntos por encima de la optima).

5.4. CORTES DIRECTO

Después de obtener la humedad óptima se realizaron los ensayos de corte directo. De los cuales 30 ensayos se realizaron con una humedad de 8.5%, 30 ensayos con 12.5% y 30 ensayos con 16.5%, para un total de 90 ensayos de corte directo, cuyos resultados se muestran a continuación:

RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO PARA UNA HUMEDAD DE 8,5%.					
ENSAYO No	HUMEDAD (%)	γ (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	ϕ (°)	C (Kg/cm ²)
1	8,47	1,93	1,78	38,30	0,00
2	8,30	2,00	1,86	41,70	0,30
3	8,40	2,05	1,90	39,80	0,09
4	8,54	2,11	1,95	35,50	0,06
5	8,50	2,09	1,93	42,30	0,29
6	8,47	2,01	1,90	42,20	0,05
7	8,56	2,03	1,87	32,20	0,12
8	8,63	2,16	1,99	47,60	0,03
9	8,30	2,14	1,98	40,30	0,55
10	8,60	2,10	1,90	44,30	0,04
11	8,54	2,14	1,97	58,90	0,20
12	8,60	2,08	1,92	47,40	0,10
13	8,54	2,10	1,92	37,60	0,00
14	8,56	2,20	2,02	43,30	0,63
15	8,54	2,12	1,96	40,40	0,63
16	8,73	2,12	1,95	38,30	0,37
17	8,54	2,13	1,96	38,30	0,13
18	8,50	1,91	1,76	43,30	0,03
19	8,64	2,03	1,87	36,70	0,10
20	8,74	2,08	1,93	52,00	0,11
21	8,48	2,06	1,90	51,20	0,02
22	8,58	2,04	1,88	49,70	0,11
23	8,54	2,25	2,07	47,00	0,00
24	8,83	2,10	1,93	43,70	0,35
25	8,86	1,95	1,80	45,10	0,02
26	8,73	1,98	1,83	32,70	0,13
27	8,79	1,90	1,74	40,30	0,07
28	8,88	2,03	1,90	48,90	0,03
29	8,67	1,99	1,84	34,30	0,20
30	8,61	2,11	1,94	43,80	0,35
promedio	8,59	2,06	1,91	42,57	0,17
desviación	0,15	0,08	0,08	6,06	0,18
error	1,68	4,01	3,91	14,22	107,29

Tabla 8. Resultados corte directo para humedad del 8.5%

**RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE
DIRECTO PARA UNA HUMEDAD DE 12,5%.**

ENSAYO No	HUMEDAD (%)	γ (g/cm³)	γ_d (g/cm³)	ϕ (°)	C (Kg/cm²)
1	12,41	2,19	1,95	37,90	0,62
2	12,53	2,15	1,91	44,80	1,54
3	12,65	2,10	1,95	41,30	0,73
4	12,57	2,22	1,96	36,10	0,87
5	12,42	2,31	2,06	39,80	0,96
6	12,52	2,25	2,00	48,00	1,37
7	12,46	1,70	1,51	45,60	0,61
8	12,66	2,43	2,16	49,20	1,61
9	12,50	2,50	2,19	28,90	0,97
10	12,45	2,30	2,02	52,40	0,12
11	12,48	2,27	2,02	39,40	0,94
12	12,57	2,35	2,10	42,70	0,71
13	12,60	2,20	2,03	41,30	0,33
14	12,64	2,21	1,96	43,40	0,76
15	12,64	2,31	2,05	43,60	1,07
16	12,50	2,34	2,10	39,80	1,13
17	12,51	2,41	2,14	46,00	1,11
18	12,53	2,23	1,98	40,90	0,84
19	12,33	2,30	2,02	45,60	1,05
20	12,52	2,30	2,00	52,60	0,00
21	12,60	2,40	2,10	35,90	1,36
22	12,60	2,31	2,10	45,50	0,46
23	12,55	2,34	2,10	37,50	1,23
24	12,46	2,35	2,10	39,90	1,06
25	12,50	2,33	2,10	37,30	0,45
26	12,45	2,34	2,10	36,60	1,00
27	12,60	2,30	2,04	42,90	0,33
28	12,64	2,30	2,00	46,70	0,27
29	12,41	2,19	1,95	45,50	0,58
30	12,40	2,20	1,95	42,20	0,60

promedio	12,52	2,27	2,02	42,31	0,82
desviación	0,09	0,14	0,12	5,13	0,41
error	0,69	6,09	5,94	12,12	49,33

