

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

La humedad de los suelos cambia temporal y espacialmente como respuesta a factores ambientales, produciendo la absorción y por lo tanto saturaciones de los suelos, que influyen el proceso de compactación afectando a las fases sucesivas en su comportamiento, la masa y el volumen cambian disminuyendo la densidad de los suelos.

Como se trata de un problema del cual no se tiene mucha información, se determinó realizar un estudio del comportamiento de los suelos compactados y la influencia de la humedad.

Un trabajo corresponde a Salomón R. Alvarado (Tarija - 2006), quien realizó un: “Análisis de la zona de equilibrio en compactación de suelos... En este trabajo se manejaron teorías sobre la compactación de suelos arcillosos expansivos, atendiendo a su zona de equilibrio, densidad y humedad por compactación en ciclos de secado y saturación, así como estabilidad volumétrica y no así al análisis de la mejora de las características.

Lo que el autor propone es estudiar los cambios en las propiedades del suelo fino compactado con diferentes esfuerzos, sometido a saturación, de tal manera que permita tener más consideraciones sobre la elección del esfuerzo de compactación más adecuado, que nos brinde buenos resultados reduciendo la misma y bajando los costos.

Este trabajo se basara en artículos obtención de conceptos sobre el problema observado, normas para la extracción de procedimientos a seguir en ensayos y pruebas de laboratorio de compactación en arcillas expansivas, desarrollando así el criterio en la elección del esfuerzo a usar en compactación de suelos finos, que ayudara en la edificación de caminos para un mejor mantenimiento y por lo tanto un buen servicio para la población.

1.2. Justificación

En la actualidad aunque existen diferentes métodos para realizar ensayos de compactación y determinar la densidad máxima de un suelo, se hace notable que el Método con el Proctor Modificado es el más conocido y utilizado en nuestro medio. La existencia de los diferentes tipos de suelos nos lleva a variados problemas con cada uno de ellos al momento de realizar una obra, como son las bases para caminos, fundaciones de edificaciones, etc. dentro de estos suelos encontramos al grupo de las arcillas con un alto potencial expansivo debido a su susceptibilidad hacia el agua, lo vuelve un material difícil de trabajar, clasificándolo en algunos casos como un terreno malo, procediendo a su descarte o reemplazo con materiales más trabajables, pero conllevando esto un mayor gasto, en otros casos la opción elegida es utilizar el suelo pero para lograr que alcance las características que se desean se someten a procesos de compactación más intensos, es ahí donde el suelo es mejorado pero se olvida el hecho de que usar una mayor energía no siempre traerá buenos resultados pues puede producirse una sobre compactación, que en ciertas ocasiones puede volver aún más susceptible el suelo a la acción del agua. Los suelos finos compactados van a pasar por una serie de factores a lo largo de su vida de servicio, entre los cuales el que más afectará a este será la humedad del ambiente.

Es ahí que el presente proyecto pretende realizar un estudio sobre el suelo fino compactado con diferentes energías, que después de ser expuesto a ciclos de saturación-secado y mediante ensayos en laboratorio observar cómo varían las propiedades del material y determinar las zonas de equilibrio así como la evolución de su resistencia después de los cambios de humedad, para cada situación, de esta manera se justifica que el estudio puede arrojar información útil sobre el comportamiento del suelo compactado, en condiciones de servicio, con diferentes energías y cuál es la adecuada.

1.3. Determinación del problema

- Problema de investigación.

¿Cómo un estudio, puede establecer la forma de influencia, que tiene la saturación de un suelo fino en el grado de compactación, sobre su densificación y resistencia?

- Breve descripción sobre: Delimitación de tiempo, factibilidad y espacio.

Delimitación de tiempo; para la determinación de las variables a explorar, podemos indicar que realizar las actividades que se llevarán a cabo se necesitara bastante tiempo el cual dependerá en gran medida de la disponibilidad de instalaciones y el clima.

Factibilidad; se puede apreciar la existencia de una variación en las propiedades de un suelo arcilloso compactado, a medida que este es afectado por la humedad del ambiente, es por ello que se propone un estudio sobre esa variación y su relación con el energía de compactación usada, al contemplar que sus propiedades disminuyen a pesar de uso de una mayor energía, presentando la posibilidad de que al usar menos energía se puede obtener los mismos resultados a menor costo.

Espacio; en cuanto al ambiente requerido se trata de un laboratorio que cuente con el equipo necesario para realizar los ensayos, así como disponibilidad del mismo.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Estudiar los cambios del suelo arcilloso expansivo compactado, con energía Estándar y Modificada, mediante ensayos en laboratorio de muestras sometidas a periodos de saturación, de tal manera que permita conocer el comportamiento del suelo compactado en su vida funcional y así identificar la energía adecuada a utilizar que brinde buenos resultados reduciendo costos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar la conceptualización sobre mecánica de suelos, ensayos de compactación de los Proctores T-180 y T-99, características de arcillas expansivas compactadas y su respuesta ante el agua.

- Determinar la caracterización del suelo arcilloso mediante ensayos de laboratorio de granulometría, límites de consistencia, clasificación por los sistemas AASHTO y USCS.
- Determinar la densidad seca máxima y humedad óptima de la compactación con Proctor T-180 y T-99, así como el CBR correspondiente.
- Establecer en laboratorio la influencia del agua en el suelo estudiado y compactado inicialmente con las humedades y densidades correspondientes al T-99 y T-180, sometiendo estos a ciclos de inmersión.
- Evaluar los cambios en las propiedades del suelo mediante una comparación antes y después de ser sometido este suelo a saturación y sus efectos en la densidad y el CBR del suelo anteriormente de subrasante.
- Identificar la energía de compactación a usar en arcillas expansivas, en base a la variación en la densidad y el CBR de las arcillas compactadas después de pasar por periodos de inmersión o saturación.

1.5. Hipótesis

Si una arcilla expansiva se compacta en laboratorio con determinada energía (T-180 y T-99) y después se somete a varios periodos o ciclos de saturación, esta mostrara entonces los cambios de la densidad seca, humedad, la resistencia y expansión que se presenta un suelo compactado en condiciones normales de servicio, entonces se podrá establecer la influencia del agua sobre estas propiedades y se logrará conocer la energía de compactación más adecuada a usar.

1.6. Identificación de variables.

Variable independiente:

- Ciclos de Saturación.
- Energía de compactación

Variable dependiente:

- Densidad máxima.
- Humedad óptima.
- Densidad de equilibrio.
- Resistencia.
- Expansión.

1.7. Identificación del tipo del diseño de investigación

Para este tema se eligió el tipo de investigación causal, la cual relaciona variables considerando causas y efectos en su comportamiento.

El método utilizado en este tipo de investigación será la experimentación, el investigador manipulara las variables independientes en un ambiente controlado para medir los efectos de las variables dependientes.

1.8. Alcance

En nuestra zona es predominante la existencia de suelos arcillosos, es por ello que el presente trabajo se centrará en el estudio de suelos arcillosos altamente expansivos debido al problema que representan.

Para la clasificación e identificación del suelo se realizara por medio de los métodos de clasificación AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el sistema de clasificación unificado USCS (Unified Soil Clasification System) que son los más utilizados por la mayor parte de los ingenieros de todo el mundo.

Para la realización de los ensayos de compactación estándar y modificada, así como resistencia, limites, granulometría, peso específico, etc. se realizará una cantidad de ensayos representativos para poder proceder al estudio de cada resultado de acuerdo a lo indicado en el tomo correspondiente a suelos del Manual Técnico para el Diseño de Carreteras en Bolivia, Volumen 4, Ensayos en Suelos y Materiales.

Para mejores interpretaciones de los resultados se usarán gráficas donde se podrá apreciar la variación de densidades de cada energía, humedad, la expansión que sufran debido a los ciclos.

En general en el presente se propone estudiar el comportamiento de los suelos expansivos compactados con diferente energía y sometidos a ciclos de saturado y secado, con el fin de observar cómo evolucionan sus propiedades, refiriéndose entonces a un estudio donde las características solo serán observadas y se medirá como son afectadas, es así que no se pretende realizar alguna acción para mejorar tales características.

1.9. Limitaciones

En la realización del presente trabajo se encuentran algunos factores que van a limitar o restringir el alcance de los ensayos a ejecutar:

- El número de ensayos dependerá de la disponibilidad del equipo a los que se tenga acceso en este caso, estará definido a las vacantes ya que el laboratorio también es usado como aula de aprendizaje.
- El indefinido tiempo necesario para realizar los ciclos de saturación y secado, pues esto dependen del clima, es decir el ciclo de saturación dependerá de factores que no pueden controlarse totalmente al igual que el secado.

CAPÍTULO II

SATURACIÓN DE SUELO FINO EN EL PROCESO DE COMPACTACIÓN

CAPÍTULO II

SATURACIÓN DE SUELO FINO EN EL PROCESO DE COMPACTACIÓN

2.1. Definición de los suelos

La interpretación del termino suelo varía de acuerdo con sus respectivos intereses. En Ingeniería Civil, son los sedimentos no consolidados de partículas sólidas, fruto de la alteración de las rocas, o suelos transportados por agentes como el agua, hielo o viento con líquidos y gases que ocupan los espacios entre ellas, que pueden tener materia orgánica. Para el geólogo el suelo es todo material intemperizado en el lugar en que ahora se encuentra y con contenido de materia orgánica cerca de la superficie.¹

Los productos del ataque de los agentes de intemperismo pueden quedar en el lugar, directamente sobre la roca de la cual derivan, dando así origen a los suelos llamados residuales. Pero esos productos pueden ser removidos del lugar donde se formaron, por los mismos agentes geológicos y ser depositados en otra zona. Así se generan los suelos que yacen sobre otros estratos sin tener una relación directa con estos, los cuales son denominados transportados.

Características de los suelos

Existe una variedad de suelos con características diferentes por lo que se clasifica en diferentes categorías y tipos. Las características para tener en cuenta son:

- Granulometría; es la determinación de la proporción de diferentes tamaños de las partículas que se encuentran presentes en un suelo.
- Contenido de humedad; El contenido de agua del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o

¹ Juárez B., Rodríguez R., (2005), *Mecánica de suelos*, México DF, Grupo Noriega Editores, Cap. I.

"agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material. Calcúlese el contenido de agua de la muestra con la ecuación:

$$w = \frac{(w_1 - w_2)}{(w_2 - w_r)} \cdot 100 = \frac{w_w}{w_s} \cdot 100 \quad (1)$$

w = Contenido de agua (%)

w_1 = Peso del recipiente más muestra húmeda (gr)

w_2 = Peso del recipiente más muestra seca (gr)

w_r = Peso del recipiente (gr.)

w_w = Peso del agua (gr.)

w_s = Peso del suelo seco (gr.)

- Consistencia; se define como la firmeza o solidez que presenta la masa de suelo, está relacionada a las estructuras que las partículas del suelo forman entre sí. En suelos de finos se define por el contenido de humedad.
- Cohesión; se refiere a la capacidad que tienen las partículas del suelo de permanecer unidas como conjunto.
- Estructura; se define como al arreglo geométrico de las partículas del suelo respecto unas de otras. Los factores que influyen son: la textura, tamaño, composición mineralógica de partículas y el contenido de agua del suelo.
- Peso específico, de los suelos depende de la clase de minerales que lo componen, así como su mayor o menor grado de material orgánica, este varía entre 2.0 a 3.0. se adoptado como tipo de comparación el peso específico de la arena de cuarzo, cuyo valor es 2.65, las arcillas tienen generalmente pesos específicos de 2.7 a 3.0.² se define como el peso unitario del material, dividido por el peso unitario del agua destilada a 4°C, es adimensional, llamada también

² R. Valle Rodas, (1963), Carreteras, Calles y Autopistas, Caracas, ED el Ateneo, Cap. V.

gravedad específica. Se representa por G_s , pudiéndose calcular utilizando cualquier relación de peso de la sustancia a peso del agua, siempre y cuando se consideren volúmenes iguales de material y agua.

Para su determinación se realiza un ensayo en base a la norma ASTM D 854 y permite hallar la cantidad de vacíos que hay en un determinado suelo y clasificarlo.

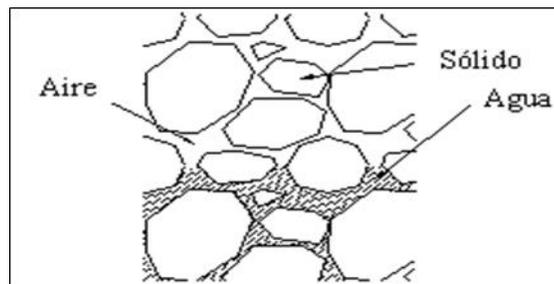
Tabla N° 2.1. Peso específico relativo de diferentes suelos.

TIPO DE SUELO	G_s
Arena de cuarzo	2.64 - 2.66
Limo	2.67 - 2.73
Arcilla	2.70 - 2.90
Yeso	2.60 - 2.75
Loess	2.65 - 2.73
Suelo Orgánico	< 2

Fuente: Manual de laboratorio, Quispe B.

En líneas generales se puede decir que el suelo está formado por partículas minerales. Entre estas se forman huecos o vacíos que unas veces están llenos de aire o agua, o de ambos elementos a la vez, además de gases. En la figura 2.1. se muestra una fracción de suelo agrandada de tal manera que pueden observarse los espacios vacíos entre partículas.

Figura N° 2.1. Composición del suelo



Fuente: Fases de suelos, Apuntes de ingeniería civil.

Cada uno de estos componentes principales se denomina fase del suelo.

- La fase sólida está compuesta de partículas minerales del suelo, los minerales constituyen la base del armazón sólido que soporta al suelo. Cuantitativamente en un suelo normal la fracción mineral representa de un 45-49% del volumen del suelo. Pero dentro de esta fase constituye, para un suelo representativo, del orden del 90-99% (el 10-1% restante es materia orgánica). Representa la fase más estable del suelo y por tanto es la más representativa y la más ampliamente estudiada.
- La fase líquida, corresponde al agua que se ubica en los espacios vacíos entre partículas, se caracteriza por su variabilidad en el espacio. La dinámica general del agua en el suelo, está relacionada con el exterior en lo que se refiere a los aportes, como son las fuentes, la lluvia o la infiltración, y a las pérdidas, como son la evaporación o la alimentación de las aguas subterráneas. La fase líquida circula a través del espacio poroso, quedando retenida en los poros del suelo, está en constante competencia con la fase gaseosa.³
- La fase gaseosa corresponde al aire, los espacios vacíos los restantes que no ocupa el agua son ocupados por el aire, también por otros gases (vapores sulfurosos, anhídrido carbónico, etc.). Debido a sus características intrínsecas como fluido, la fase gaseosa presenta una marcada similitud con la fase líquida del suelo, sobre todo en lo que se refiere a su dinámica, aunque tiene algunas diferencias con respecto a ésta. La fase gaseosa del suelo se supone que tiene una composición parecida a la del aire.

2.2. Suelo saturado

Se dice que un suelo está saturado cuando contiene únicamente dos fases, la fase sólida y líquida, se denomina así, porque los espacios vacíos de la muestra están ocupados por agua, el cual puede provenir de lluvias, nieve, granizo, humedad atmosférica, etc.

³ Juárez B., Rodríguez R., (2005), *Mecánica de suelos*, México DF, Grupo Noriega Editores, Cap. III.

Un claro ejemplo de este son los suelos yacientes que se encuentran bajo el nivel freático, son suelos totalmente saturados.

Figura N° 2.2. Suelo Saturado



Fuente: Mecánica de suelos, Juárez B, Rodríguez R.

Tras estar un suelo saturado, el agua tiende a moverse por gravedad hacia el subsuelo, hasta llegar a un punto en que el drenaje es tan pequeño que el contenido de agua del suelo se estabiliza. Los suelos saturados presentan una presión debido al agua encerrada en sus poros, los esfuerzos efectivos se pueden definir como aquellas funciones de los esfuerzos totales y de las presiones intersticiales que controlan todas las relaciones esfuerzo-deformación del suelo. Influye así a los suelos provocando hinchamientos y expansiones, afectando a las propiedades del suelo; en compactación altera las características que le fueron dadas al material, en carreteras después de una lluvia abundante el agua entra en los poros del suelo, esta humedad crece continuamente en grandes periodos de lluvia, de forma que la base y la explanada permanecen casi saturados. Los pavimentos de hormigón recogen, según algunas estimaciones, el 40% del agua de lluvia.

Por lo general cualquier masa de esta naturaleza bien compactada, adquiere características de resistencia y difícil deformabilidad que son además muy permanentes en el tiempo y especialmente muy poco dependientes del contenido de agua que el conjunto tenga o adquiera. Mientras que en el caso de los suelos finos arcillosos el panorama es muy diferente, cuando estos suelos finos con una estructura interna abierta, con un alto volumen de vacíos, hace que estos suelos tengan una compacidad de deformación mucho más alta. Si los suelos finos están saturados de agua, al ser

objeto de presión son proclives al fenómeno de consolidación que induce al agua salir del conjunto comprimiendo la estructura del suelo dando lugar a deformaciones muy importantes.

La resistencia de corte del suelo saturado es la resistencia mínima del suelo saturado, o sea la condición más desfavorable del suelo con la saturación completa. Teniendo en cuenta los amplios grados de saturación a que el suelo puede estar sometido en la naturaleza, el conocimiento de la variación de la resistencia asociado a los cambios del contenido de agua (o grado de saturación) conducirán al conocimiento más completo de su comportamiento. Los principales factores que afectan la resistencia al corte son la densidad seca (o el índice de poros), el contenido de humedad y el tipo de estructura (Lambe y Whitman, 1959; Seed y Chan, 1959).

2.3. Suelo no saturado

Se llama también suelo húmedo o parcialmente saturado, a aquel que posee la fase sólida, líquida y gaseosa simultáneamente.

Figura N° 2.3. Suelo no Saturado



Fuente: Mecánica de suelos, Juárez B., Rodríguez R.

Los vacíos están ocupados por aire y agua. Son los más frecuentes en muchas regiones áridas y semiáridas. ⁴

Gran parte de los comportamientos que experimenta un suelo parcialmente saturado están relacionados con la deformación volumétrica. Por este motivo, sobre todo también asociado a las características de los suelos compactados, es por el que se han desarrollado fórmulas y modelos que tratan de explicar esta faceta del comportamiento. Por otra parte hay una gran diversidad de suelos parcialmente saturados, muchos de ellos con características o comportamientos particulares, como arcillas expansivas muy plásticas (con expansión y retracción en ciclos de mojado y secado), depósitos aluviales (suelos colapsables cuando presentan una estructura abierta), coluviales y eólicos, suelos compactados, etc.