Tabla 9. Resultados corte directo para humedad del 12.5% (Óptima)

RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO PARA UNA HUMEDAD DE 16,5%.					
ENSAYO No	HUMEDAD (%)	γ (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)	ϕ (°)	C (Kg/cm ²)
1	16,71	2,25	1,93	49	0,313
2	16,54	2,25	1,93	45,7	0,218
3	16,64	2,29	1,97	41,8	0,446
4	16,62	2,29	1,96	45,4	0,372
5	16,56	2,31	1,98	32,8	1,008
6	16,55	2,26	1,94	41,3	0,721
7	16,57	2,17	1,86	36,2	0,355
8	16,55	2,18	1,89	30,5	0,479
9	16,56	2,28	1,95	41,2	0,599
10	16,57	2,3	1,97	39,6	0,466
11	16,64	2,3	1,97	45,2	0,396
12	16,53	2,29	1,97	34	0,743
13	16,51	2,32	1,99	37,6	0,59
14	16,55	2,36	2,03	41,7	0,623
15	16,44	2,33	2	34	0,628
16	16,54	2,31	1,98	32,4	0,707
17	16,6	2,35	2,02	28	0,752
18	16,55	2,35	2,01	37,8	0,659
19	16,6	2,47	2,12	30,6	0,869
20	16,41	2,44	2,1	39,4	0,491
21	16,52	2,31	1,98	38	0,556
22	16,51	2,27	1,95	36,3	0,595
23	16,55	2,34	2,01	34	0,687
24	16,6	2,33	1,99	45,1	0,208
25	16,54	2,36	2,03	27,4	0,818
26	16,48	2,42	2,07	35,3	0,735
27	16,51	2,37	2,04	29,8	0,649
28	16,6	2,32	1,96	35,1	0,636
29	16,56	2,45	2,1	34,5	0,601
30	16,55	2,27	1,95	39,6	0,242
promedio	16,56	2,32	1,99	37,31	0,57
desviación	0,06	0,07	0,06	5,60	0,19
error	0,35	2,97	2,95	15,02	34,06

Tabla 10. Resultados corte directo para humedad del 16.5%

La tabla 11. muestra un resumen de los resultados del ángulo de fricción interna y los pesos específicos húmedos y secos obtenidos en el ensayo de corte directo.

HUMEDAD %	ϕ (%)	γ (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)
8,5	42,57	2,06	1,91
12,5	42,31	2,27	2,02
16,5	37,31	2,32	1,99

Tabla 11. Resumen resultados obtenidos corte directo

5.5. CBR (CALIFORNIA BEARING RATIO)

Al igual que con los ensayos de corte directo, se realizaron 90 ensayos CBR, de los cuales 30 se hicieron con humedad del 8,5%, 30 con una humedad del 12,5% y 30 con una humedad del 16,5%. Los resultados se muestran a continuación:

No ENSAYO	HUMEDAD (%)	CBR (%)
1	8,3	61
2	8,5	54
3	8,5	118
4	8,5	99
5	8,5	113
6	8,4	126
7	8,6	87
8	8,6	122
9	8,2	114
10	8,3	129
11	8,5	97
12	8,6	101
13	8,3	88
14	8,3	95
15	8,5	99
16	8,4	70
17	8,5	131
18	8,7	92
19	8	81
20	8,2	105
21	8	98
22	8,5	71
23	8,2	84
24	8,8	133
25	8,3	102
26	8,9	81
27	8,7	53
28	8,9	116
29	8,6	77
30	8,5	89
PROMEDIO	8,46	96,20
DESV STD	0,23	22,15
ERROR(%)	2,66	23,02

Tabla 12. Resultados CBR para humedad del 8.5%

RESUMEN CBR HUMEDAD DEL 12,5%		
No ENSAYO	HUMEDAD (%)	CBR (%)
1	12,5	78
2	12,5	78
3	12,5	82
4	12,6	96
5	12,9	90
6	12,5	91
7	12,7	61
8	12,3	73
9	12,3	67
10	12,8	68
11	12,2	73
12	12,5	84
13	12,5	76
14	12,5	81
15	12,5	95
16	12,5	78
17	12,5	70
18	12,5	72
19	12,5	70
20	12,5	120
21	12,5	97
22	12,5	118
23	12,5	69
24	12,5	51
25	12,5	93
26	12,5	97
27	12,5	91
28	12,5	91
29	12,5	98
30	12,5	76
PROMEDIO	12,5	82,80
DESV STD	0,13	15,41
ERROR(%)	1,01	18,61

Tabla 13. Resultados CBR para humedad del 12.5% (Óptima)

RESUMEN DE CBR HUMEDAD DEL 16,5%		
No ENSAYO	HUMEDAD (%)	CBR (%)
1	16,5	42
2	16,5	32
3	16,5	31
4	16,5	31
5	16,1	26
6	16,5	49
7	16,5	37
8	16,5	29
9	16,5	27
10	16,5	29
11	16,5	25
12	16,5	63
13	16,1	25
14	16,5	32
15	16,5	25
16	16,1	55
17	16,2	48
18	16,5	46
19	16,2	22
20	16,5	32
21	16,5	56
22	16,5	51
23	16,9	41
24	17	41
25	16,9	34
26	16,8	53
27	16,6	46
28	16,1	53
29	16,3	41
30	16,2	56
PROMEDIO	16,47	39,27
DESV STD	0,23	11,65
ERROR(%)	1,42	29,68

Tabla 14. Resultados CBR para humedad del 16.5%

La tabla 16. Muestra los resultados promedio del ensayo CBR Tipo I para cada humedad trabajada en esta tesis.

HUMEDAD %	CBR Tipo I (%)
8,5	96,2
12,5	82,8
16,5	39,27

Tabla 15. Resumen resultados ensayos CBR

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este tipo de material otorgó una humedad óptima del 12.5% para la cual se realizaron ensayos de corte directo y CBR método I, esta misma humedad sirvió como parámetro para realizar los otros tipos de ensayos, es decir por debajo de la óptima 8,5% y por encima de la óptima 16,5%; los cuales sirvieron para la formación de las graficas y la observación del comportamiento de este tipo de suelo.

Al realizar los ensayos de Corte Directo y CBR Tipo I con sus respectivas humedades, se analizaron las siguientes tendencias

- Angulo de fricción interna Vs Humedad.
- Cohesión Vs Humedad.
- Densidad seca Vs Humedad.
- CBR Vs Humedad
- CBR Vs Angulo de Fricción Interna.