La estructura de un suelo no saturado depende del proceso por el cual el suelo ha llegado a ser no saturado, por ejemplo secado de un suelo natural o compactación de rellenos. La estructura de un relleno de arcilla compactada no saturada cambia drásticamente con el método de compactación, el grado de compactación y el contenido de agua.

En suelos finos parcialmente saturados, una presión externa puede producir deformaciones que disminuyen los huecos, las estructuras comprimidas, al cesar la presión externa y al absorber agua tienden a disipar los estados de tensión superficial actuantes entre el agua que ocupaba parcialmente los vacíos y las partículas cristalinas del suelo, liberando energía que permite que la estructura se expanda, de manera que los suelos arcillosos son muy proclives a la compresión o a la expansión cuando se les cambia su grado de saturación. En cualquier caso la estabilidad volumétrica de los suelos finos está amenazada y pueden ocurrir en ellos deformaciones volumétricas muy importantes.

⁴ Barrera M., Garnica P., (2002), *Intr. Mec. Suelos No Saturados*, México DF, Publ. IMT, Cap. III

2.4. Clasificación de suelos

La Clasificación de Suelos se refiere a la agrupación en un rango o grupos de diferentes tipos de suelos, con propiedades y comportamientos similares. Debido a la gran variedad pueden encontrarse en la corteza terrestre es que se han desarrollado varios sistemas de clasificación para poder identificarlos. Generalmente se usan dos métodos para determinar la distribución del tamaño de las partículas del suelo: análisis por tamizado y análisis hidrométrico; el tamizado se realiza en partículas que tienen tamaños mayores a 0.075 mm de diámetro (malla N° 200) y el análisis hidrométrico, se realiza en tamaños de partículas menores de 0.075 mm de diámetro. Dentro del análisis por tamizado tenemos los sistemas:

- **Sistema de Clasificación AASTHO**

El sistema de clasificación AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Nace en EEUU en 1929, el cual fue creado para evaluar los suelos sobre los cuales se contraían las carreteras, es así como es desarrollado por Terzaghi y Hogentogler el sistema AASHO, el cual ha derivado en la actualidad como AASHTO. Describe un procedimiento para clasificar a los suelos en 7 grupos, basándose en los ensayos de laboratorio de granulometría, límite líquido e índice de plasticidad. A la vez estos se evalúan en un “índice de grupo”, el cual se calcula con la siguiente fórmula empírica:

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(W_L - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10) \quad (2)$$

F = Porcentaje que pasa por el tamiz de abertura 0.075mm.

W_L = Límite Líquido

W_p = Límite Plástico

IP = Índice de Plasticidad = $W_L - W_p$

Este Índice de Grupo se presenta en números enteros y si es negativo su valor será igual a 0 (cero). El grupo en que se clasifique, incluyendo el Índice de Grupo, será utilizado para determinar la calidad relativa de suelos para terraplenes, material de subrasante, subbases y bases.⁵

- **Características del Sistema de Clasificación AASTHO**

Tabla N° 2.2. Clasificación de suelos por el sistema AASTHO.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASTHO											
Clasif. General	Suelos Granulares (≤ 35% pasa 0,08 mm)						Suelos Finos (> 35% Bajo 0,08 mm)				
Grupo	A-1		A-3	A-2			A-4	A-5	A-6	A-7	
Sub-Grupo	A-1a	A-1b		A-2-4	A-2-5	A-2-6*	A-2-7*				A-7-5** A-7-6**
2 mm	≤ 50										
0,5 mm	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
0,08 mm	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35			≥ 36				
WL				≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41
IP	≤ 6		NP	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11
Descripción	Gravas y Arenas		Arena Fina	Gravas y Arenas Limosas o Arcillosas			Suelos Limosos		Suelos Arcillosos		
	** A - 7 - 5 : IP ≤ (WL - 30)					** A - 7 - 6 : IP > (WL - 30)					
	$IG = (B / 0,08 - 35)(0,2 + 0,005 (WL - 40)) + (B / 0,08 - 15)(IP - 10) \times 0,01$										
	* Para A - 2-6 y A - 2-7 : $IG = (B / 0,08 - 15)(IP - 10) \times 0,01$ Si el suelo es NP → $IG = 0$; Si $IG < 0 \rightarrow IG = 0$										

Fuente: Clasificación de suelos, Farias D, Niemann J.

- Clasifica a los suelos en tres principales categorías.
- Rango de tamaño de partículas.
- Rango de índice de plasticidad para arcillas y limos.

Disponiendo de los resultados obtenidos en laboratorio y estando posicionado sobre la tabla de clasificación (Tabla N° 2.2.), realiza un recorrido de izquierda a derecha y el grupo correcto será el primero que satisfaga todos los valores, estos valores se

⁵ Farias D., Niemann J., (2005), *Clasif. de suelos*, DuocUC, MS 11-00-05/b.

aplicaran como números enteros, si algún número presenta un decimal éste deberá ser aproximado al entero más cercano.

- **Sistema de Clasificación Unificada**

El sistema USCS (Unified Soil Classification System), designación ASTM D-2487, originalmente fue diseñado para la construcción de aeródromos durante la segunda guerra mundial en 1948 por A. Casagrande para agrupar e identificar los suelos en forma rápida en obras militares durante la guerra.⁶

Divide los suelos en 4 grandes grupos, uno de granos gruesos (G) y finos (C), orgánicos (O) y turbas (Pt), siendo los de mayor interés los dos primeros. Con un prefijo G para la grava del inglés “Gravel” y S para la arena o suelo arenoso del inglés “Sand”. Suelos de grano fino, con un prefijo M para limo inorgánico del sueco “mo y mjala”, C para arcilla inorgánica del inglés “Clay”. Este sistema está basado en la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad, se basa también en la gráfica de plasticidad, que fue obtenida por A. Casagrande (1932).

Se usan sufijos que identifican algunas características particulares del suelo:

W = Bien gradado del inglés “Well graded”.

P = Mal gradado del inglés “Poorly graded”.

L = Baja plasticidad, límite líquido menor a 50%, del inglés “Low plasticity”.

H = Alta plasticidad, límite líquido mayor a 50%, del inglés “High plasticity”.

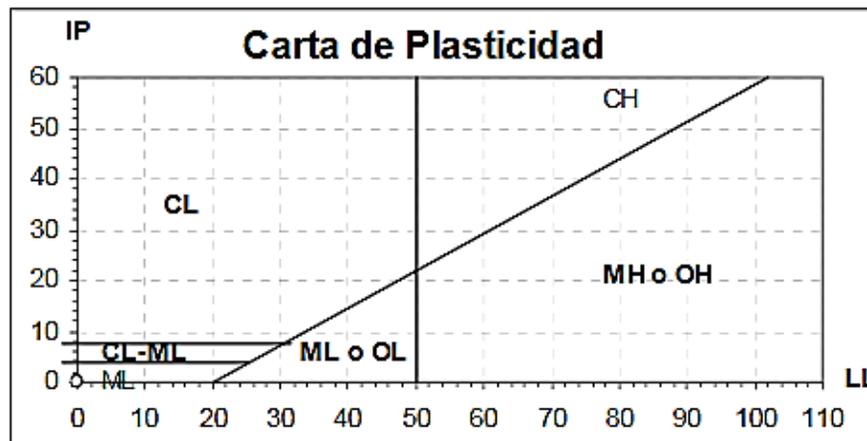
Con estos se pueden hacer combinaciones que ayudan a describir de mejor manera el suelo en cuestión

- **Características del Sistema de Clasificación Unificada**

⁶ Farias D., Niemann J., (2005), *Clasif. de suelos, DuocUC*, MS 11-00-05/b.

Cantos rodados, partículas de roca que no pasan una malla con abertura de 12" (300 mm). Guijarros, partículas de roca que pasan una malla de 12" (300 mm) y quedan retenidas en un tamiz de 3" (75 mm). Grava, partículas de roca que pasan el tamiz de 3" (75 mm) y quedan retenidas en el tamiz N° 4 (4.75 mm), con las subdivisiones: Gruesa y fina. Arena, partículas de roca que pasan el tamiz N° 4 (4.75 mm) y son retenidas en el tamiz N° 200 (0.075mm), con las subdivisiones: Gruesa, media y fina. Arcilla, que pasa por el tamiz N° 200 (0.075 mm), el cual exhibe plasticidad, pero que muestra considerable resistencia cuando se seca. Limo, que pasa el tamiz N° 200 (0.075 mm), de naturaleza no-plástica o ligeramente plástica y exhibe poca o ninguna resistencia cuando se seca al aire. Arcilla Orgánica, es una arcilla con suficiente contenido de materia orgánica como para influir en las propiedades del suelo. Limo Orgánico, con suficiente contenido de materia orgánica como para influir en las propiedades del suelo. Turba, es un suelo compuesto principalmente de materia vegetal en diferentes estados de descomposición.

Figura N° 2.4. Carta de plasticidad.



Fuente: Clasificación de suelos, Farias D, Niemann J.

Una vez efectuado los ensayos de clasificación, se determine la distribución acumulativa de los tamaños de las partículas y se categoría el suelo.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

$$(4)$$

$$C_e = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Tabla N° 2.3. Clasificación de suelos por Sist. Unificado, suelos de grano grueso y fino.

SISTEMA DE CLASIFICACIÓN USCS							SISTEMA DE CLASIFICACIÓN USCS			
GRUESOS (< 50% pasa 0,08 mm)							FINOS (≥ 50% pasa 0,08 mm)			
Tipo de Suelo	Simbolo	% Ret. en 5 mm	% Pasa* 0,08 mm	CU	CC	**IP	Tipo de Suelo	Simbolo	Lím. Líq. wL	Indice de Plasticidad IP
Gravas	GW	50% de lo Ret. en 0,08 mm	< 5	> 4	1 a 3	Si no cumple requisitos de GW es GP.	Limos Inorgánicos	ML	< 50	< 0,73 (wL - 20) ó < 4
	GP			> 12					MH	> 50
	GM		> 12			< 0,73 (wL - 20) ó < 4	Arcillas Inorgánicas	CL	< 50	> 0,73 (wL - 20) y > 7
	GC					> 0,73 (wL - 20) y > 7		CH	> 50	> 0,73 (wL - 20)
Arenas	SW	50% de lo Ret. en 0,08 mm	< 5	> 6	1 a 3	Si no cumple requisitos de SW es SP.	Limos o Arcillas orgánicas	OL	< 50	** wL seco al horno ≤ 75% del wL seco al aire
	SP			> 12					OH	
	SM		> 12			< 0,73 (wL - 20) ó < 4	Altamente Orgánicos	Pt	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente	
	SC					> 0,73 (wL - 20) y > 7				
* Entre 5 y 12% usar simbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC							* Si IP ≅ 0,73 (wL - 20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0,73 (wL - 20), usar simbolo doble: CL-ML, CH-OH			
** Si IP ≅ 0,73 (wL - 20) ó si IP entre 4 y 7 e IP > 0,73 (wL - 20), usar simbolo doble: GM-GC, SM-SC							** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente wL seco al horno			
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej.:GW-GM en vez de GW-GC							En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej.:CH-MH en vez de CL - ML			
$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$			$C_e = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$				Si wL = 50; CL-CH ó ML-MH			

Fuente: Clasificación de suelos, Farias D, Niemann J.

- **Ensayo del hidrómetro**

El objetivo de este ensayo es el determinar el porcentaje de limos y arcillas, en suelos que pasan el tamiz N° 200. El método más usado para hacer la determinación indirecta

de porcentajes de partículas que pasan el tamiz N° 200 (0.075 mm.), hasta 0.001 mm, es el hidrómetro basado en la sedimentación de un material en suspensión en un líquido con un agente dispersante o defloculante, este se añade a la solución para neutralizar las cargas sobre las partículas más pequeñas del suelo, que a menudo tienen carga negativa. El hidrómetro sirve para la determinación de la variación de la densidad de la suspensión con el transcurso del tiempo y medir la altura de caída del gramo de tamaño más grande correspondiente a la densidad media.

El análisis del hidrómetro se utiliza la relación entre la velocidad de caída entre las esferas de un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico tanto de la esfera como del fluido, y la viscosidad del fluido, en la forma expresada por la ley de Stokes.

2.5. Límites de consistencia

El límite líquido y plástico son determinados con material que pasa el tamiz de N° 40 (0.425 mm). La línea de división entre el bajo y alto límite líquido es tomada arbitrariamente como 50%.⁷ Consistencia significa grado de firmeza, equivale a capacidad de mantener las partes del conjunto integradas. En mecánica de suelos, sólo se utiliza para los suelos finos que, dependiendo del contenido de agua y su mineralogía, varía desde un estado sólido cuando están secos a un estado líquido viscoso cuando su contenido de agua aumenta considerablemente. Atterberg (1911) realizó una serie de experimentos con suelos finos haciendo variar su contenido de humedad, con el objetivo de encontrar la relación que existe entre el contenido de humedad y la consistencia del suelo. Este investigador observó que para ciertos contenidos de humedad el suelo presentaba uno de los cuatro estados distintos de consistencia, que son: sólido, semisólido, plástico y líquido.

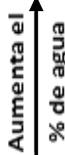
La plasticidad de un suelo se atribuye a la deformación de la capa de agua adsorbida alrededor de los minerales; desplazándose como sustancia viscosa a lo largo de la superficie mineral, controlada por la atracción iónica. En las arcillas, por su forma

⁷ Farias D., Niemann J., (2005), *Clasif. de suelos*, DuocUC, MS 11-00-05/b.

aplanada (lentejas) y pequeño tamaño, es alta. Puede ser cuantificada mediante la determinación de los límites de Atterberg. Estos marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo.

Figura N° 2.5. Estados de consistencia del suelo y límites de Atterberg.

	ESTADO	ASPECTO Y COMPORTAMIENTO	LÍMITE SEGÚN CONTENIDO DE AGUA
 Suelo fluido	LÍQUIDO	SOPA ESPESA, LÍQUIDO VISCOSO	Límite líquido (LL)
	PLÁSTICO	PASTA DENTAL, MANTECA BLANDA SE DEFORMA SIN AGRIETARSE	Límite plástico (LP)
 Suelo seco	SEMISOLIDO	QUESO, CARAMELO BLANDO SE DEFORMA PERO SE AGRIETA	Límite de retracción (LR)
	SOLIDO	CARAMELO DURO, GALLETAS SE RESQUEBRAJA AL DEFORMARSE	



Fuente: Fases de suelos, Apuntes de ingeniería civil.

- Índice de Plasticidad IP.

Atterberg definió el índice de plasticidad para describir el rango de contenido de humedad natural sobre el cual el suelo era plástico. El índice de plasticidad IP, es por tanto numéricamente igual a la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

$$IP = LL - LP \quad (5)$$

IP = Índice de plasticidad de suelo (%)

LL = Límite líquido de suelo (%)

LP = Límite plástico de suelo (%)

Los límites de Atterberg no son estrictamente a solutos, sino fronteras aproximadas.

Tabla N° 2.4. Grado de plasticidad del suelo (Sowers, 1979)

IP	DESCRIPCIÓN
0 - 3	No plástico
3 - 15	Ligeramente plástico
15 - 30	Baja plasticidad
> 30	Alta plasticidad

Fuente: Plasticidad, Apuntes de ingeniería civil.

- Límite líquido

El límite Líquido (*LL*), es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado, en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo, en el aparato de Casagrande cierre una ranura de ½” de amplitud, a los 25 golpes generados a la cápsula de bronce, con un ritmo de dos golpes por segundo. Los valores corrientes son: para arcillas 40 a 60%, para limos 25 a 50%; en arenas no se obtienen resultados.

- Límite Plástico

El límite Plástico (*LP*), es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0.5 a 1cm. de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos. Los valores típicos entre limos y arcillas se encuentran entre 5 y 30%. En arenas la prueba no es posible.⁸

- Límite de Contracción

El Límite de contracción (*LC*), se conoce también como límite de retracción, y determina la frontera entre el estado semisólido y el sólido.

⁸ Duque G., (2016), Consistencia y plasticidad, Cap. 4.

Se define como el máximo contenido de agua al cual una reducción en humedad no causa una disminución en el volumen de la masa de suelo. Para medirlo, se coloca en una cápsula el suelo húmedo y se determina su peso y volumen, siendo también el volumen de la cápsula. Se seca el suelo en la estufa y se obtiene su peso y volumen, el problema está en obtener el volumen seco, el cual se logra conociendo el peso del mercurio desplazado por el suelo seco, operación que es delicada.

2.6. Identificación de suelos finos

Los suelos finos están constituidos de partículas compuestas de fragmentos diminutos de roca, minerales y minerales de arcilla, con textura granular y en hojuelas. La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla, en el suelo, ésta tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene. Para conocer la textura de una muestra de suelo, separe primero la tierra fina, todas las partículas de menos de 2 mm, de las partículas mayores como la grava y las piedras.

Figura N° 2.6. Suelo fino



Fuente: Apuntes de ingeniería civil.

Ensayos de campo rápidos para identificar la textura del suelo:

- Prueba de sacudimiento de la bola.
- a) Tome una muestra de suelo y mójela bien.
- b) Forme una bola de 3 a 5 cm de diámetro.

- c) Sacúdala rápidamente de un lado a otro, y observe la superficie de la bola.
- d) Si la superficie de la bola se opaca rápidamente y puede romperla fácilmente entre los dedos, el suelo es arenoso o arenoso franco.
- e) Si la superficie de la bola se opaca más lentamente y ofrece alguna resistencia al romperla entre los dedos, es limoso o franco arcilloso.
- f) Si la superficie de la bola no cambia y ofrece resistencia al romperla, es arcilloso o arcilloso limoso.
 - Prueba de desmenuzamiento en seco.
 - a) Tome una maestra pequeña de suelo seco en la mano.
 - b) Desmenúcela entre los dedos.
 - c) Si ofrece poca resistencia y la muestra se pulveriza, el suelo es arena fina o arenoso franco fino o contiene muy poca arcilla.
 - d) Si la resistencia es media, es arcilloso limoso o arcilloso arenoso.
 - e) Si ofrece gran resistencia, es arcilla.

Según el manual de ensayos para materiales, para la identificación de suelos finos en campo se utiliza muestra con fracciones que pasen el tamiz de (N° 40).⁹

- Dilatancia (Reacción al agitado).