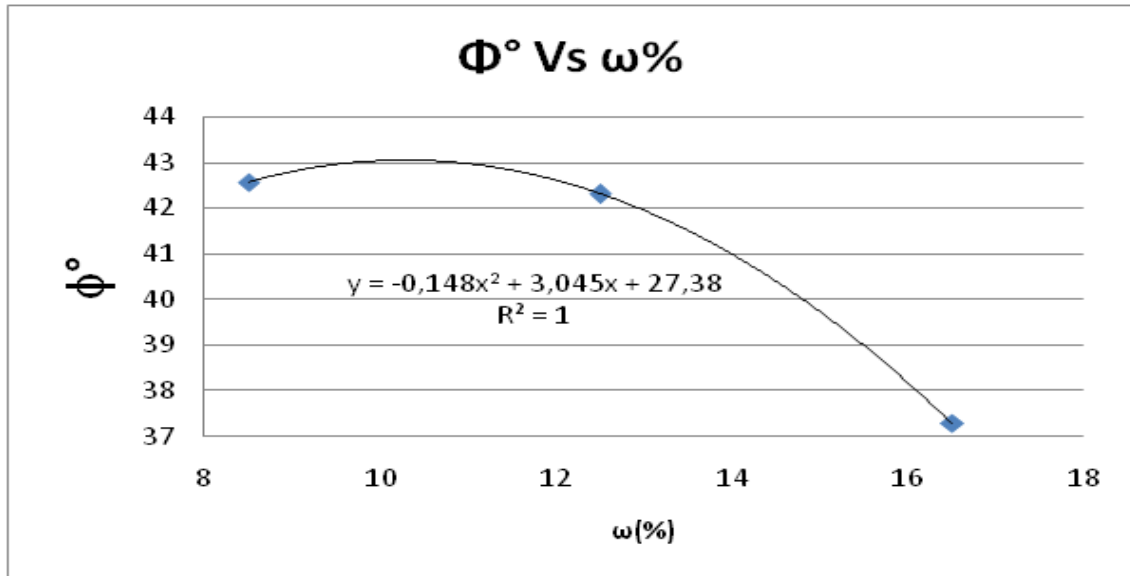


Figura 8. Ángulo de Fricción Interna Vs Humedad

El máximo valor del ángulo de fricción (Φ) no se alcanza con la humedad óptima del Proctor. En la fig. 8 se observa que el valor máximo del ángulo de fricción se obtiene para una humedad del 10,5%.

A pesar del ajuste parabólico todo parece indicar que para las humedades de 12,5% y 8,5% el ángulo de fricción (Φ) es prácticamente igual.

Después de la humedad óptima el ángulo de fricción (Φ) cae, es decir la envolvente de falla disminuye su pendiente.

La fig. 8 Siempre mostró que el ángulo de fricción disminuía al aumentar la humedad, sin embargo y por la forma de la misma gráfica podría darse alguna de las siguientes situaciones: a) que efectivamente el ángulo de fricción siempre disminuya al aumentar la humedad y b) que exista una humedad para la cual dicho ángulo de fricción sea máximo, por lo tanto se recomienda en una futura etapa de esta investigación analizar humedades inferiores a las estudiadas.

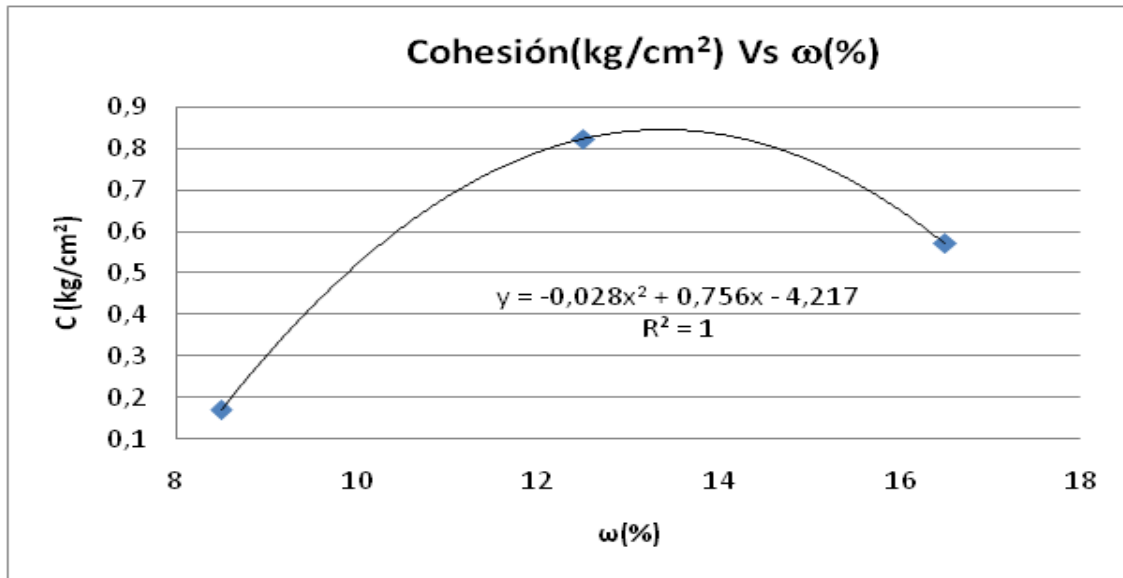


Figura 9. Cohesión Vs Humedad

Antes de hacer análisis sobre la tendencia mostrada en la fig. 9, resaltar que los porcentajes de error de la cohesión están por encima del 30% y por ende una dispersión elevada, además este análisis no está dentro del objeto de la presente investigación.

La fig. 9 muestra que a medida que se aumenta la humedad, el valor de la cohesión también aumenta hasta alcanzar un valor máximo de dicha cohesión de 0,83g/cm² cuando el valor de la humedad es del 13,4%.

Una vez se alcanza el valor máximo de dicha cohesión, esta disminuye, si se sigue aumentando la humedad.

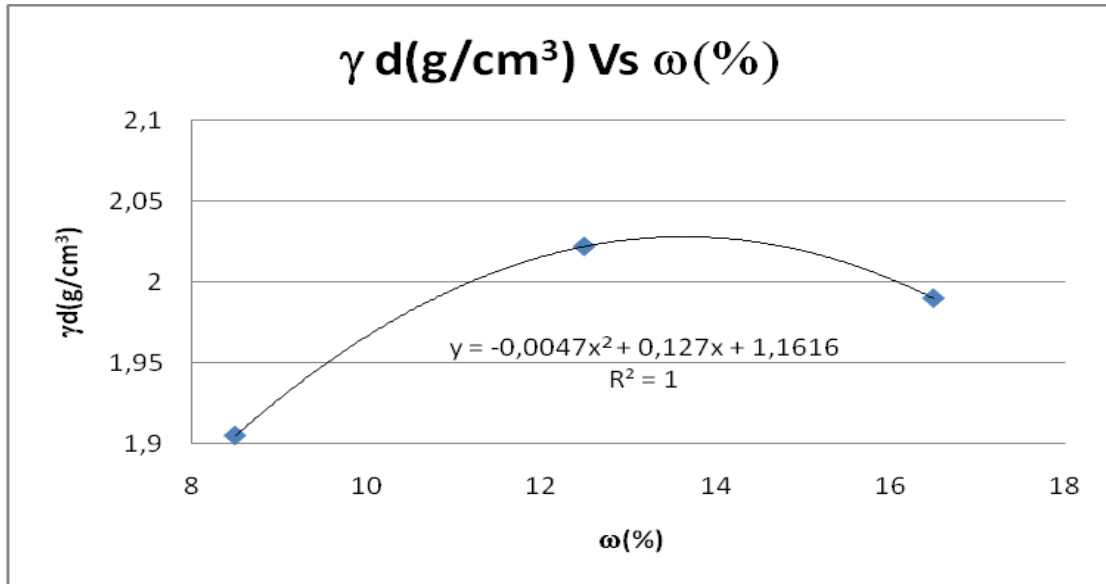


Figura 10. Densidad Máxima Seca Vs Humedad

La fig. 10 muestra la variación de la densidad seca (γ_d) versus humedad, la cual es similar a un Proctor. Pero vale la pena aclarar que la densidad es la obtenida en los ensayos de corte directo.