Posteriormente a quitar las partículas mayores del tamiz de 0,425 mm (N° 40), se prepara una pastilla de suelo húmedo de aproximadamente 10 cm³. Colocar la pastilla en la palma, golpeando varias veces contra la otra mano. Una reacción positiva consiste en la aparición de agua en su superficie, ésta cambia a una apariencia de hígado y se vuelve lustrosa. Al oprimirla entre los dedos, el agua y el lustre desaparecen de la superficie, la pastilla se vuelve tiesa y finalmente se agrieta o desmorona. La rapidez de la aparición del agua y de su desaparición durante la opresión sirve para identificar el carácter de los finos de los suelos.

- a) De reacción rápida, (ejemplos: arena fina, arena fina limosa, grava limosa).

⁹ Administradora Boliviana de Carreteras. Ensayos de suelos y materiales. Ingenieros y arquitectos consultores. Manuales técnicos para el diseño de Carreteras. Tom1. Bolivia

- b) De reacción lenta, (ejemplos: limo arcilloso, limos, arena arcillosa).
- c) Sin reacción alguna, (ejemplos: arcilla limosa, arcilla).
 - Resistencia en estado seco (característica al rompimiento)

Se moldea un cilindro de suelo de 2,5cm de diámetro y altura hasta alcanzar una consistencia de masilla. Se deja secar al horno, al sol o al aire y se prueba su resistencia desmoronándola entre los dedos. La resistencia en estado seco aumenta con la plasticidad.

- a) Sin resistencia en estado seco, (ejemplos: gravas, arenas, mezclas de gravas y arenas).
- b) Baja resistencia, (ejemplos: limos, mezclas de limos y arenas finas).
- c) Alta resistencia en estado seco, (ejemplos: arcillas, arcillas limosas, arcillas con bajo contenido de finos arenosos).
 - Tenacidad (consistencia cerca del límite plástico)

Se moldea un espécimen de 10 cm³ hasta alcanzar la consistencia de masilla, se rola a mano sobre una superficie lisa, hasta hacer un rollito de 3mm, se amasa y se vuelve a rolar varias veces hasta que se ponga el espécimen tieso y se desmorona al alcanzar su límite plástico. Se desmorona más rápido por baja plasticidad.

- a) Plasticidad baja, (ejemplos: limos, arenas arcillosas).
- b) Plasticidad media, (ejemplos: mezclas de arcillas y limos, arenas arcillosas).
- c) Plasticidad elevada, (ejemplo: arcilla).

Otros indicadores para identificar un tipo de suelos son:

- Color

Es un dato útil para diferenciar los diferentes estratos y para identificar tipos de suelos. Por ejemplo el color negro y otros de tonos oscuros suelen ser indicativos de la

presencia de materia orgánica coloidal. Los colores claros y brillantes son propios, más bien de suelos inorgánicos.

- El Olor

Los suelos orgánicos (OH y OL) tienen por lo general un olor distintivo, que puede usarse para identificación; el olor es particularmente intenso si el suelo está húmedo, y disminuye con la exposición al aire, aumentando, por el contrario, con el calentamiento de la muestra húmeda.

2.6.1. Definición de suelos arcillosos

En general, el término arcilla se aplica a un material natural, terroso, de tamaño de grano fino y que muestra plasticidad cuando es mezclado con una cierta proporción de agua. Con tamaño de partícula que pasa por el tamiz N° 200 (0.075 mm), Su composición química está caracterizada por la presencia de Si, Al y H₂O, junto a cantidades variables de Mg, Mn, Fe, Ca, Na y K, principalmente.

Estos casi siempre tienen una estructura cristalina definida, cuyos átomos se disponen en láminas; la silícica y la alumínica. De acuerdo con su estructura reticular, los minerales de arcilla se encasillan en tres grandes grupos: caolinitas, montmorilonitas e ilitas.¹⁰

- Las caolinitas están formadas por una lámina silícica y otra alumínica que se superponen, su unión suficientemente firme que no permite la penetración de moléculas de agua entre ellas, por ello son relativamente estables ante el agua.
- Las montmorilonitas, formadas por una lámina alumínica entre dos silícicas, que se superponen, su unión es débil por lo que permite la penetración de moléculas de agua fácilmente, produce un incremento de volumen en cristales conocido como expansión, son inestables ante el agua.

¹⁰ Juárez B., Rodríguez R., (2005), Mec. de suelos, México DF, Grupo Noriega Editores, Cap.I.

- Las ilitas su estructura es similar a las montmorilonitas, pero su composición interna tiene tendencia a formar grumos, que reducen el área expuesta al agua, por ello su expansividad es menor que las montmorilonitas y se comportan de forma más favorable.

Características de suelos arcillosos

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades fisico-químicas. ¹¹Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm)
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados.

- Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar o en los canales estructurales. La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

¹¹ Scalone E.M , Propiedades físico-químicas de los suelos Instituto de Agrimensura, Cap.10.

- Humedad de saturación

La cantidad de agua necesaria para saturar el suelo, llenar todos sus vacíos, ese porcentaje es la relación entre el peso del agua en el suelo y el peso de la muestra seca.

- Superficie específica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m^2/g .

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.

- Densidad

En el suelo se consideran dos tipos de densidad: densidad aparente y densidad real. Densidad aparente (d_a): es la masa contenida en una unidad de volumen de una muestra de suelo tal y como es, incluyendo el volumen ocupado por los poros. Para determinarla, se divide el peso de un determinado volumen de tierra secada a estufa por ese volumen de suelo, y se expresa el resultado en kg/m^3 . La densidad real (d_r) es la densidad de las partículas sólidas del suelo. Se determina dividiendo el peso del suelo secado a estufa por el volumen que ocupan los sólidos. En los suelos minerales más comunes varía de 2.500 a 2.700 kg/m^3 .

Existen diferentes tipos de densidad pero se calculan de igual forma variando sus pesos.

$$D = \frac{M_s}{V_s} \quad (6)$$

D = Densidad (gr/cm^3)

M_s = Masa del suelo (gr)

V_s = Volumen del suelo (cm^3)

- La porosidad

La porosidad de un material es la relación existente entre el volumen de vacíos o espacios ocupados por el agua, y el volumen total del material, expresado en porcentaje. Comprende el espacio vacío del suelo ocupado por agua o aire. Depende de: la textura y estructura del suelo, laboreo y compactación. En arenas la porosidad es de 50%, en estado suelto y 25% compacto, las arcillas registran valores más elevados pudiendo llegar a 96%.

- Relación de vacíos

En la actualidad se acostumbra a relacionar el volumen de vacíos con el volumen de los sólidos o partículas, obteniéndose una razón conocida como relación de vacíos e , existen e_{max} correspondiente al suelo suelto y $e_{mín}$ para suelos compactados.

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (7) \qquad e = \frac{V_v}{V_s} \quad (8)$$

n = Porosidad

e = Relación de vacíos del suelo

V_v = Volumen de vacíos (cm^3)

V_s = Volumen de sólidos (cm^3)

- Textura

La textura del suelo se refiere a la distribución de tamaños de las partículas constituyentes. Para la determinación de la textura se divide la gama de tamaños del suelo en tres grupos o fracciones, siendo los suelos arcillosos del orden $< 0,002$ mm.

- Estructura

La estructura del suelo se define como el arreglo de sus partículas primarias, formando unidades estructurales. Los elementos químicos constituyentes de estos minerales presentes en las arcillas, se combinan formando estructuras atómicas básicas, que combinándose entre sí forman láminas, la que al agruparse forman estructuras laminares que finalmente al unirse por medio de un enlace forman un mineral de arcilla.

- Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento. Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia

en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.

- Tixotropía

La tixotropía se define como el fenómeno consistente en la pérdida de resistencia de un coloide, al amasarlo, y su posterior recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas cuando son amasadas se convierten en un verdadero líquido. Si, a continuación, se las deja en reposo recuperan la cohesión, así como el comportamiento sólido. Para que una arcilla tixotrópica muestre este especial comportamiento deberá poseer un contenido en agua próximo a su límite líquido. Por el contrario, en torno a su límite plástico no existe posibilidad de comportamiento tixotrópico.

2.7. Importancia del estudio de los suelos finos

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos. Estas son probablemente, los materiales geológicos más contradictorios desde el punto de vista de su utilidad en Ingeniería Civil. Son fuente inagotable de problemas de estabilidad en buen número de obras, pero constituyen por sí mismas un material de valiosas propiedades ingenieriles. Los suelos expansivos representan un problema en la industria de la construcción a nivel nacional e internacional debido a los continuos daños causados por éstas al aumentar o contraer su volumen con las variaciones de humedad durante el año. Éstos son utilizados en carreteras como subrasante, es decir la superficie del terreno de fundación sobre la cual se construirá un pavimento, es ahí donde se generan problemas por la humedad.

- Efectos de las arcillas expansivas en obras civiles

La incidencia del comportamiento de los materiales expansivos en los daños experimentados por las estructuras, no fue identificada por los especialistas en el

estudio de suelos como una de las causas fundamentales de esos daños, prácticamente hasta fines de 1930, a partir de allí se comienza a reconocer que muchas de las patologías de las estructuras, que eran atribuidas a asentamientos del suelo u otros problemas, se debían en realidad a un fenómeno de expansión o hinchamiento. Esto causa cambios significativos de volumen que producen presiones en la zona activa de las estructuras y fundaciones.

Se debe tener en cuenta que, en un suelo el contenido de arcilla, de acuerdo a su magnitud puede ser un elemento riesgoso en un suelo de subrasante y en una estructura de pavimento, debido sobre todo a su gran sensibilidad al agua.

Figura N° 2.7. Tira asfáltica afectada por suelos expansivos.



Fuente: Apuntes de ingeniería civil.

Las arcillas son fácilmente erosionables debido al estado fisico-químico de la fracción de la arcilla de un suelo, las partículas individuales se dispersan en la presencia del agua relativamente pura, es conocido que afecta negativamente algunas de sus propiedades, como la estabilidad estructural, la conductividad hidráulica, la tasa de infiltración, causando una reducción de su capacidad productiva y estabilizante.¹² En las represas de tierra o terraplenes ocurren fallas por tubificación debidas a suelos

¹² F. Rodríguez Roa, (2004), Fundamentos de Arcillas Expansivas, Departamento de Ingeniería Geotécnica, Universidad Católica de Chile.

dispersivos, la separación de los gránulos de suelo facilita el arrastre de las partículas contribuyendo a la erosión superficial.

Pueden producir también roturas de en: zapatas provocando despegue de cimentación, grietas horizontales por empujes y grietas inclinadas por asiento diferencial y en losas, al generar grietas de flexión y distorsiones.

Figura N° 2.8. Hundimientos irregulares por la presencia de arcillas expansivas.



Fuente: Apuntes de ingeniería civil.

Los movimientos provocados por estos suelos tienen un patrón irregular como para causar grandes daños a las estructuras y pavimentos que se apoyan sobre ellos.

2.8. Suelos arcillosos expansivos

Las arcillas pueden presentar distintos grados de expansividad, dependiendo su respuesta a las variaciones de humedad a las que se vean sometidas.

El agua al atravesar las distintas capas del suelo va produciendo en su contacto con los elementos químicos que se hallan en sus partículas, una serie de reacciones físico-químicas que hacen que el suelo se transforme. Las agua de lluvia y subterráneas constituyen un factor importante pues el agua absorbida puede alcanzar alturas de consideración especialmente en suelos finos.¹³

¹³ R. Valle Rodas, (1963), Carreteras, Calles y Autopistas, Caracas, ED el Ateneo, Cap. IV.

El hecho de que un suelo arcilloso se reconozca como potencialmente expansivo por su composición mineralógica, granulometría, límites de consistencia, etc., sólo constituye una parte del problema, pues para que se produzca ese hinchamiento o retracción del suelo, también existen factores, tanto naturales como debidos a la actividad del hombre. Todos estos factores, actuando en mayor o menor proporción, controlan el equilibrio de humedad del suelo, del que en definitiva dependen sus cambios de volumen.

- **Comportamiento volumétrico**

El comportamiento de este tipo de suelos frente a los cambios de humedad (problema que se acusa con los cambios estacionales debido a los ciclos de humectación-deseccación así como a la ascensión del nivel freático) da lugar a la variación de su volumen, produciéndose movimientos por los asentamientos diferenciales de la cimentación. Al ganar humedad, presentan un incremento de volumen o hinchamiento según su grado de expansividad y al desecarse, el volumen disminuye produciéndose un agrietamiento del suelo. Así mismo podemos observar otros factores que influyen como:

- La succión puede hacer variar el volumen del suelo su magnitud dependerá de la humedad del medio, pues succión está esencialmente controlada por la humedad, con escasa influencia de la densidad alcanzada. El aumento de la succión contribuye a un aumento de la rigidez de los suelos, de modo que parece que la carga de preconsolidación aparente aumenta con la succión.

- La carga aplicada controla, en gran medida, la cantidad de expansión de los suelos cuando los sometemos a una disminución en la succión, es decir, los mojamos. Cuanto mayor es la carga aplicada, menor es la expansión.

- **Expansión**

La “expansión o hinchamiento” se produce cuando un suelo no saturado se humedece adsorbiendo agua entre sus partículas y aumentando de volumen. Los resultados experimentales indican que el aumento de volumen es al principio, menos que

proporcional a la cantidad de agua fijada, luego aumenta en forma brusca para posteriormente anularse y perder significación cuando el suelo se licua. La variación inversa sucede con el desecamiento, “fenómeno de retracción”.

Para identificar el grado de expansividad se emplean ensayos, los más comunes son: límites de Atterberg, granulometría por sedimentación, el ensayo Lambe y el edómetro.

Figura N° 2.9. Expansiones de suelos en carreteras.



Fuente: Apuntes de ingeniería civil.

Factores que afectan al hinchamiento¹⁴

Una serie de factores condicionan la evolución y magnitud del hinchamiento. Gromko (1974) resume estos factores en los siguientes:

- Tipo de minerales y cantidad de los mismos: cuanto más expansivos sean los minerales en el suelo mayor será el hinchamiento que se producirá cuando el suelo se inunde.
- Densidad: para el mismo suelo con la misma humedad inicial, el hinchamiento será mayor cuanto mayor sea la densidad seca del mismo, (los suelos expansivos con densidades secas superiores a los $1,750 \text{ kg/m}^3$ generalmente exhiben altos potenciales de expansión).

¹⁴Victor EC, (2006), Determinación del comportamiento de hinchamiento de suelos, Universidad José Simeón Cañas (UCA), Antiguo Cuscatlán, El Salvador. Pp. 68-72.

- Estado de esfuerzos: la magnitud del hinchamiento es tanto menor cuanto mayor es la presión aplicada al suelo pudiendo llegar a anularlo por completo. Se requiere grandes esfuerzos.
- Estructura del suelo: los suelos que han experimentado cementaciones tienen menor tendencia a hincharse.
- Espesor del estrato: si un estrato expansivo posee un espesor muy delgado (generalmente menor de 60cm), es factible esperar un daño pequeño a las estructuras.
- Permeabilidad y tiempo: las arcillas con un potencial de expansión muy alto tienden a poseer permeabilidad extremadamente baja, es posible que requieran de tiempo considerable para llevar a cabo la totalidad de sus expansiones (semanas o incluso años).
- Fluidos intersticiales: la presencia de sales disueltas en el agua que ocupan los poros del suelo influye en los fenómenos de formación de la capa doble. Esto hace que se produzca una menor adsorción de cationes y que por lo tanto el hinchamiento sea menor.
- Humedad: cuanto menor es la humedad mayor es la expansividad potencial, las arcillas con contenidos de humedad altos, del 30%, indican que la mayoría de las expansiones ya han tenido lugar, se puede esperar entonces que posteriores sean pequeñas.
- Clima: Los suelos de climas húmedos generalmente se encuentran húmedos y con tendencias a permanecer así durante todo el año, debido a que sus periodos de mayor evapotranspiración usualmente coinciden con los de mayor lluvia. Los mayores problemas de expansión se presentan en las áreas áridas, semiáridas y monzónicas.
- Sobrecarga: Una sobrecarga moderada puede restringir en mucho al potencial de expansión de un suelo, aunque usualmente se requieren sobrecargas muy grandes para restringirlas totalmente.

Según el Manual Técnico para el Diseño de Carreteras, Vol 4 ensayos de suelos y materiales tenemos la siguiente tabla para poder identificar la expansión.

Tabla N° 2.5. Para determinar el potencial expansivo del suelo.

GRADO DE EXPANSIÓN	LL %	IP %	τ_{nat} (Ton/pie²)
Elevado	>60	>35	>4
Marginal	50-60	25-35	1.5-4
Bajo	<50	<25	<1.5

Fuente: Del Manual técnico de ABC

- **Contracción de suelos finos**

Es la cualidad que determina su cambio de volumen cuando cambian las condiciones de humedad. Algunos se contraen cuando están secos y se dilatan cuando están mojados. En laboratorio, una arcilla se encuentra húmeda y con un alto contenido de agua y cuando se realiza el proceso de secado la mezcla pierde el agua que contenía produciendo una reducción en el tamaño de la pieza moldeada.

Henin (1976) cita a Haines (1923) quien estudio la evolución de la porosidad en el sistema de arcilla agua partiendo de un suelo saturado en el punto máximo de hinchamiento, existe una variación del volumen proporcional a la perdida de agua, hasta un punto en el que ingresa aire al sistema que influye en la contracción del material. Cuando el suelo se encuentra en estado seco, la perdida de agua en los microporos resulta en una tensión capilar suficiente para causar una contracción del suelo, la formación de poros y grietas.¹⁵

Tenemos una contracción provocada en suelos al aire libre, esto ocurre por la variación en el clima (verano), producida por elevadas temperaturas y largos periodos de sequía. Determinadas arcillas, en los períodos húmedos aumentan de volumen, mientras que

¹⁵ Diaz R., (2007) Aportes de la Ciencia y la Tecnologia al Manejo Productivo y Sustentable, PROCISUR.

durante los períodos secos se deshidratan y disminuyen de volumen, desarrollando un amplio sistema de anchas grietas.

Figura N° 2.10. Contracción de suelo.



Fuente: Apuntes de ingeniería civil.

2.9. Compactación de suelos

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. La importancia de la compactación estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtiene al sujetar al suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. Se realiza mediante la aplicación de energía a la masa de suelo, por un proceso mecánico a través del que se busca obtener la máxima densidad seca del material, estando el suelo humectado con el contenido de agua óptimo. Entre las ventajas de compactar un suelo tenemos:

- Contacto más firme entre partículas.
- Las partículas de menor tamaño ocupan los vacíos formados por las de más grandes.
- Capacidad soporte y estabilidad.