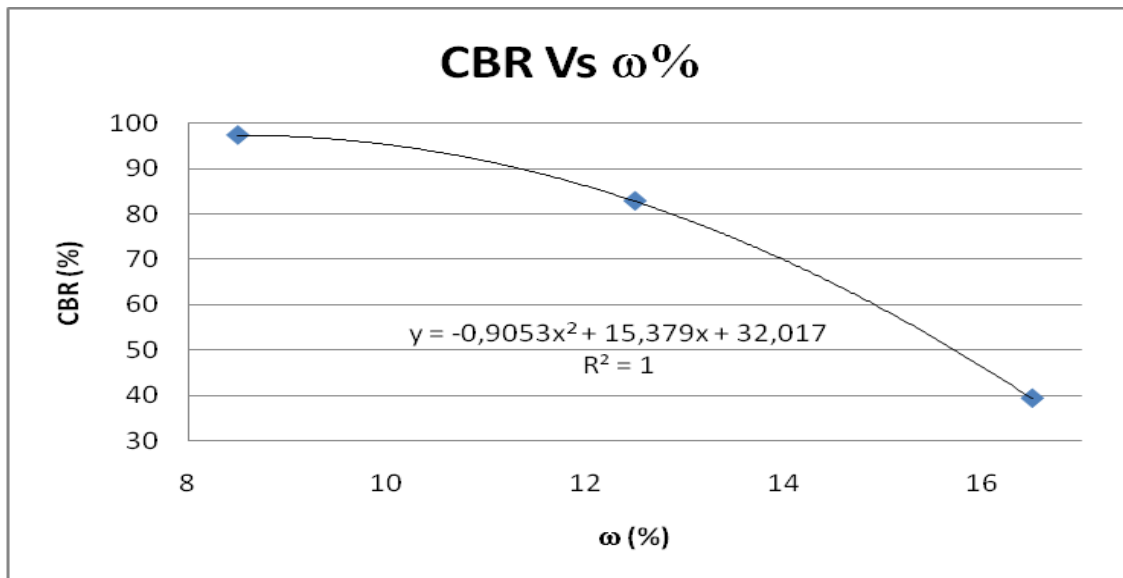


Figura 11. CBR VS Humedad

La fig. 11 muestra una relación inversa entre el CBR y la humedad, para los valores de humedad estudiados.

Cuando el suelo se acerca a la saturación los esfuerzos efectivos son menores por lo tanto es muy probable que el agua de poros no alcanza a drenarse y el ensayo prácticamente pasa de consolidado drenado (CD), a consolidado no drenado (CU).

Los esfuerzos cuando la humedad aumenta son transmitidos al agua.

En este proyecto no se estudiaron humedades inferiores al 8.5%. Se sugiere en una próxima etapa de la investigación analizar las mismas variables con humedades menores y corroborar si efectivamente el CBR disminuye con la humedad o existe una humedad igual o inferior al 8.5% que arroja el CBR máximo.

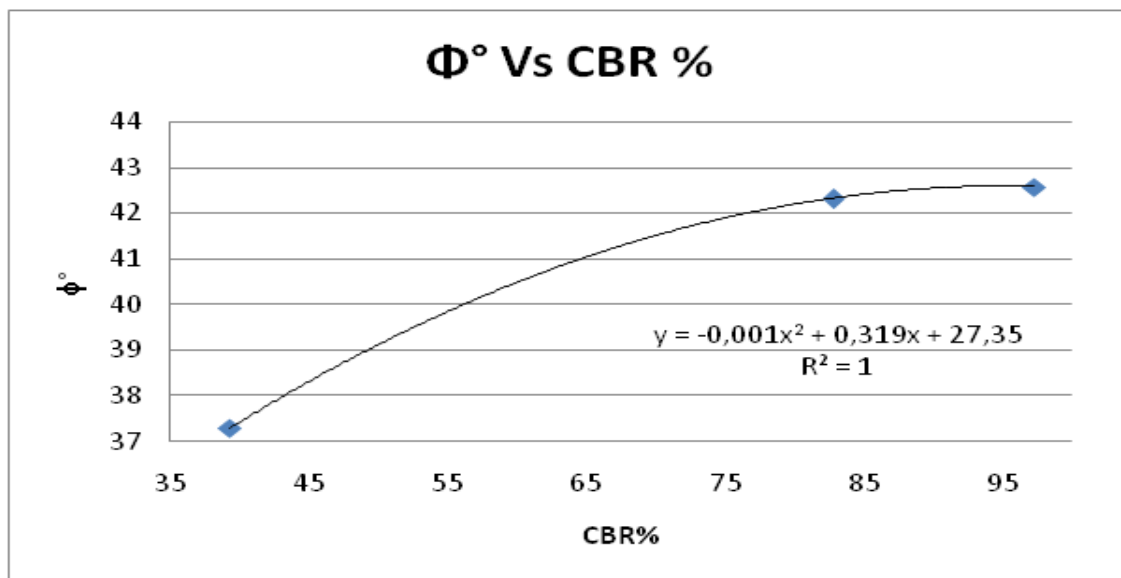


Figura 12. Ángulo de Fricción Vs CBR

Se observa que el valor del ángulo de fricción interna (Φ) aumenta a medida que el valor del CBR también aumenta es decir que este incremento es simultáneo para estos dos parámetros de resistencia.

La principal utilidad de la fig. 12 es el poder obtener un valor del ángulo de fricción interna (Φ) a partir del CBR dado que en suelo denominado Arena Limosa (SM) es

muy difícil obtener muestras inalteradas para el ensayo de corte directo debido a la cohesión baja, la cual hace que las muestras se desmoronen al pasarlas de la formaleta al aparato de corte directo.

Los resultados de la fig. 12 son válidos para arenas limosas con CBR entre 39% y 97%.

El CBR máximo alcanzado en este proyecto fue del 97.3% al cual correspondió un ángulo de fricción (Φ) de 43°.

La fig. 12 parece ser asintótica, tendiendo el valor del ángulo de fricción (Φ) cercano a 43°.

7. CONCLUSIONES

- Para obtener el suelo a estudiar fue necesario buscar diferentes tipos de fuentes dentro de los terrenos de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga y realizar los ensayos correspondientes para su clasificación, los cuales nos arrojaron diferentes tipos de arenas. El material escogido para el estudio según el sistema unificado corresponde a arenas limosas (SM). Se encontró en la corona del muro de tierra armada ubicado cerca al bloque D.
- Para el suelo seleccionado se obtuvo una humedad óptima de 12.5% y una densidad máxima de 1.92 g/cm³ por medio de ensayos Proctor modificado.
- Para buscar tendencias entre los diferentes parámetros geotécnicos de las arenas limosas (SM) estudiadas se realizaron 90 ensayos de corte directo y 90 ensayos de CBR Tipo I, de los cuales la tercera parte de los ensayos se realizaron sobre muestras compactadas con una humedad del 8.5%, otra tercera parte de los ensayos se realizaron sobre muestras compactadas con una humedad de 12.5% (humedad óptima), y la tercera restante de los ensayos se realizó sobre muestras compactadas con humedades del 16.5%.
- Para las arenas limosas estudiadas se obtuvo una relación entre el ángulo de fricción interna (ϕ) y el CBR, dicha relación muestra que al aumentar el CBR también aumenta el ángulo de fricción interna. La línea de tendencia encontrada que mejor explica este comportamiento es un polinomio de grado dos cuya ecuación es: $y = -0.001x^3 + 0.319x + 27.35$

- Para el tipo de suelo estudiado y humedades trabajadas se observó una relación inversa entre el valor de la humedad y el CBR. La línea de tendencia que mejor explica esta relación fue un polinomio de segundo grado.
- En el trabajo realizado se observó que a medida que se aumentaba la humedad a partir de un valor inicial de 8.5% y hasta un valor final de 16.5%, el valor del ángulo de fricción interna siempre disminuyó. Sin embargo también se puede observar que para los valores de humedades de 12.5% y 8.5% el ángulo de fricción interno obtenido fue prácticamente lo mismo, es por tal motivo que la ecuación que mejor explica la variación del ángulo de fricción contra la humedad es un polinomio de grado dos, ya que si el valor del ángulo de fricción obtenido para la humedad de 8.5% hubiera sido notablemente mayor que el encontrado para una humedad del 12.5% probablemente la mejor línea de tendencia hubiera sido una recta con pendiente negativa.
- Con los resultados de 90 ensayos de corte directo se obtuvo además la variación del peso específico seco (γ_d) con la humedad, esta variación se ajustó a una parábola sin embargo vale la pena aclarar que para humedades entre 8.5% y 16.5% dicho peso específico seco no varió en más de 0.11g/cm^3 , por lo tanto reviste mayor análisis.
- Los resultados obtenidos y los análisis derivados a partir de dichos resultados, son validos únicamente para las arenas limosas con un contenido de finos de aproximadamente el 40% y de arenas del 60% compactados con humedades entre 8.5% y 16.5%.

- Una de los mayores aportes de este trabajo fue la obtención de una carta con la cual se puede obtener el ángulo de fricción interna a partir del CBR tipo I, dada la dificultad para recuperar muestras de corte directo en arenas limosas debido a su baja cohesión.

8. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

- Debido a que la mina encontrada no era muy grande, y a que en pocos sectores de la Universidad Pontificia Bolivariana se encontraron arenas limosas, los autores del presente trabajo se vieron en la necesidad de reciclar el material dándole a este un máximo de tres usos.
- Al momento de la preparación del material a usar para realizar los ensayos de CBR tipo I y corte directo se tomó la decisión de mezclar con una humedad con un punto porcentual por encima a la deseada, apoyados en la observación de los datos analizados en los primeros ensayos realizados ya que fue necesario repetir algunos de ellos al no alcanzar la humedad deseada al momento de fallarlos. La razones que se atribuyeron a esta baja de humedad alrededor de medio punto porcentual fueron: el tipo de suelo, la manipulación constante de éste, las condiciones medio ambientales de la ciudad de Bucaramanga, ensayos realizados solo baja techo y que éstos no se realizaron de una vez armadas las muestras.
- La Universidad Pontificia Bolivariana a parte de su labor académica también vende servicios de laboratorio al sector constructor y consultor de la región, para brindar un mejor servicio a sus clientes, los laboratorios de ingeniería Civil en ocasiones les prestan los moldes de corte directo y CBR; de tal forma que al darse esta situación los estudiantes en tesis se quedan con muy pocos o ninguno para poder realizar sus trabajos. Para darle solución a este inconveniente se recomienda adquirir unos moldes (60) destinados solamente a los estudiantes en tesis y otros (60) para los clientes, tanto para el ensayo de corte directo y CBR. Además también se recomienda por lo menos 10 falsos fondos.
- En suelos arenosos el número de golpes requeridos para introducir la formaleta en el terreno es muy alto, por lo tanto se recomienda a la

Universidad idear un mecanismo para introducir dichas formaleas aplicando una presión mecánica o hidráulica que reemplace al hincado.

- Para corroborar o rectificar algunas tendencias obtenidas en este trabajo se recomienda complementarlo con humedades inferiores al 8.5%. Como se evidenció en la tesis la extracción de muestras se dificultaba para muestras con humedades bajas, ya que estas se dañaban, por lo tanto se recomienda idear y construir moldes desarmables para el ensayo de corte directo.
- Debido al uso frecuente de la prensa multiusos para suelos marca Geotest se recomienda calibrarla por lo menos una vez al año para obtener resultados confiables
- Se recomienda a futuros tesisas que realicen temas similares que procesen los resultados inmediatamente se realicen los ensayos de laboratorio para detectar anomalías, errores y tendencias equivocadas y corregir a tiempo.
- Es conveniente en el trabajo realizado aquí, realizar ensayos de control cada vez que se extraiga material de la fuente para estar seguro que el material sea el mismo y no confiarse en la apariencia del material.
- Dentro de las políticas visionarias de la universidad recomendamos seguir invirtiendo en este tipo de investigaciones, lo cual nos llevará en un futuro no muy lejano a contar con laboratorios y sitios exclusivos para investigación y desarrollo.

RESEÑA BIBLIOGRAFICA

- JUAREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. Mecánica de Suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos TOMO I. Tercera edición. México D.F. Limusa Noriega Editores, 2000. 642 pág.
ISBN: 968 – 18 – 0069 – 9
- CRESPO VILLALAZ, Carlos. Mecánica de Suelos y Cimentaciones. Cuarta edición. México Limusa Noriega Editores, 1990. 641 pág.
- BERTRAM, George E. Ensayos de Suelos Fundamentales Para la Construcción.
- LERMA, Héctor Daniel. Presentación de Informes: El documento Final de Investigación. Bogotá, D.C.: Ecoe, 2003 78 pág. ISBN 958 - 648 - 350- 9.
- BOWLES, Joseph E. Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil Traducción 2ª ed. Bogotá: Mc GRAW – HILL, 1981. 131 p. ISBN 968 – 451-046-2
- SANCHEZ SABOGAL, Fernando. Curso de Laboratorio de Pavimentos.