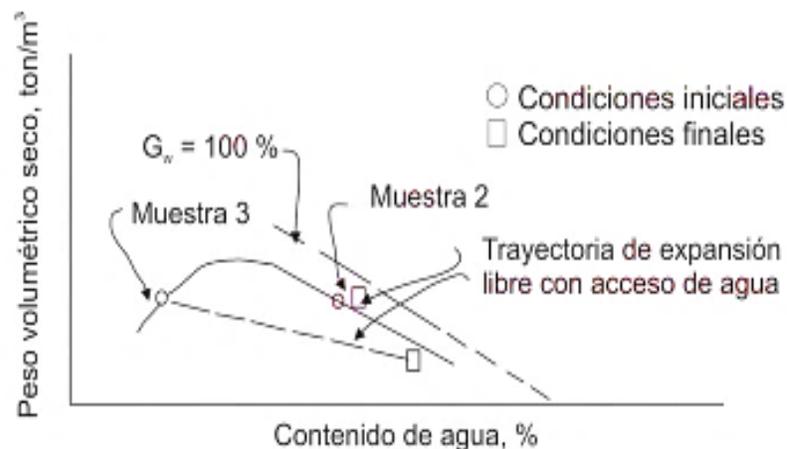
Número de vacíos reducido al mínimo, por lo tanto la capacidad de absorber agua quedará reducida, al igual que la expansión del suelo.

El establecimiento de la compactación de un suelo cubre dos finalidades principales, disponer de suelos compactados teóricamente en laboratorio, para investigar sus propiedades mecánicas; por otro lado poder controlar el trabajo de campo.

De entre todos los factores que influyen en la compactación obtenida en un caso dado, podría decirse que dos son lo más importantes, el contenido de agua del suelo, antes de iniciarse el proceso de compactación y la energía específica empleada en dicho proceso.

Así se llega a los problemas que puede generar un sobre uso de energía o sobre compactación, se mencionará entonces el hecho de que la compactación excesiva puede llevar a los materiales finos a condiciones de deformabilidad bajo carga altamente perjudiciales. La figura siguiente es un modo no único de comprobar la información anterior.

Figura N° 2.11. Representación de la evolución de un suelo compactado y su trayectoria de expansión.



Fuente: Rico, R.A. (1992). Algunas divergencias entre prácticas comunes de compactación... Volumen Raúl J. Marsal. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos.

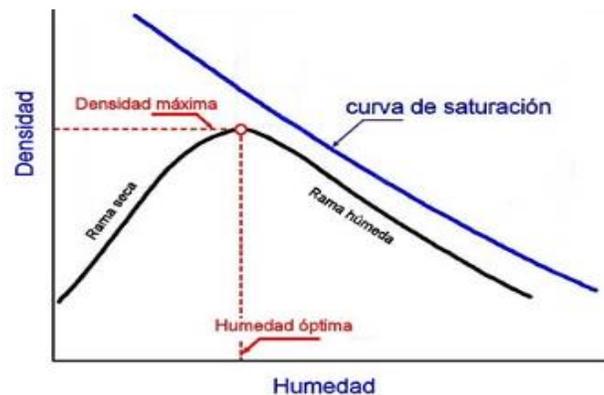
Dos muestras de un mismo suelo compactado por el mismo peso volumétrico seco, pero seleccionadas una en la rama húmeda y otra en la rama seca de la curva de compactación se colocan en condición de libre acceso al agua y sin restricción externa

a cambio volumétrico. Puede verse que la muestra compactada del lado seco adquiere un potencial de succión muy importante que la lleva a manifestarse una alta expansividad, en tanto que la muestra compactada del lado húmedo tiene una gran tendencia a conservar, bajo las condiciones señaladas, el estado adquirido por la compactación inicial. En otras palabras un suelo fino intensamente compactado puede convertirse fácilmente en un material altamente expansivo, que al absorber agua muestra una comprensibilidad mucho mayor a la que se tendría con un grado de compactación inicial menor.¹⁶

2.9.1. Curva de Compactación

La representación gráfica de la relación densidad seca y humedad óptima, da lugar a lo que habitualmente se denomina “Curva de Compactación” o “Curva Proctor”.

Figura N° 2.12. Representación gráfica de la relación densidad seca – humedad.



Fuente: Compactación de suelos y materiales estabilizados, Material de apoyo U. N. De Rosario.

Se observa en la figura, que en la medida que la humedad aumenta se obtienen pesos específicos secos mayores, debido a que el agua de los poros de suelo lubrica las partículas y provoca un mejor reacomodo de éstas hasta un valor máximo, a partir del cual, el aumento de humedad impide, con el espacio ocupado por el agua, que

¹⁶ Rico R. A., (1992). Algunas divergencias entre prácticas comunes de compactación y lo que la investigación parece indicar. Volumen Raúl J. Marsal. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos. P.265-273.

las partículas se unan. El agua de los poros absorbe la energía de compactación aplicada y por tanto el peso específico seco disminuye. La rama de aumento del peso específico seco se denomina “rama seca” y la de descenso “rama húmeda”.¹⁷

De entre todos los factores que influyen en la compactación obtenida en un caso dado, podría decirse que dos son lo más importantes, el contenido de agua del suelo, antes de iniciarse el proceso de compactación y la energía específica empleada en dicho proceso.

R. R. Proctor hacia 1933, propone un ensayo empírico de compactación en laboratorio. Las variables que entran afectan a la compactación son: peso unitario seco, contenido de agua, naturaleza del suelo y la proporción de partículas gruesas y energía por unidad de volumen de suelo compactado. Proctor estudio la influencia que ejercía el contenido de agua en el suelo, encontrando que tal valor era importante en la compactación lograda, observando que a contenidos de humedad crecientes correspondían pesos específicos secos más altos, pero esta tendencia no se mantenía indefinidamente, sino que al pasar la humedad en cierto valor los pesos secos disminuían, resultando peores compactaciones. Es decir puso de manifiesto que para un suelo dado existe una humedad inicial llamada óptima que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con la prueba de Proctor.

- Densidad máxima seca; corresponde a la mayor densidad que puede alcanzar un suelo al ser compactado a la humedad óptima, que se determina dividiendo la masa seca por su volumen.

$$\rho_d = \frac{100\rho_h}{w + 100} \quad (9)$$

ρ_d = Densidad seca del suelo compactado (kg/m³)

ρ_h = Densidad húmeda del suelo compactado (kg/m³)

¹⁷ Paramo J.A., (2002) Compactación de Suelos. Cátedra Transporte III F.C.E.I. y A., U.N.R.

w = Humedad del suelo compactado (%)

- Humedad óptima; es el porcentaje de humedad para el cual un suelo sometido a una energía de compactación determinada presenta su máxima densidad.

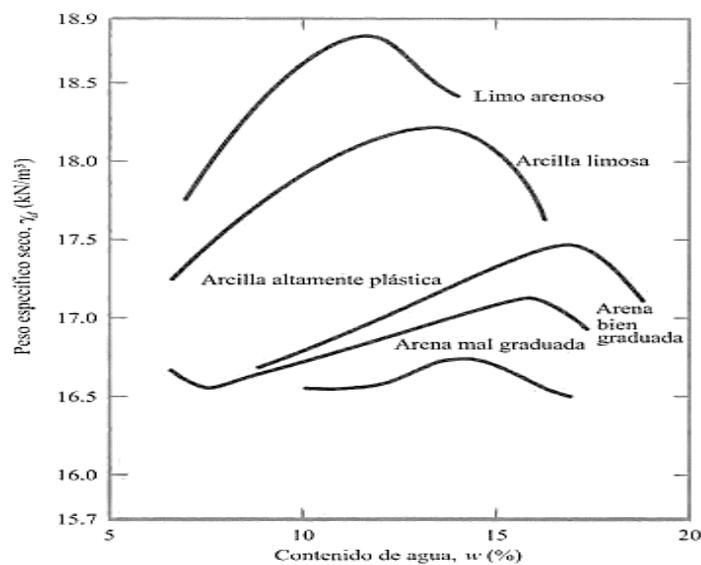
$$W = \frac{\text{Peso del agua contenida}}{\text{Peso seco}} = \frac{w_h - w_s}{w_s} \quad (10)$$

W = Humedad del suelo compactado (%)

W_h = Peso húmedo del suelo (gr.)

W_s = Peso seco del suelo (gr.)

Figura N° 2.13. Curvas típicas de compactación para 5 suelos diferentes.



Fuente: Mecánica de suelos, Braja MD.

Cada suelo reacciona de diferente manera con respecto a la densidad máxima y humedad óptima, por lo tanto, cada uno tendrá su propia y única curva de control. Las curvas típicas de compactación para diferentes tipos de suelos, se muestran en la figura.

2.10. Energía de Compactación

Por energía específica se entiende la energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen. La realización de ensayos de compactación, entrega un trabajo mecánico que comprende: número de golpes, altura de caída, peso del pisón, número de capas. Además, está en juego la forma de entrega de esa energía: amasado, presión estática, impacto. Los datos que determinan la energía específica, fueron establecidos originalmente por Proctor como los adecuados para reproducir los pesos específicos secos que podían lograrse económicamente (con un número moderado de pasadas) con el equipo disponible en aquella época. Se cuantifica la energía mediante la expresión¹⁸:

$$E_c = \frac{W \cdot h \cdot n \cdot N}{V} \quad (11)$$

E_c = Energía (kg*cm /cm³)

W = Peso del pisón o martillo (kg)

h = Altura del pisón o martillo (cm)

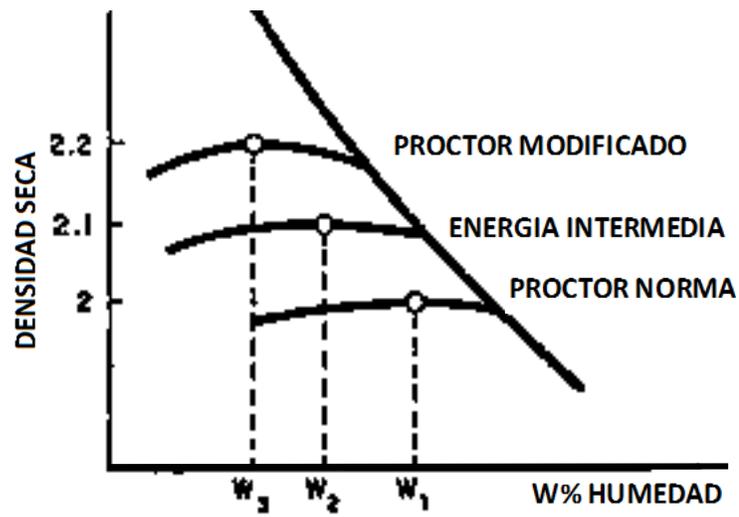
n = Número de capas

N = Número de golpes por capa

V = Volumen del suelo compactado (cm³)

¹⁸ Armas R., González Y., (2008) Criterios sobre la Compactación de Suelos y el Control de calidad de Terraplenes. Convención científica de ingeniería.

Figura N° 2.14. Curvas producidas por diferente energía de compactación.



Fuente: Compactación de suelos, López Saiz J.

La energía correspondiente para estos dos ensayos se puede calcular con la fórmula ya descrita (Ecu. 2.11), teniendo como resultado para un número de golpes de 25 y 56 por capa y volumen (1/30 pie³):

La energía de compactación por unidad de volumen de la Prueba Proctor Estándar se cuantifica mediante la ecuación para las condiciones de compactación de:

$$E_{C_{25}} = 6.06 \frac{\text{kgf} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

$$E_{C_{56}} = 6.03 \frac{\text{kgf} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

Prueba Proctor Modificada, basada en el mismo principio, variando el peso y altura de caída del pisón, la energía para las nuevas condiciones de compactación, donde:

$$E_{C_{25}} = 27.2 \frac{\text{kgf} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

$$E_{C_{56}} = 27.2 \frac{\text{kgf} \cdot \text{cm}}{\text{cm}^3}$$

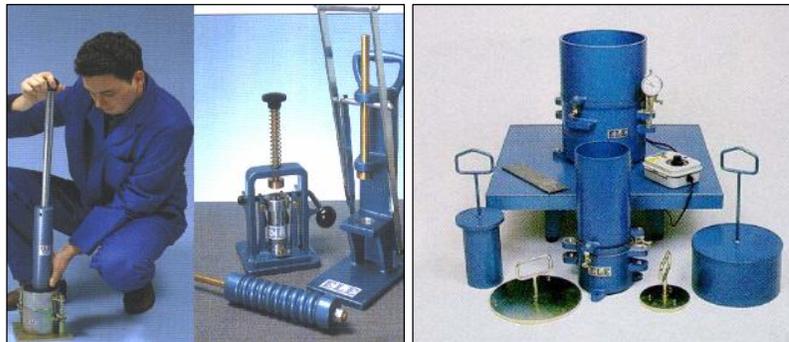
Elegido el método A, B, C o D se tendrá una energía igual para cada Proctor siempre que no se modifique las variables, como se puede apreciar en la energía calculadas para cada ensayo.

2.10.1. Métodos para determinar la humedad óptima y densidad máxima

Actualmente existen muchos métodos obtener en el laboratorio las propiedades mecánicas requeridas. La mayoría de estos son dinámicos y otros estáticos. Los llamados dinámicos utilizan cargas dinámicas aplicadas mediante pistones o martillos y los estáticos emplean cargas estaticas aplicadas por medio de prensas hidráulicas. Los métodos más empleados son los dinámicos estandarizados por Asociación Americana conocida como A.A.S.H.O.

Históricamente el primer método en el sentido de la técnica actual, es el debido a R.R. Proctor y es conocida hoy como la Prueba de Proctor Estándar o A.A.S.H.O. Estándar. Estableciendo así las bases de la compactación económica, Proctor ideó la prueba de compactación dinámica, que consiste en colocar el suelo en un molde y dejar caer un pisón o martillo sobre el suelo un determinado número de veces.

Figura N° 2.15. Ensayos para compactación: suelos cohesivo (a) y granulares (b).



a. Ensayo Proctor y Harvard

b. Ensayo de densidad relativa

Fuente: Apuntes de ingeniería civil.

- **Prueba del Proctor Estándar**

El Método A.A.S.H.O. Stándar T-99, conocido como método Proctor o Estándar, se refiere a la determinación del peso por unidad de volumen de un suelo que ha sido compactado por un procedimiento definido para diferentes contenidos de humedad. La prueba consiste en compactar el suelo a emplear, en tres capas dentro de un molde de cilíndrico de 4 pulgadas, por medio de 25 golpes en cada una de ellas con un pisón de 2.5 kg de peso, que se deja caer libremente desde una altura de 30.5 cm, si se utiliza el molde pequeño. En cambio si usa el cilindro grande de 6 pulgadas se hará caer el martillo 56 veces sobre cada capa. La compactación debe hacerse en forma uniforme, haciendo caer libremente el martillo y distribuyendo los golpes sobre todo el área.

Una vez compactado se quita el collar del molde se alisa la superficie y se pesa, finalmente se extrae una muestra de este para obtener el contenido de humedad de este. La humedad óptima de este es mayor que la que se obtendría con la Prueba Modificada. Sus dimensiones dan como resultado una energía específica de compactación de 0,59 J/cm³ (6 kgf cm/cm³). Este método tiene 4 subdivisiones: A, B, C y D. para los dos primeros corresponde materiales que pasan el tamiz N°4 (4.76mm) y los otros los que pasan el tamiz ¾" (19.1mm)

- **Prueba del Proctor Modificado**

El Método A.A.S.H.O. Stándar T-180, en tiempos de la Segunda Guerra Mundial se introdujo el Ensayo Proctor Modificado, como respuesta a las exigencias de subrasantes más densas en aeropistas, demandadas por los pesados equipos de aviación militar que se desarrollaron por entonces.

Los moldes que se emplean son los mismos que los indicados para el método anterior, de 4 y 6 pulgadas, en este ensayo modificó el Estándar aumentando el número de capas de 3 a 5; el número de golpes en cada una de ellas se llevó de 25 a 56; el peso del pisón se elevó a 4.5 kg y la altura de caída a 45.7 cm. Si se usa el molde pequeño se deberá compactar cada capa haciendo caer el martillo 25 veces

y si se usa el molde grande serán 56 veces, al igual que el otro se toma una muestra para determinar su contenido de humedad. Su energía específica de compactación de 2.67 J/cm^3 (27.2 kgf cm/cm^3). El contenido de agua y el peso específico máximo de este es mayor que el alcanzado por la Prueba Estándar. Este método tiene también 4 subdivisiones: A, B, C y D. para los dos primeros corresponde materiales que pasan el tamiz N°4 (4.76mm) y los otros los que pasan el tamiz $\frac{3}{4}$ " (19.1mm).

2.10.2. Curva de saturación

La curva de saturación representa las densidades de un suelo en estado de saturación, es decir cuando el volumen de vacíos es cero, razón por la cual se le conoce también como “Curva de cero vacíos de aire” o de “saturación completa”¹⁹.

Se calcula con la siguiente expresión:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_w}{w + \frac{1}{G_s}} \quad (12)$$

γ_d = Peso unitario seco o densidad seca del espécimen compactado (kg/m^3)

γ_w = Peso unitario del agua a 20°C (kg/m^3)

w = Contenido de agua para la saturación completa (%)

G_s = Gravedad específica del suelo (adimensional)

Para un mismo suelo compactado con diferentes energías de compactación, los puntos correspondientes a las densidades máximas, se ordenan sobre una línea marcadamente paralela a la curva de saturación. Además sus respectivas ramas húmedas, exhiben una considerable coincidencia y paralelismo con la curva de

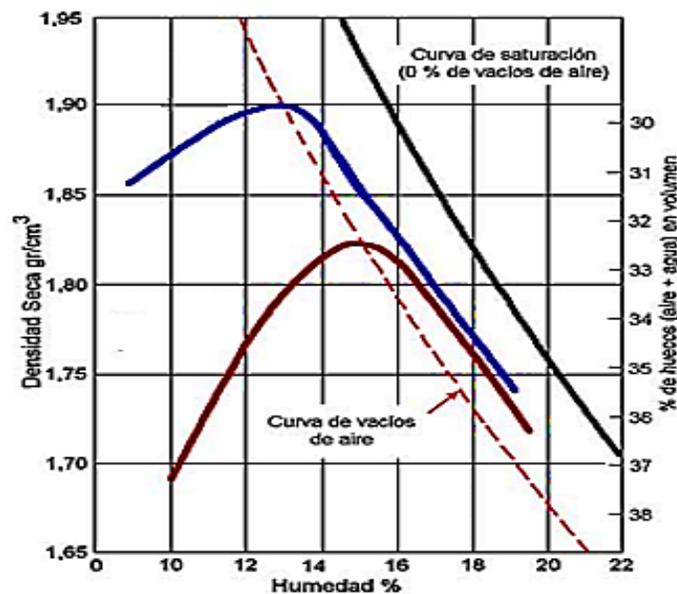
¹⁹ Armas R., González Y., (2008) Criterios sobre la Compactación de Suelos y el Control de calidad de Terraplenes. Convención científica de ingeniería.

saturación. Para dos energías diferentes. A mayor trabajo mecánico de compactación, se obtiene una mayor densidad seca máxima y una menor humedad óptima como se muestra en la figura.

La condición de un suelo compactado en circunstancias normales es la de un suelo no saturado, razón por la cual la curva de compactación se desarrolla por debajo de la curva de saturación, si se comparan las dos se podría determinar cual tendría que ser el contenido de agua que saturaría a una muestra que se compacta a determinado peso volumétrico.

El grado de saturación de los suelos en las líneas de óptimos, se mantiene en un ámbito restringido. Para los suelos granulares graduados el grado de saturación es del orden de 0,73, en los cohesivos del orden de 0,83 y algo mayor para los suelos netamente arcillosos.

Figura N° 2.16. Curvas de saturación teórica.



Fuente: Compactación de suelos y materiales estabilizados, Material de apoyo U. N. De Rosario.

No es posible por ningún medio mecánico de compactación, expulsar todo el aire de los poros de suelo, por lo que tampoco se logra la saturación del mismo. Es por ello que la curva de saturación se denomina también “curva teórica de compactación” y “curva de cero por ciento de huecos de aire”.

2.11. Resistencia de suelos

Es la firmeza que ofrece el suelo a la presión debido la acción de fuerzas de carga ya sea por las cargas estructurales o del tránsito que tienden a influir en su volumen. La propiedad de los suelos de soportar cargas y conservar su estabilidad, depende de la resistencia al corte de los suelos. Cualquier masa de suelo se rompe cuando esta resistencia es superada.

2.11.1. Prueba de relación de soporte del suelo CBR

Este método fue propuesto en 1929 por los ingenieros T. E. Stanton y O. J. Porter del departamento de carreteras California, desde esa fecha tanto en Europa como en América el método CBR se generalizó y es una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base para carreteras, es una carga unitaria correspondiente a 0.1“o 0.2“de penetración expresada en porciento de su valor estándar. Sirve para medir la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas.

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.

El número de CBR se obtiene de la relación de carga unitaria (lbs/pulg²) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración con el pistón de penetración (2” de diámetro, 19.4cm²), mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un (%) de la relación de

soporte. El (%) CBR, está definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado (con carga de una capacidad mínima de 26.7 kN o 6.000 lbf) penetre a una profundidad determinada, expresada en porcentaje de fuerza necesaria para que el pistón penetre a esa misma profundidad y velocidad uniforme de 1.27 mm/min, en una probeta normalizada constituida por una muestra patrón de material chancado.

El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte pero, es evidente que éste número no es constante para un suelo dado, sino que se aplica al estado en el cuál se encontraba el suelo durante el ensayo. De paso, es interesante comentar que el experimento puede hacerse en el terreno o en un suelo compactado.

A pesar de sus limitaciones, el CBR es uno de los ensayos más extendidos y aceptados en el mundo debido al relativo bajo costo de ejecución (si se compara con ensayos triaxiales), y a que está asociado a un número de correlaciones y métodos semi-empíricos de diseño de pavimentos.

2.11.2. Energía y resistencia en compactación

La compactación podríamos decir que es el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas de un suelo, como es la resistencia, la compresibilidad y su relación esfuerzo-deformación, el proceso de compactación implica una reducción de los vacíos, como una consecuencia de esto ocurren cambios de volumen, ligados principalmente a la pérdida de volumen de aire.

Las propiedades mencionadas son las que se busca mejorar siempre. Es menos frecuente aunque no menos importante, que también se compacte para tener unas características de permeabilidad y flexibilidad. Esto suele ser favorable ante efectos de permanencia de la estructura terrea ante la acción de agentes erosivos.

La resistencia mecánica puede incrementarse al aumentar la energía de compactación, elevando el punto de densidad máxima. En los suelos granulares dará lugar a una curva de resistencia también más elevada, motivado en su menor

sensibilidad a la acción del agua. Por este motivo, es habitual que los suelos granulares se compacten con mayor energía que los cohesivos. No ocurre lo propio con los suelos arcillosos donde la resistencia al corte es preponderantemente cohesiva. La tendencia de los materiales arcillosos a hincharse, si son de naturaleza expansiva, originan un aumento de volumen del conjunto de las partículas. En consecuencia, se puede alcanzar la saturación con una disminución apreciable de la densidad seca.

En referencia a la también comentada evolución de la resistencia por absorción de agua, se puede señalar las disminuciones de resistencia que se tiene al incrementar la energía de compactación, especialmente aplicada con bajos contenidos de agua. Para los suelos más plásticos, la inmersión disminuye enormemente el C.B.R. de suelos con menor contenido de agua, mientras que el suelo compactado con mayor humedad disminuye comparativamente menos. La resistencia del suelo a fuerzas externas disminuye rápidamente con mayores contenidos de humedad.

Rico A. y Orozco señalan que tras el período de inmersión, los C.B.R. del suelo CH son prácticamente iguales para cualquiera de las dos energías, confirmando la reconocida tendencia de esta prueba de perder toda capacidad de matizar a los suelos finos cuando se les sumerge después de compactados. (Orozco, 1979)

Para medir la resistencia de los suelos, en los primeros años de la aplicación de las técnicas modernas de compactación, indicaron que existe una relación que se juzgó muy confiable entre la resistencia y el peso volumétrico seco a que llega el material compactado, de manera que puede decirse que a mayor peso volumétrico seco se alcanza una situación más favorable en el suelo compactado. Debido a esto se optó por confiar en que compactar un suelo con una energía mayor, daría un peso volumétrico elevado, que traería consigo un aumento de resistencia.²⁰ Las altas resistencias obtenidas con compactaciones muy enérgicas pueden traer como consecuencias que un suelo muy compactado podrá, en general absorber mucha

²⁰ Rodríguez A.R., Del Castillo Mejía H., (1992), Consideraciones sobre Compactación de suelos en Obras de infraestructura de Transporte. IMT. Pp. 10-8,82.

agua si se dan las condiciones propicias y al hacerlo su resistencia podría descender drásticamente, en tanto que ese mismo suelo inicialmente compactado en forma menos enérgica, con menor resistencia inicial, podrá resultar mucho más estable ante el agua, manteniendo en el tiempo una resistencia inicialmente menor que la del otro, pero probablemente suficiente.

2.12. Problemas en arcillas compactadas

La compactación resulta ser un proceso de objetivos múltiples es evidente que muchos de esos objetivos serán contradictorios en muchos problemas concretos, en el sentido de que se emprendan para cumplir con uno pudieran perjudicar algún otro. Por ejemplo que en una compactación intensa produce un material muy resistente, pero sin duda muy susceptible al agrietamiento. Cuando por compactar de más un suelo se le hacen adquirir características indeseables, se dice que el suelo ha sido sobrecompactado. El convertir a los suelos finos en altamente expansivos a costa del dinero y el esfuerzo que representa la compactación es uno de los pecados más frecuentes.

En suma debe concluirse que no existe una relación fija entre la compactación que se da a un suelo y los resultados obtenidos, mucho habrá de depender de las circunstancias futuras en que la obra se desenvuelva y la consideración que se haga de tales circunstancias.

Estas contradicciones se amplían si se toma en cuenta que los suelos compactados suelen tener una vida extensa y que es un compromiso que conserven sus propiedades en toda su vida como lo es bajo la acción del agua, de las cargas soportadas, etc.

- Variables que afectan a la compactación de suelos finos

El comportamiento mecánico de los suelos arcillosos compactados, se dice está condicionado por tres variables principales; el peso volumétrico seco, el grado de saturación y la estructura del suelo compactado. Las dos primeras dos son ya conocidas pues se refieren a la densidad máxima y la humedad óptima, en cuanto a la estructura,

está demostrado que métodos de compactación diferentes producen distintas estructuras debido a la energía en él empleada.

Estas variables juegan su papel dentro de los diferentes métodos de compactación y condicionan las propiedades mecánicas de los suelos compactados en lo referente a resistencia, compresibilidad y comportamiento esfuerzo deformación.

Es evidente que los procedimientos de compactación que se utilizan en el laboratorio y los que después se usan en el campo no son idénticos. Actualmente se sabe que diferentes métodos de compactación por los que se lleve a muestras de un mismo suelo al mismo peso volumétrico seco producen suelos con diferentes propiedades mecánicas. También se sabe que estas diferencias son relativamente menos importantes en gravas, arenas y, en general, en suelos con partículas de forma equidimensional de estructura simple, que en suelos finos de carácter arcilloso, con partículas de forma laminar y estructuras elaboradas y basadas en nexos interparticulares de carácter electroquímico.

Todo proceso de compactación implica una doble acción sobre la estructura de los suelos. En primer lugar será preciso romper y modificar la estructura original que el suelo tenía en el lugar de donde fue recogido; en segundo lugar, habrá que actuar sobre él, modificando la disposición o acomodo de sus grumos o partículas, para hacer que el conjunto adopte una nueva estructura, más densa. Es dudoso pensar que efectos de compactación alcancen en suelos finos a disgregar los grumos en sus partículas individuales y es posible que sea más conveniente hablar de estructura de grumos, antes que de estructura de partículas.

- **Factores que influyen en la compactación en campo**

En laboratorio se ejecuta un ensayo de compactación con el fin de determinar la cantidad adecuada de agua de amasado necesaria para compactar en el suelo en campo. Para realizar la compactación de un suelo se utilizan diferentes métodos, dependiendo del tipo de suelo para suelos cohesivos como las arcillas se compactan mejor por métodos estáticos (rodillos). En campo las diferentes tipos de compactadoras que se

utilizan compactan el terreno tratando de reproducir los valores logrados en el laboratorio, mayormente este trabajo se realiza con rodillos como son rodillos; lisos, pata de cabra y neumáticos.

Una de las maquinas más viejas y comunes es el rodillo pata de cabra, compactan el suelo por presión y manipulación, pudiendo ser usados para gran variedad de suelos pero trabajan mejor con suelos finos como limos y arcillas. La compactación debe hacerse con rodillos pata de cabra y aplanadoras de tres rodillos o de tándem, la capa no debe tener un espesor mayor a 20cm, los rodillos deben ser llenados preferentemente con agua para tener una buena presión por pata. El número de pasadas puede determinarse antes, en otro lugar llamado zona de “prueba” así se ve como aumenta la densidad del material con el número de pasadas, (10 aproximadamente) permaneciendo después prácticamente invariable. Si después de 15 pasadas no se logra la compactación se debe disminuir el espesor de la capa o aumentar el peso del rodillo.

Para llevar a cabo la compactación es necesario realizar previamente un riplado o disgregación de la superficie del terreno, efectuada por medios mecánicos, generalmente se emplean herramientas acopladas a maquinas tractores (bulldozers) que se encargan de la eliminación del terreno vegetal y el proceso de escarificado.

Una vez preparado el terreno se debe acondicionar la humedad para una óptima compactación del material, para esta fase se emplea comúnmente un camión provisto de un tanque de agua (camión cuba) que debe humedecer el terreno lo más uniformemente posible, en caso de exceder la humedad esta tiene que ser reducida por diversas formas como son; desecan el oreo del material, trabajándolo con gradas una vez extendido o añadiendo más material seco o sustancias como cal, retrasando el trabajo o en algunos casos si se usara un aditivo aumentado la cantidad necesaria de este. Conseguida la humedad óptima se realiza la compactación con el rodillo.

Los rodillos pata de cabra concentran su peso sobre la pequeña superficie de las puntas tronco cónicas soldadas al rodillo, ejerciendo por lo tanto unas presiones estáticas muy grandes en los puntos en que las mencionadas partes penetran en el suelo. Conforme

se van dando pasadas y el material se compacta, dichas partes profundizan cada vez menos en el terreno, llegando un momento en que no se aprecia mejora alguna.

Si llueve durante la compactación antes de llegar a la nivelación del terreno la parte superior podría actuar como esponja y retrasar el proceso de compactación.

Una vez alcanzada la compactación para comprobar si va a servir de fundación se determina su densidad y humedad in situ, para comparar con los resultados de laboratorio, existen diversos métodos a emplear uno de ellos es el cono de arena.

2.12.1 Comportamiento de suelos compactados

El comportamiento de arcillas compactadas atiende especialmente a comportamiento volumétrico frente a cambios de humedad debido a su sensibilidad al agua. A grandes rasgos, los suelos compactados pierden calidad al incrementarse el contenido en agua entre sus partículas. Un aspecto fundamental dentro de esa "calidad" del suelo compactado es conocer su estabilidad cuando se producen variaciones en el contenido de agua, se conoce que la densidad alcanzada por el suelo varía con la humedad, la cual provocaría una disminución de la densidad máxima, además de producir expansiones y contracciones indeseadas en las obras civiles.

Evolución de la humedad en terraplenes.

La variación de humedad de los suelos de explanada de carreteras, de terraplenes o de terrenos naturales, tiende a ser un fenómeno complejo, controlado por muchos factores. Un principio acertado en todos los casos sería, eliminar o minimizar la variación de humedad a partir del momento de construcción de la obra. De esta forma se evitarían los cambios volumétricos "autógenos" y las variaciones en la rigidez inicial, que idealmente debe corresponder a las condiciones de proyecto.

Las medidas de humedad "in situ" a lo largo del tiempo demuestran, sin embargo, que la estabilidad volumétrica del suelo raramente se cumple pues la humedad varía a lo largo de la vida útil de la carretera, por los cambios cíclicos del clima.

2.13. Ciclos de saturación y secado

Si en un suelo todos los vacíos están llenos de aire y no contiene agua se dice que el suelo está seco, en cambio si todos los vacíos están llenos de agua estará saturado. La cantidad de agua en los suelos compactados cambia como respuesta a factores ambientales, afectando su comportamiento como el aumento en el volumen frente a cambios de humedad y por lo tanto a su densidad, así como influyendo en la resistencias.²¹

La tendencia de los materiales arcillosos a hincharse, si son de naturaleza expansiva, originan un aumento de volumen del conjunto de las partículas. En consecuencia, se puede alcanzar la saturación con una disminución apreciable de la densidad seca. Si el material es sometido un proceso de secado, no se verifica una recuperación de la densidad seca inicial. Sobreviene un mecanismo de fisuración por retracción del suelo.

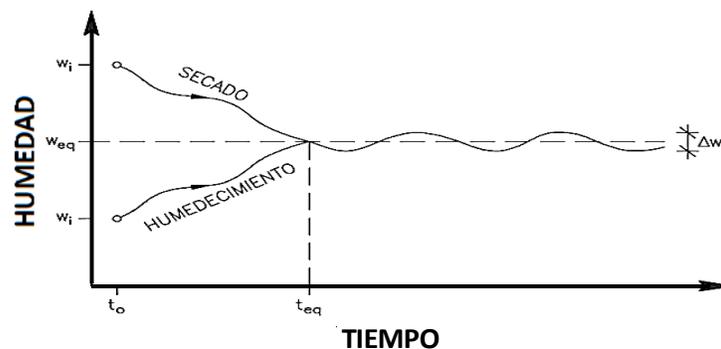
En servicio, el resultado final de una serie de ciclos de humedecimiento y secado, provocados por las variaciones climáticas, lleva al suelo a fluctuar en un entorno de densidad seca y humedad acotados. A ambos entornos se lo suele asociar con una zona de equilibrio. Los mismos dependerán de factores tales como la carga exterior a que está sometido, las características expansivas de los materiales arcillosos interpuestos entre los granos, la permeabilidad del material. Además, depende del tiempo en que actúan y que tardan en ponerse en acción cada uno de los efectos mencionados. Para el cálculo de esta fase se realizaron las relaciones gravimétricas y volumétricas.

²¹ Paramo J.A., (2002) Compactación de Suelos, Cátedra Transporte III F.C.E.I. y A. U.N.R., Argentina. Pp. 2-8.

2.14. Zona de equilibrio

La humedad cambia temporal y espacialmente como respuesta a cambios climáticos y en principio se pueden distinguir dos etapas en este cambio, una etapa transitoria de equilibrio hasta el tiempo (t_{eq}) en el que el terreno gana o pierde humedad de una forma irreversible desde su valor inicial (w_i) hasta un valor final de equilibrio (w_{eq}) y una fase cíclica.²²

Figura N° 2.17. Evolución de la humedad (esquema).



Fuente: Suelos Compactados en la Teoría y en la Práctica, Eduardo A.

Un exceso de densificación en un suelo arcilloso, hará evolucionar la humedad y densidad hasta que se alcance dicho ámbito de equilibrio.

2.14.1. Densidad de equilibrio

Es el peso unitario seco, que a través del tiempo logra el material sometido a las condiciones normales de servicio (tránsito), sea por densificación debida a las cargas, o por aumento de volumen debido a la succión de agua.

Esta densidad es menor que la densidad seca máxima lograda con los procesos de compactación, es decir que al verse afectado el suelo compactado por los periodos

²² Eduardo A., (2005), Suelos compactados en la teoría y en la práctica, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica. UPC, Barcelona.

de variaciones estacionales, cíclicas, controladas esencialmente por el clima (acción directa sobre la superficie, condiciones de drenaje e infiltración lateral o modificaciones de Nivel Freático), este van perdiendo la densidad lograda con un mayor esfuerzo.

De acuerdo a esto podemos considerar como un esfuerzo mayor para alcanzar un mayor y mejor peso volumétrico no resulta siendo lo más adecuado, pues al final de una serie de ciclos como ya se explicó el suelo no mantendría tal propiedad.

La densidad seca se calculará como la obtenida del final de los ciclos de saturación y secado, sometiendo el suelo compactado con los niveles óptimos de densidad seca máxima que se logran con el Proctor en moldes que serán analizados al final de cada ciclo, observando la disminución de esta densidad máxima hasta llegar a un punto donde no exista la variación entre ciclos, donde se conversara la densidad de equilibrio, cabe recalcar que esta no es una densidad neta sino más bien una aproximado.

2.14.2. Humedad de equilibrio

Es aquella que se tendrá bajo la estructura, una vez que el flujo de agua haya cesado, es decir, bajo una condición estática de flujo. Es el porcentaje de humedad con el que conviene realizar los trabajos de compactación.

La humedad de equilibrio se calcula de la siguiente manera según I.N.V. E – 146.

Se dibuja la curva de compactación de peso unitario denso y humedad óptima, y sobre esta gráfica se traza la curva de cero porcentajes (0%) de vacíos de aire, del suelo en estudio. Por el punto de coordenadas, óptima, se traza una paralela a la curva de 0% vacíos, hasta cortar la ordenada correspondiente a P_k . Este punto será el valor buscado la humedad de equilibrio.

El procedimiento anterior hace pensar, que la idea es pretender que el suelo en estado de equilibrio, tiene el mismo porcentaje de vacíos de aire que el suelo en estado denso. La demostración de lo anterior lleva a la ecuación:

$$W_A = \frac{100}{\rho_{eq}} - \frac{100}{\rho_{m\acute{a}x}} + W_{op} \quad (13)$$

W_A = Humedad de equilibrio (%)

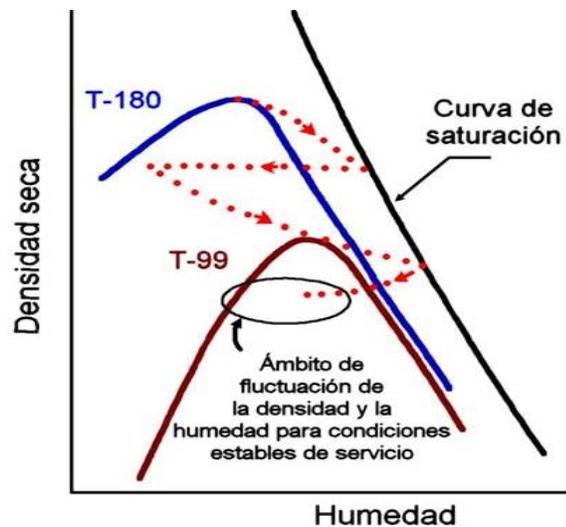
ρ_{eq} = Densidad de equilibrio (gr/cm³)

$\rho_{m\acute{a}x}$ = Densidad máxima del suelo seco (gr/cm³)

W_{op} = Humedad optima del suelo (%)

Esta humedad y densidad dependerán de factores tales como la carga exterior a que está sometido y las características expansivas de los materiales arcillosos. Además, depende del tiempo en que actúan y que tardan en ponerse en acción cada uno de los efectos mencionados.

Figura N° 2.18. Esquema de fluctuación de densidad.



Fuente: Compactación de suelos y materiales estabilizados, Material de apoyo U. N. De Rosario.

Un exceso de densificación en un suelo arcilloso, hará evolucionar la humedad y densidad hasta que se alcance dicho ámbito de equilibrio. Es el caso que esquemáticamente se muestra en la figura, donde una arcilla compactada con una elevada energía, evoluciona hacia el mismo. En el caso inverso, una insuficiencia de densificación, provocará la consolidación del material con incremento de la densidad seca.

En un terraplén, las condiciones de ingreso y egreso de agua, no son uniformes. Por lo tanto esta situación puede derivar en expansiones y contracciones irregulares. Esta situación puede manifestarse como deformaciones permanentes en la superficie del pavimento. En este escenario es que importa poder predecir tal ámbito antes de la construcción, lo que redundará en ventajas técnicas y económicas.

2.15. Posición del investigador

Como se observa de la teoría indagada se puede destacar que las variables más importantes en la compactación de suelos ya sean o no arcilloso siempre es la densidad máxima y la humedad óptima del suelo, a esto podemos sumar que solo se enfocan en adquirir la mayor densidad posible dejando de lado en la mayoría de los casos el comportamiento que tendrá en el suelo después de ser sometido a condiciones normales, es decir en prestación de servicios, además de la creencia que existe de que los suelos compactados con mayores esfuerzos significan mejores características y que se mantendrán a lo largo del tiempo.

Los suelos finos representan un problema debido a su sensibilidad al agua, con ellos se habla de la expansión y absorción del agua, que influyen en su comportamiento volumétrico, afectando a las obras que sobre ellos se fundan, como colapsos de estructuras debido a los asentamientos irregulares y grietas provocadas por el hinchamiento sobre pavimentos. Estos cambios volumétricos dependerán de los factores ambientales a los que esté sometido el suelo, debido a los múltiples problemas que giran los suelos expansivos es que se debe realizar estudios sobre su

comportamiento durante su vida útil para poder tener mayores consideraciones cuando se trabaje con éste.

En la compactación de suelos podemos identificar la existencia de un problema relacionado a la energía de compactación usada y la humedad del ambiente la cual va a afectar las propiedades del suelo ya compactado, para lograr alcanzar las propiedades deseadas puede cometerse un grave error pues se suele utilizar un esfuerzo mayor suponiendo que a mayor fuerza mejores características y que el suelo va a mantenerse de esa forma indefinidamente, ignorando el hecho de realizar una posible sobre compactación del suelo, además de que el clima va a alterar las propiedades iniciales, disminuyendo en muchos casos su resistencia, densidad, produciendo expansiones, etc. Es aquí donde se debe estudiar la evolución que tendrá el suelo compactado, considerando que este llegara a un punto de equilibrio donde sus propiedades se conservarán, para analizar allí la posibilidad de que una reducción en la energía puede arrojar los mismos resultados, al suponer que un esfuerzo menor en la compactación se encontrara más próximo a esa condición final en campo, resultando con menor resistencia inicial, pero más estable ante el agua, descendiendo así los cambios volumétricos, pues se dice que el hinchamiento será mayor cuanto mayor sea la densidad seca, entonces al usar una energía que nos dé una densidad menor significa una resistencia menor que la que ofrece una energía mayor, probablemente suficiente, y aceptable al tomar en cuenta que los suelos compactados no mantendrán las propiedades que le fueron dadas, por lo tanto realizar un mayor esfuerzo supone un gasto innecesario, al usar el menor esfuerzo se bajaría los costos de igualar en campo esfuerzos mayores.

CAPÍTULO III

EVOLUCIÓN DE LA COMPACTACIÓN EN ARCILLAS

CAPÍTULO III

EVOLUCIÓN DE LA COMPACTACIÓN EN ARCILLAS

3.1. Extracción del material

Para encontrar el material necesario se examinó varias zonas entre ellas el campus universitario, así como zonas cercanas a ríos y quebradas, debido a la importancia de encontrar un suelo fino que fuera arcilloso y no se encontrara contaminado. La recolección del material se realizó finalmente entrando unos kilómetros de la unidad educativa Sunchuwayco y el puente Qda. Grande de Laderas, encontrándose dicho material en una zona despoblada. El equipo usado fue:

- Pala, pico y bolsas plásticas.

Procedimiento de extracción de material

Se procedió a limpiar la zona de extracción (es decir quitar las ramas y basura existente), a un diámetro de 70 cm aproximadamente.

Figura N° 3.1. Excavación en el lugar de extracción del material.



Fuente: Elaboración propia.

Tomando como base localizar un suelo con cierta característica expansiva, la muestra se obtuvo por medio de excavación a una profundidad de 100cm (1 m), como se indica en Carretera, Calles y Autopistas, extrayendo más o menos 150 kg de material inalterado, al cual se le realizaron los siguientes ensayos de acuerdo a lo indicado en los Manuales técnicos para el diseño de Carreteras. Vol. 4 Ensayos de suelos y materiales (Tomo 1 Suelos).

3.2. Cuarteo del material

Este procedimiento describe cómo se pueden dividir las muestras de suelos obtenidas en el campo, para obtener porciones que sean representativas y que tengan los tamaños adecuados para los ensayos que se van a desarrollar. Este procedimiento fue manual, para ello se usó:

- Bolsas de hule, para vaciar el material
- Palas, cucharas, bandejas, enrasador, combo y fuentes, para tomar el material.

Procedimiento del cuarteo de material en laboratorio

Se realizó el cuarteo del material manualmente como se describe en el Manual técnico para el diseño de Carreteras. Vol. 4 Ensayos de suelos y materiales (Tomo 1 Suelos), vaciando la muestra sobre la bandeja, para luego voltearlo la pala formando una pila, allí se apreció los grandes terrones de material que dificultaban un poco esta tarea, por ellos se deshizo los más grandes con ayuda del combo. Procediendo luego a aplanar la pila, a la que se dividió en 4 partes con un enrasador, tomando las partes opuestas y apartando, como se trataba de una gran cantidad de material este procedimiento se realizó dos veces más, para finalmente mezclar las partes apartadas (opuestas) y así obtener un material más uniforme, el que se volvió a guardar en las bolsas para extraer de allí las porciones necesarias para los ensayos.

Figura N° 3.2. Material vaciado sobre las bandejas.



Fuente: Elaboración propia.

3.3. Determinación del contenido de humedad

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. Se utiliza el siguiente equipo:

- Horno, controlado termostáticamente, que mantenga una temperatura uniforme.
- Balanzas, fuentes o platos.

Procedimiento para obtener el contenido de humedad en laboratorio

De acuerdo a la tabla (Tabla S0301_1 del Manual técnico Suelos) se toma una cantidad de muestra representativa para el ensayo aproximadamente unos 150 gr. Se coloca la muestra húmeda en un plato, seco, de peso conocido (w_r), determine el peso del recipiente y la muestra de material usando una balanza apropiada (w_1), registrando los valores.

Coloque el recipiente con el material húmedo en un horno, después que el material se haya secado se retira del horno esperando que se enfríen a la temperatura ambiente y luego se toma el peso del recipiente y de la muestra secada en el horno (w_2).

Las pruebas de humedad se realizaron para cada ensayo de granulometría teniendo una humedad natural del 5% aproximadamente.

3.4. Análisis granulométrico por el método de lavado

Se determina la distribución por tamaños de las partículas de una muestra de suelo, mediante tamizado, para su posterior clasificación, se utiliza el siguiente equipo:

- Balanza, tamices, tamaños nominales de las aberturas pertenecen a la serie que se indica en la Tabla S0302_1 del Manual técnico Suelos (N°4, N°10, N°40, N°200).
- Base, tapa, horno, rodillo, espátulas, brochas y recipientes.

Figura N° 3.3. Tamices para análisis granulométrico (N°4, N°10, N°40, N°200).



Fuente: Elaboración propia.

Procedimiento en laboratorio

Se prepara la muestra húmeda por cuarteo, para obtener, una cantidad de material superior a la estipulada en Tabla 3.3 S0302_2 del Manual técnico Suelos. De acuerdo al tamaño.

Se debe moler el material antes de proceder al tamizado inicial. Se optó por realizarlo por medio del método del lavado, al tratarse de un suelo fino. Se toma una parte del material para obtener su contenido de humedad. Se pesó unos 500 gr aproximadamente

del material en esto natural para curarlo durante el tiempo necesario para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente, unas 24 horas.

- Tamizado inicial: Se coloca el material en una fuente y se agrega agua en cantidad suficiente para cubrir la muestra y lavar el material, agitándola con el agua de modo de separar el material fino. Se vacía en el tamiz N° 200 (0.075 mm). Se repita la operación hasta que el agua agitada con la muestra permanezca limpia y clara. Se reúne todo el material retenido un el recipiente para ser introducido en el horno y tomar el peso seco del material.
- Tamizado final: Tamice el material preparado del tamizado inicial, a través de la serie de tamices: 4.75 mm (N° 4), 2 mm (N° 10), 0.425 mm (N° 40) y 0.075 mm (N° 200). Se determina la masa retenida en cada tamiz.



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

GRANULOMETRÍA

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

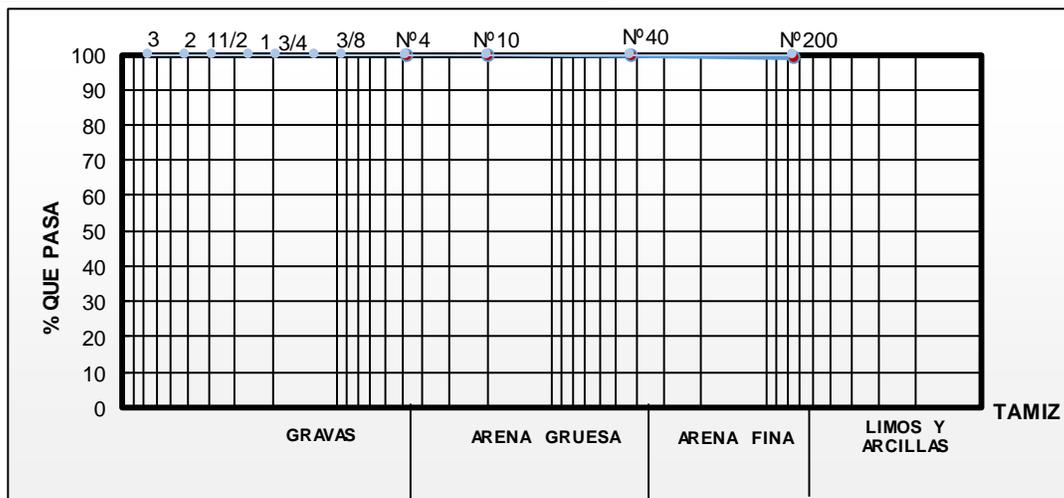
Procedencia: El Valle

Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

HUMEDAD NATURAL		PESO SECO DE LA MUESTRA	
Peso de suelo húmedo + Cápsula (gr)	150.90	Muestra total húmeda (gr)	500.00
Peso de suelo seco + Cápsula (gr)	148.60	Agregado ret. en N°4 (gr)	0.00
Peso de cápsula (gr)	106.00	Húmeda pasa por N°4 (gr)	500.00
Peso de suelo seco (gr)	42.60	Seca pasa por N°4 (gr)	474.39
Peso del agua (gr)	2.30	Muestra total Ensayo (gr)	474.39
Contenido de humedad (%)	5.40		

Peso Total (gr)	474.39				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
N°10	2.00	0.10	0.10	0.02	99.98
N°40	0.425	1.72	1.82	0.38	99.62
N°200	0.075	2.50	4.32	0.91	99.09
Base		470.07			



Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
 LABORATORISTA

Ing. Ricardo Arce
 RESPONSABLE LAB. DE SUELOS



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAE SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

GRANULOMETRÍA

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

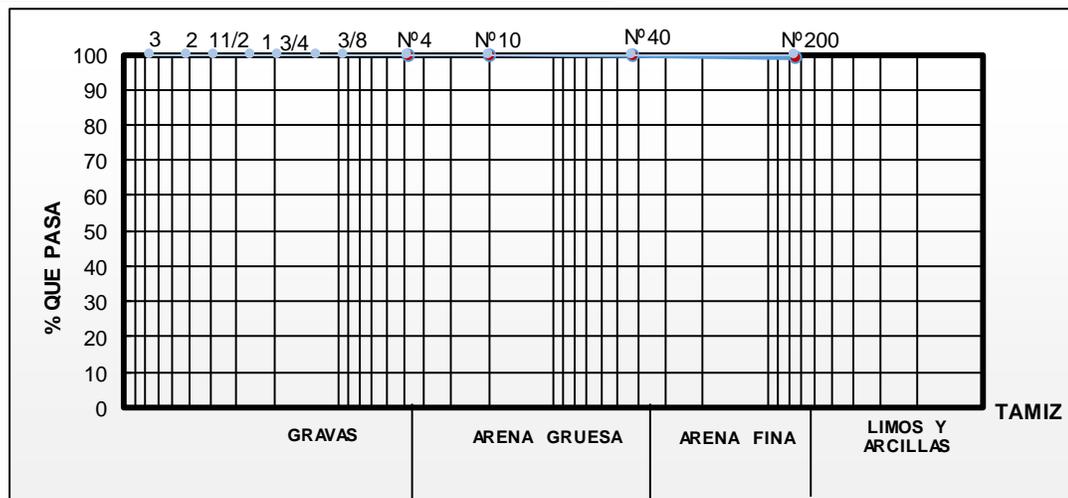
Procedencia: El Valle

Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

HUMEDAD NATURAL		PESO SECO DE LA MUESTRA	
Peso de suelo húmedo + Cápsula (gr)	150.70	Muestra total húmeda (gr)	500.00
Peso de suelo seco + Cápsula (gr)	148.39	Agregado ret. en N°4 (gr)	0.00
Peso de cápsula (gr)	105.80	Húmeda pasa por N°4 (gr)	500.00
Peso de suelo seco (gr)	42.59	Seca pasa por N°4 (gr)	474.28
Peso del agua (gr)	2.31	Muestra total Ensayo (gr)	474.28
Contenido de humedad (%)	5.42		

Peso Total (gr)	474.28				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
N°10	2.00	0.10	0.10	0.02	99.98
N°40	0.425	1.72	1.82	0.38	99.62
N°200	0.075	2.50	4.32	0.91	99.09
Base		469.96			



Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAE SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

GRANULOMETRÍA

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

Procedencia: El Valle

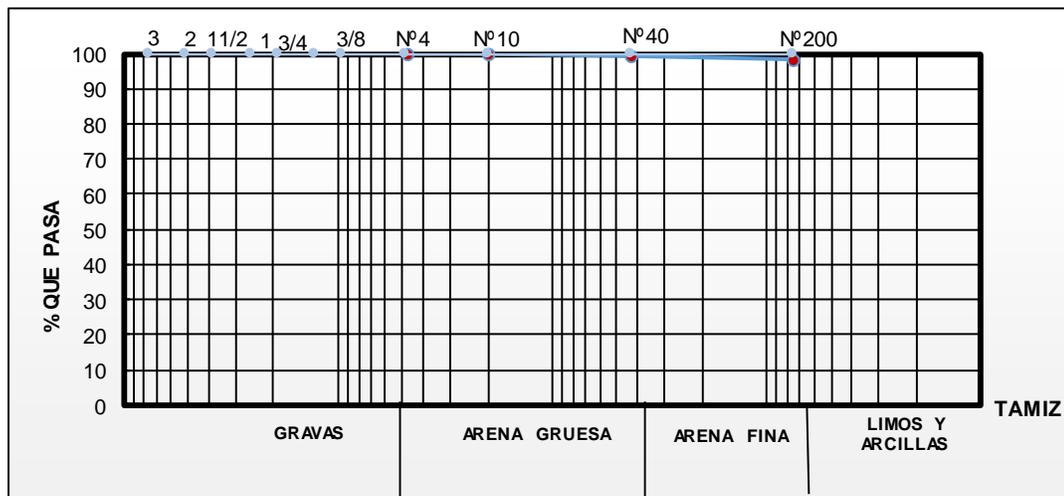
Fecha: Abril / 2018

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

T-99

HUMEDAD NATURAL		PESO SECO DE LA MUESTRA	
Peso de suelo húmedo + Cápsula (gr)	140.60	Muestra total húmeda (gr)	450.00
Peso de suelo seco + Cápsula (gr)	140.60	Agregado ret. en N°4 (gr)	0.00
Peso de cápsula (gr)	118.00	Húmeda pasa por N°4 (gr)	450.00
Peso de suelo seco (gr)	22.60	Seca pasa por N°4 (gr)	450.00
Peso del agua (gr)	0.00	Muestra total Ensayo (gr)	450.00
Contenido de humedad (%)	0.00		

Peso Total (gr)	450.00				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
N°10	2.00	0.15	0.15	0.03	99.97
N°40	0.425	2.98	3.13	0.70	99.30
N°200	0.075	4.47	7.60	1.69	98.31
Base		442.40			



Observación: Después de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
RESP. LABORATORIO DE SUELOS



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

GRANULOMETRÍA

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

Procedencia: El Valle

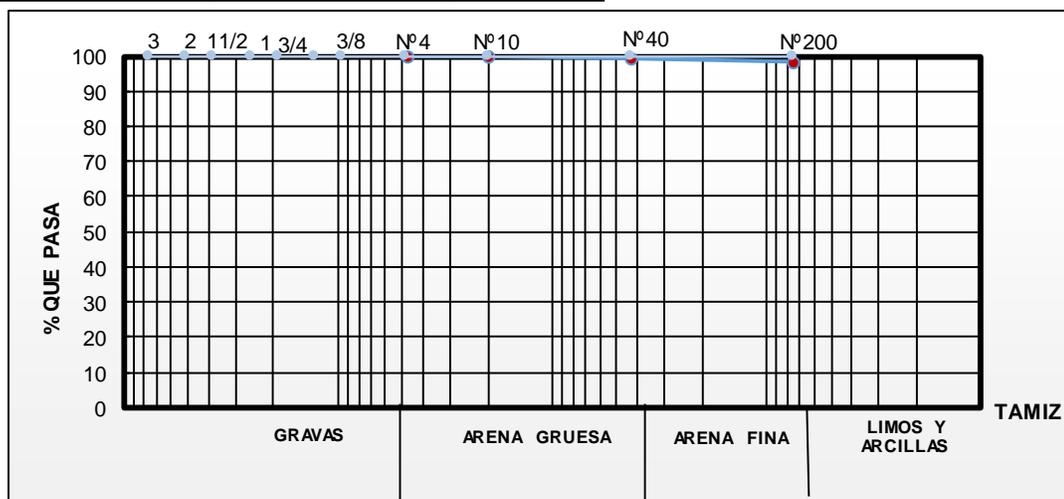
Fecha: Abril / 2018

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

T-180

HUMEDAD NATURAL		PESO SECO DE LA MUESTRA	
Peso de suelo húmedo + Cápsula (gr)	112.72	Muestra total húmeda (gr)	500.00
Peso de suelo seco + Cápsula (gr)	112.71	Agregado ret. en N°4 (gr)	0.00
Peso de cápsula (gr)	105.10	Húmeda pasa por N°4 (gr)	500.00
Peso de suelo seco (gr)	7.61	Seca pasa por N°4 (gr)	499.34
Peso del agua (gr)	0.01	Muestra total Ensayo (gr)	499.34
Contenido de humedad (%)	0.13		

Peso Total (gr)	499.34				
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00
N°10	2.00	0.00	0.00	0.00	100.00
N°40	0.425	3.12	3.12	0.69	99.31
N°200	0.075	4.64	7.76	1.72	98.28
Base		491.58			



Observación: Después de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
RESP. LABORATORIO DE SUELOS

3.5. Análisis granulométrico por medio del hidrómetro

Para determinar la distribución por tamaños de la fracción bajo tamiz 0,075 mm (N° 200), se puede utilizar el procedimiento de sedimentar esa fracción en un líquido conocido, generalmente agua destilada, basándose en la Ley de Stokes. El equipo usado es:

- Tamices, de 2,0 mm (No.10) y de 75 μm (N° 200),
- Hidrómetro, graduado para leer, de acuerdo con la escala que tenga grabada, el peso específico de la suspensión
- Agente Dispersante; Una solución de hexametáfosfato de sodio; se usará en agua destilada o desmineralizada en proporción de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución.
- Probeta de volumen de 1000 ml, termómetro, balanza, plato y espátula.

Procedimiento en laboratorio

La cantidad requerida para limos y arcillas de 50 a 60 g seco, mezclar con 125 ml de solución de defloculante dejando reposar por una noche.

Se transfiere la mezcla a la probeta con cuidado de quitar todos los remanentes que queden en el recipiente con ayuda de agua, luego se tapa la boca de la probeta con la mano y se agita por un minuto.

Al pasar el minuto se coloca la probeta en una mesa y se empieza a medir el tiempo, se introduce el hidrómetro tomando las lecturas a un minuto y luego a dos, se retira el hidrómetro y se lava, después se toman las medidas a los 5, 14, 30, 60, 120, 250 y 1.440 minutos.

No olvidando tomar la temperatura en cada lectura del hidrómetro.



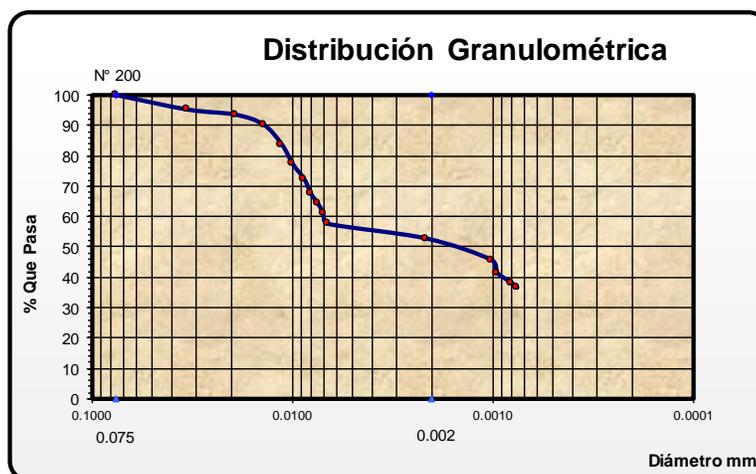
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
 PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

GRANULOMETRÍA - MÉTODO DEL HIDRÓMETRO

Proyecto de Investigación: "Estudio de la Influencia de la saturación en el proceso de Compactación"	Fecha: Septiembre / 2017
Procedencia: El Valle	Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

Modelo Hidróm.:	152 H	Peso específico:	2.75 gr/cm ³
Peso suelo seco:	60 gr	Factor (a) =	0.98
Agente Dispersante =		Silicato de Sodio	

Hora de Lectura	Tiempo Transc. min.	Temp. °c.	Lectura Real R'	Lectura Correg R.	Prof. Efec. L	Constante K Tabla	L/t	Ct	Lectura Correg Rc.	Diam. Partícula mm	% Mas Fino
9:33	0	25	57	58	6.8	0.0125	0	1.300	59.300	0.075	100.00
9:34	1	25	56	57	7.0	0.0125	7.000	1.300	58.300	0.0331	95.22
9:36	3	25	55	56	7.1	0.0125	2.367	1.300	57.300	0.0192	93.59
9:39	6	25	53	54	7.4	0.0125	1.233	1.300	55.300	0.0139	90.32
9:43	10	25	49	50	8.1	0.0125	0.810	1.300	51.300	0.0113	83.79
9:47	14	25	45	46	8.8	0.0125	0.629	1.300	47.300	0.0099	77.26
9:52	19	25	42	43	9.2	0.0125	0.484	1.300	44.300	0.0087	72.36
9:57	24	25	39	40	9.9	0.0125	0.413	1.300	41.300	0.0080	67.46
10:02	29	25	37	38	10.2	0.0125	0.352	1.300	39.300	0.0074	64.19
10:07	34	25	35	36	10.6	0.0125	0.312	1.300	37.300	0.0070	60.92
10:12	39	25	33	34	11.1	0.0125	0.285	1.300	35.300	0.0067	57.66
17:36	384	25	30	31	11.2	0.0125	0.029	1.300	32.300	0.0021	52.76
10:00	1846	24	26	27	11.9	0.0126	0.006	1.000	28.000	0.00101	45.73
16:58	2264	22	24	25	12.2	0.0129	0.005	0.400	25.400	0.0009	41.49
9:26	3226	22	22	23	12.5	0.0129	0.004	0.400	23.400	0.0008	38.22
18:00	3736	22	21	22	12.7	0.0129	0.003	0.400	22.400	0.0008	36.59



% Pasa 200	100.00
% Limo Parcial =	47.86
% Arcilla Parcial =	52.14

Univ. Vivian Bravo Tejerina
 LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
 RESP. LABORATORIO DE SUELOS

3.6. Determinación del límite líquido de los suelos

Humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco. Para posterior clasificación del suelo. El quipo usado es:

- Plato, espátula, cápsulas para secado (5), balanza y horno.
- Aparato de Límite Líquido (Máquina Casagrande) y ranurador.

Procedimiento en laboratorio para obtención del LL

Figura N° 3.4. Homogenización del material.



Fuente: Elaboración propia.

Del cuarteo se extrae una muestra de masa mínima de ensaye de 500 g de material bajo tamiz 0,425 mm (N° 40) se seca la muestra, se acondiciona colocándola en un plato y se mezcla con agua. Dejando curar unas 24 horas para suelos de alta plasticidad.

Se coloca en la taza de Casagrande una porción de la muestra acondicionada utilizando una espátula (nivel de 10mm de espesor). Se dividió la pasta de suelo, pasando el acanalador cuidadosamente por el centro de la taza.

Gire la manivela levantando y dejando caer la taza con una frecuencia de dos golpes por segundo, hasta que las paredes en el fondo entren en contacto de 10 mm, se registra el número de golpes obtenido (N). se retire material que se junta en el fondo del surco y se pone en una cápsula al horno para determinar su humedad (w). Repita la operación, para dar origen a un nuevo punto mezclando el material sobrante de la taza con el del

plato y aumente material seco. Se exprese el Límite Líquido (LL) del suelo como la humedad correspondiente a 25 golpes.

3.7. Determinación del límite plástico e índice de plasticidad

Es la humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remoldeado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Se utilizó:

- Plato, espátula, cápsulas (3), horno, balanza, placa de vidrio.

Procedimiento para obtención del LP en laboratorio

Del cuarteo se extrae una muestra que pase por el tamiz 0,425 mm (Nº 40) de unos 40 gr. Se acondiciona mezclando con agua, dejando curar unas 24.

Figura Nº 3.5. Suelo amasado sobre la placa de vidrio.



Fuente: Elaboración propia.

Se toma una porción de la muestra acondicionada, amasándola entre las manos, luego se roda sobre la superficie de vidrio hasta formar un cilindro de diámetro de 3 mm, se amasa y vuelve a formar el cilindro, se repite la operación, hasta que el cilindro se disgregue al llegar a un diámetro de 3 mm, en trozos y no pueda ser reamasado ni reconstituido. Se colocan los trozos en una cápsula para secado, previamente tarada, registrando su peso y calculando su la humedad (w). Se repite las anteriores etapas con dos porciones más de la muestra de ensayo.



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

LÍMITES DE ATTERBERG

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

Procedencia: El Valle

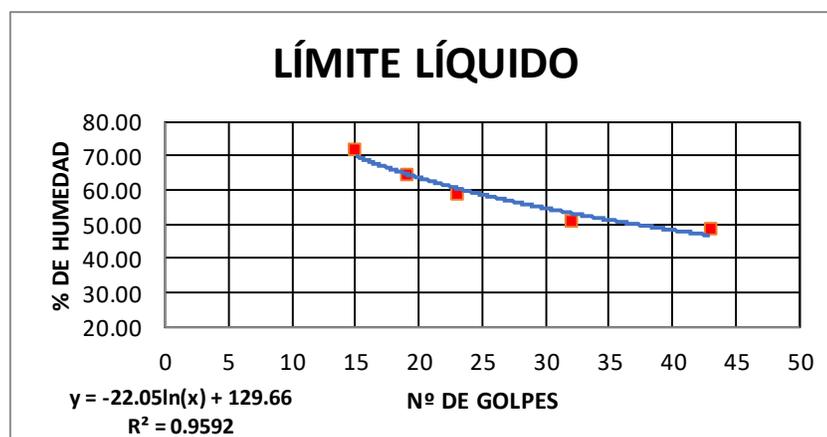
Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

LÍMITE LÍQUIDO

1

Capsula N°	1	2	3	4	5
N° de golpes	15	19	23	32	43
Suelo Húmedo + Cápsula	34.10	33.30	35.60	24.60	24.50
Suelo Seco + Cápsula	27.8	27.3	29.1	22.20	22.20
Peso del agua	6.30	6.00	6.5	2.4	2.3
Peso de la Cápsula	19	18	18.10	17.5	17.5
Peso Suelo seco	8.8	9.3	11	4.7	4.7
Porcentaje de Humedad	71.59	64.52	59.09	51.06	48.94



$$W(\%) = -22.05\ln(N^\circ \text{golpes}) + 129.66 =$$

58.68

LÍMITE PLÁSTICO

1

Cápsula	1	2	3	Límite Líquido (LL)
Suelo húmedo + Cápsula	18.70	19.40	22.60	59
Suelo seco + Cápsula	18.00	18.90	22.00	Límite Plástico (LP)
Peso de cápsula	16.00	17.40	20.20	34
Peso de suelo seco	2.00	1.50	1.80	Índice de plastidad (IP)
Peso del agua	0.70	0.50	0.60	25
Contenido de humedad	35.00	33.33	33.33	Índice de Grupo (IG)
				0

% que pasa N°200

99.09

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

LÍMITES DE ATTERBERG

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

Procedencia: El Valle

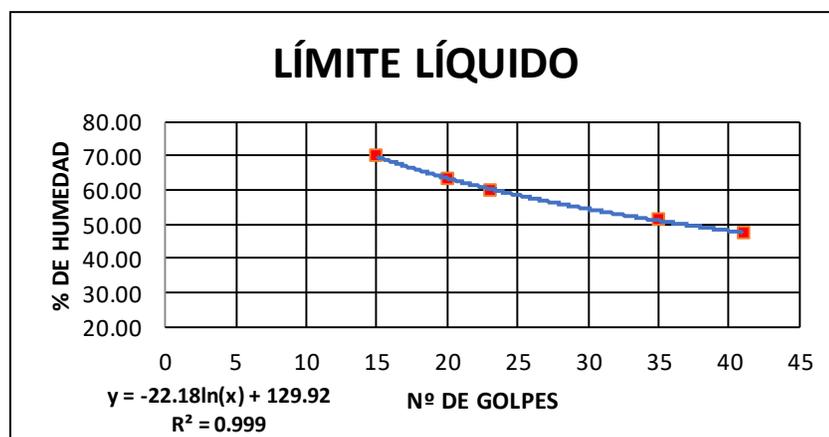
Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

LÍMITE LÍQUIDO

2

Capsula N°	1	2	3	4	5
N° de golpes	15	20	23	35	41
Suelo Húmedo + Cápsula	34.40	33.20	23.90	28.20	26.50
Suelo Seco + Cápsula	28.10	27.30	21.50	24.60	23.80
Peso del agua	6.30	5.90	2.40	3.60	2.70
Peso de la Cápsula	19.10	18.00	17.50	17.60	18.10
Peso Suelo seco	9.00	9.30	4.00	7.00	5.70
Porcentaje de Humedad	70.00	63.44	60.00	51.43	47.37



$$W(\%) = -22.18\ln(N^\circ \text{golpes}) + 129.92 =$$

58.53

LÍMITE PLÁSTICO

2

	1	2	3	
Suelo húmedo + Cápsula	19.40	18.80	20.70	Límite Líquido (LL) 59
Suelo seco + Cápsula	18.60	18.20	19.80	Límite Plástico (LP)
Peso de cápsula	16.30	16.40	17.20	34
Peso de suelo seco	2.30	1.80	2.60	Índice de plastidad (IP)
Peso del agua	0.80	0.60	0.90	25
Contenido de humedad	34.78	33.33	34.62	Índice de Grupo (IG)
				0

% que pasa N°200

99.09

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

LÍMITES DE ATTERBERG

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

Procedencia: El Valle

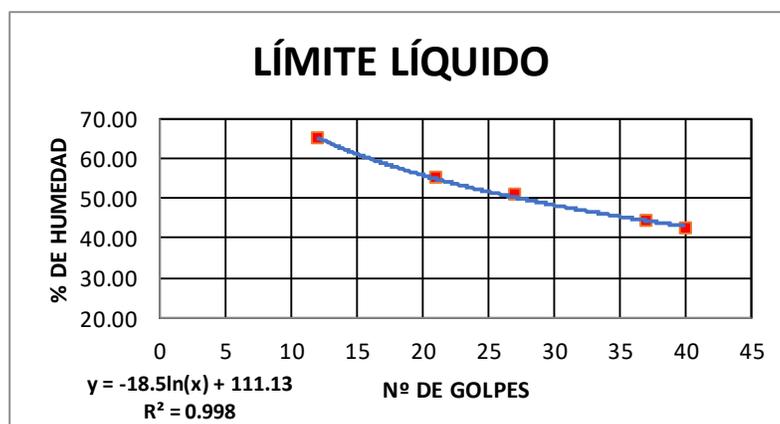
Fecha: Abril / 2018

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

T-99

LÍMITE LÍQUIDO

Capsula N°	1	2	3	4	5
N° de golpes	12	21	27	37	40
Suelo Húmedo + Cápsula	26.95	26.87	18.28	23.63	20.58
Suelo Seco + Cápsula	21.50	21.70	16.30	20.40	18.20
Peso del agua	5.45	5.17	1.98	3.23	2.38
Peso de la Cápsula	13.10	12.30	12.40	13.10	12.60
Peso Suelo seco	8.4	9.4	3.9	7.3	5.6
Porcentaje de Humedad	64.88	55.00	50.77	44.25	42.50



$$W(\%) = -18.5\ln(N^\circ \text{golpes}) + 111.13 = 51.58$$

LÍMITE PLÁSTICO

1

Cápsula	1	2	3	Límite Líquido (LL)
Suelo húmedo + Cápsula	14.63	13.34	12.83	52
Suelo seco + Cápsula	14.40	13.10	12.60	Límite Plástico (LP)
Peso de cápsula	13.60	12.30	11.80	29
Peso de suelo seco	0.80	0.80	0.80	Índice de plastidad (IP)
Peso del agua	0.23	0.24	0.23	23
Contenido de humedad	28.75	30.00	28.75	Índice de Grupo (IG)
				13

% que pasa N°200 98.31

Observación: Después de ser sometido a ciclos de saturación y secado



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

LÍMITES DE ATTERBERG

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

Procedencia: El Valle

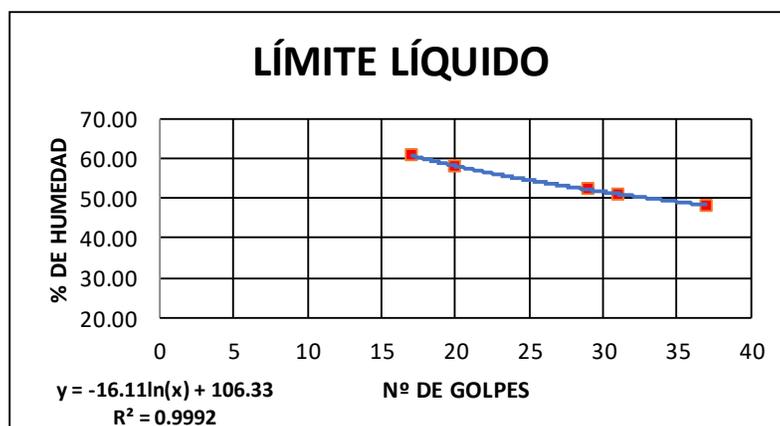
Fecha: Abril / 2018

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

T-180

LÍMITE LÍQUIDO

Capsula N°	1	2	3	4	5
N° de golpes	17	20	29	31	37
Suelo Húmedo + Cápsula	36.30	37.64	35.55	31.32	25.11
Suelo Seco + Cápsula	29.8	31.9	29.8	27.00	22.70
Peso del agua	6.50	5.74	5.75	4.32	2.41
Peso de la Cápsula	19.10	22.00	18.80	18.50	17.70
Peso Suelo seco	10.7	9.9	11	8.5	5
Porcentaje de Humedad	60.75	57.98	52.27	50.82	48.20



$$W(\%) = -16.11 \ln(N^\circ \text{golpes}) + 106.33 = 54.51$$

LÍMITE PLÁSTICO

2

	1	2	3	
Suelo húmedo + Cápsula	19.36	19.30	18.22	Límite Líquido (LL) 55
Suelo seco + Cápsula	19.11	18.89	18.00	Límite Plástico (LP) 31
Peso de cápsula	18.30	17.60	17.30	
Peso de suelo seco	0.81	1.29	0.70	Índice de plasticidad (IP) 24
Peso del agua	0.25	0.41	0.22	
Contenido de humedad	30.86	31.78	31.43	Índice de Grupo (IG) 14

% que pasa N°200 98.28

Observación: Después de ser sometido a ciclos de saturación y secado

- Clasificación del material antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado.

Tabla N° 3.1. Clasificación del suelo natural.

LL	59
LP	34
IP	25
IG	14
% Pasa por el Tamiz N° 200	99.09
% Pasa por el Tamiz N° 4	0.00
% Arcilla Parcial	52.14
IP \leq LL-30	29
IP $>$ 0.73(LL-20)	28.47
AASTHO	A-7-5 (14)
USCS	CH

Fuente: Elaboración propia.

El material atraviesa por todos los tamices, pasando con 99.09% por el tamiz N°200, se trata por lo tanto de un material fino, para su clasificación entre limo o arcilla se requiere de los límites y del ensayo del hidrómetro. Del límite líquido resulto una humedad de LL 59% en los ensayos, indicando un grado de expansión media y dentro de los rangos establecidos para los suelos arcillosos pues se sabe que 40 a 60% corresponde a suelos arcillosos, el límite plástico es LP 34%, y el índice de plasticidad es de IP 25 indicando baja plasticidad, por lo tanto es susceptible a cambios de volumen notorios. En cuanto al hidrómetro se verifica que más del 50 % corresponde a diámetros de partículas menores a 0.002mm. Después de observados todos los resultados podemos clasificar el suelo como:

Para el método AASTHO: más del 35% del material pasa por el tamiz N°200, indicando un material limo arcilloso, con los límites y un IG de 14 se coloca al suelo en el grupo A-7, como su IP (25) es menor que la resta entre LL-30 (29) como se indica en la tabla 2.2. Lo cual corresponde con la carta de plasticidad por lo tanto el suelo corresponde al grupo **A-7-5 (14)**, es decir un suelo fino con un índice de plasticidad elevado que lo ubica en el rango de las arcillas.

Para el método USCS: más del 50% del material pasa por el tamiz N°200, indicando un material fino, con los límites y con la carta de plasticidad, ubicamos el suelo entre la línea U y la línea A pudiendo ser CH o OH, con ayuda de la tabla para suelos finos se tiene finalmente que el suelo corresponde al grupo **CH**, es arcilla inorgánica de alta plasticidad y compresibilidad.

- Clasificación del material después de ser sometido a ciclos de saturación y secado.

Tabla N° 3.2. Clasificación del suelo T-99.

LL	52
LP	29
IP	23
IG	13
% Pasa por el Tamiz N° 200	98.31
% Pasa por el Tamiz N° 4	0.00
IP ≤ LL-30	21.58
IP > 0.73(LL-20)	23.05
AASTHO	A-7-5 (13)
USCS	CH

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.3. Clasificación del suelo T-180.

LL	55
LP	31
IP	24
IG	14
% Pasa por el Tamiz N° 200	98.28
% Pasa por el Tamiz N° 4	0.00
IP ≤ LL-30	25.00
IP > 0.73(LL-20)	25.55
AASTHO	A-7-5 (14)
USCS	CH

Fuente: Elaboración propia.

El material presenta cambios para ambos casos como es el porcentaje que pasa por el tamiz N°200 es menor que al inicio, indicando como los ciclos afectaron a las partículas del suelo agrandando su tamaño, en el caso del método Modificado pasa menor cantidad, esto posiblemente a que las partículas al contener menor cantidad de agua (humedad de compactación) que el otro caso, fueron más susceptibles a hincharse.

El límite líquido, plástico e índice de plasticidad para ambos métodos resulto en una disminución, en el caso del T-99 esta fue mayor, el LL bajo 7 puntos en este caso mientras que en el otro fue 4, el LP igualmente bajo 5 puntos para el T-99, mientras que solo 3 puntos para el otro caso, en cuanto al IP este se redujo en 2 y 1 punto respectivamente, pero aún se mantiene dentro del rango de baja plasticidad. El índice de grupo de se vio afectado obviamente debido a estos cambios a la par bajo pero manteniéndose en caso del T-180 pues bajo nos decimales, mientras que para el Estándar bajo un punto. Después de observados todos los resultados podemos clasificar el suelo como:

Para el método AASTHO: más del 35% del material continua pasando por el tamiz N°200 ambos casos, indicando un material limo arcilloso, con los límites y un IG de 14 y 13 se coloca al suelo en el grupo A-7, como su IP de 24 y 23 corresponde con la carta de plasticidad a un suelo corresponde al grupo **A-7-5 (14)** para el T-180 y **A-7-5 (13)** para el T-99, es decir un suelo fino con un índice de plasticidad elevado, como se puede ver no se ha cambiado la clasificación del suelo pero se observa como varia.

Para el método USCS: más del 50% del material aun pasa por el tamiz N°200, indicando para los dos métodos, con los límites y con la carta de plasticidad, ubicamos el suelo entre la línea U y la línea A pudiendo ser CH o OH, con ayuda de la tabla N°2.3 para suelos finos se tiene finalmente que el suelo corresponde al grupo **CH** para ambos, es arcilla inorgánica de alta plasticidad con un límite liquido elevado. Aquí igualmente no ha cambiado la clasificación pero para una mejor observación se usó para ambos métodos de clasificación la carta de plasticidad y para ver como variaba el suelo, en este caso se ve como baja de las líneas U y A acercándose más por debajo de la línea B para convertirse en un CL.

3.8. Determinación del peso específico y calibración del picnómetro.

Es el cociente entre la masa de un material y la masa de un volumen igual de agua, el valor del peso específico o gravedad específica es necesaria para establecer las relaciones volumétricas gravimétricas de la muestra de arcilla que ensayamos en el laboratorio y para poder trazar la curva de saturación del suelo. Se utilizó:

- Picnómetro, de capacidad igual o mayor que 500 ml
- Balanza, recipientes para las muestras, embudo, pipeta, termómetro, hornilla eléctrica, trapo, etc.
- Agua destilada, alcohol, solución disolvente de grasas, hielo, etc.

Figura N° 3.6. Material usado en el laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

Calibración del picnómetro, se limpia (con jabón, se enjuaga con agua destilada y se deja escurrir colocándolo boca abajo, luego se lava con alcohol, dejando escurrir), seque, pesa la masa del picnómetro vacío (178.1 gr.).

Llene con agua destilada a temperatura ambiente hasta la mitad de la marca de calibración. Se somete al calor a baño maría hasta alcanzar 60 °C. Retirar de la hornilla, y llenar con ayuda de la pipeta, hasta que la parte inferior del menisco

coincida con la marca de calibración. Con un termómetro se determine y registre la temperatura de calibración.

Se seca el interior del cuello del picnómetro y también el exterior. Se pesa y registra la masa del picnómetro más el agua. Se somete el picnómetro a un baño frío, tomando la temperatura y peso correspondientes (entre los 30 a 15 °C) en total de 4 para obtener la curva de calibración. Se obtiene la densidad del agua en función a la temperatura (T °C, de la Tabla S0307_1 del Manual técnico Densidad del agua en función de la temperatura).

Procedimiento en laboratorio

Tomar una muestra que pase por el tamiz N° 10, con una masa de 76.4 gr. La muestra de ensaye puede estar con su humedad natural o seca en horno. En este caso se realizara a humedad natural para suelos finos. Se mezcla con agua hasta formar una pasta, se coloca en el picnómetro, cuidando de evitar pérdidas. Agregue agua destilada, evitando la formación de burbujas, hasta alcanzar la mitad de la capacidad de la botella.

Se coloca el picnómetro en un baño maría para expulsar el aire contenido en el material, esperar a que el picnómetro alcance los 60 °C y retirar del baño. Agregue agua destilada hasta llenar el picnómetro. Limpie y seque el exterior. Determine y registre la masa y temperatura del picnómetro con la muestra y el agua. Se somete el picnómetro a un baño frío, tomando la temperatura y peso, se tomaron 4 puntos entre los 30 a 15 °C.

Se retira el material del picnómetro agregando agua para remover todo el material del frasco y así determinar la masa seca al final del ensaye, evaporando el agua en el horno.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

PESO ESPECÍFICO

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

Procedencia: El Valle

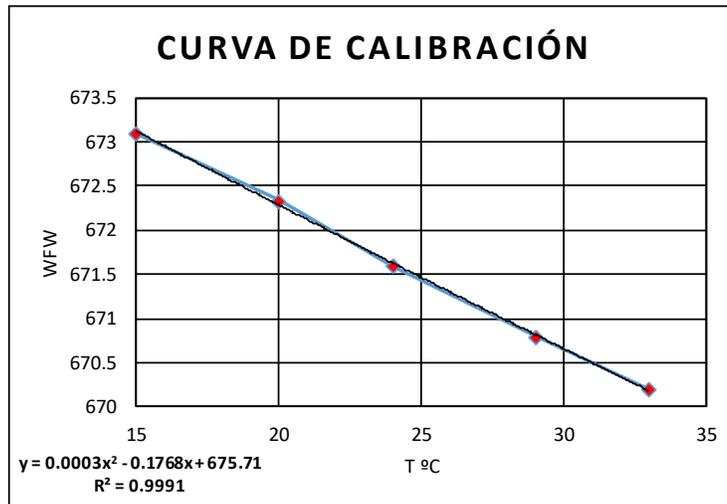
Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

CALIBRACIÓN DEL FRASCO

Peso del frasco seco vacío (gr)	178.1
Vol. del frasco volumétrico (ml)	500
Peso del frasco con agua W _{fw} (gr)	667.8
Temperatura frasco lleno °C	40

	P1	P2	P3	P4	P5
Temperatura °C	33	29	24	20	15
W _{fw} (gr)	670.2	670.8	671.6	672.34	673.1



PESO ESPECÍFICO

Peso del plato vacío (gr)	189.4
Peso del plato + muestra seca (gr)	265.8
Peso del suelo seco (gr)	76.4
Factor de corrección 20°C (k)	1.00

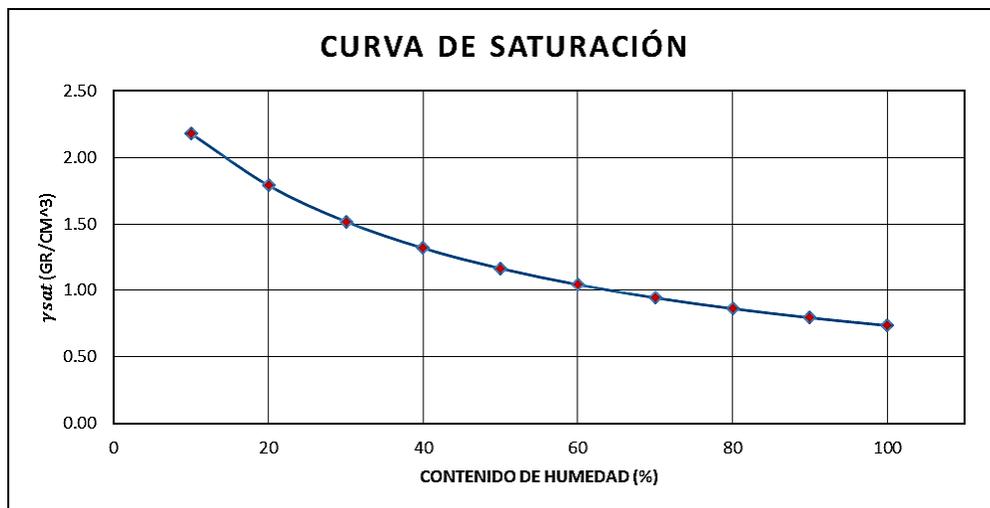
$$\rho_s = \frac{W_s}{(W_s + W_{fw}) - W_{fsw}}$$

ENSAYOS	1	2	3	4	Promedio
Temperatura ensayada (T °C)	29	24	19	15	21.75
Peso del suelo seco W _s (gr)	76.40	76.40	76.40	76.40	76.40
Peso del frasco + agua W _{fw} (gr)	667.33	669.79	671.62	675.28	671.01
Peso del frasco + agua + suelo W _{fsw} (gr)	716.30	718.90	720.70	724.20	720.03
Peso específico del suelo ρ _s (gr/cm ³)	2.785	2.799	2.796	2.780	2.79
Factor de corrección K	0.9977	0.9973	1.0002	1.0009	0.9990
Gravedad específica	2.73	2.75	2.76	2.75	2.75

a material fino arcilloso, con esto se comprueba más que el material extraído se trata de arcilla. Además podemos trazar la curva de saturación como se muestra, esta nos será de ayuda cuando se tengan los datos de la compactación y cálculos posteriores.

Gravedad específica	2.75
---------------------	------

Humedad (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
γ_{seca} (gr/cm ³)	2.18	1.79	1.52	1.32	1.16	1.04	0.94	0.86	0.79	0.74



3.9. Relaciones peso unitario-humedad en suelos – método estándar (T-99 y T-180)

El Proctor Estándar da como resultado una energía específica de compactación de 0,59 J/cm³ (6 kgf cm/cm³). Proctor modificado; da una energía de compactación de 2.67 J/cm³ (27.2 kgf cm/cm³). El equipo que se uso fue:

- Moldes Metálicos, de forma cilíndrica, con un collar separable de con 150 mm de Diámetro Nominal, con una capacidad (V) de 2.124 ± 0.021 l, un diámetro interno de 152.4 ± 0.7 mm y altura de 116.4 ± 0.1 mm.
- Pisón Metálico, debe tener para T-99 una cara circular de 50 ± 0.2 mm de diámetro y una masa de 2500 ± 10 gr. con una altura de caída a 305 ± 2 mm, para T-180, debe tener una cara circular de 50 ± 0.2 mm de diámetro y una masa de 4500 ± 10 gr, y una altura de caída de 460 ± 2 mm.
- Tamiz, de 4.75 mm (Nº 4) de abertura nominal.
- Probetas Graduadas, de 500 cm³ o un litro, balanzas, enrasador, horno, espátula, cucharas, combos, etc.

Procedimiento en laboratorio

- El método a emplear fue el Método B – molde se 150mm para ambos ensayos.

Para obtener el volumen del molde se pesa y registra la masa del molde vacío sin collar.

Determine la capacidad volumétrica del molde colocando una bolsa en la unión entre el cilindro y la placa base. Se llena el molde con agua a temperatura ambiente y enrase eliminando burbujas de aire y el exceso de agua. Se calcula la masa de agua que llena el molde, medir la temperatura del agua, obtener su densidad, calcular el volumen.

Se muele el material y se tamiza para que pase por el tamiz de 4.75 mm (Nº 4) para el método B. Del material preparado se obtiene un tamaño de muestra de ensayo de acuerdo con la tabla S0402_1 del Manual técnico (Tamaño de la muestra de ensayo) luego se separa porciones necesarias para realizar los ensayos unos 4 kg.

Figura N° 3.7. Molido y tamizado del suelo.



Fuente: Elaboración propia.

Mezcle cada porción por separado con agua suficiente para que las humedades (W) alcanzadas varíen, entre 14.5, 18.33, 22.10 y 25.8 % para el T-99 y 13.01, 16.11, 21.59 y 26.48 para el T-180, distribuidas en las proximidades de la humedad óptima. Esto se debe que se realizara con la humedad natural del suelo sin previo secado. Curar para que las fases líquida y sólida se mezclen homogéneamente.

Se coloca el molde con su collar sobre una base firme, plana y horizontal y se lo llena con una capa de material un tercio de la altura del molde más el collar. Se compacta la capa con 56 golpes en el molde de 150 mm (Métodos B). Repita dos veces la operación de llenado y compactado, para T-99(3 capas) y cuatro veces las operaciones para T-180(5 capas). Terminada la compactación, se retira el collar y se enrasa con la regla al nivel del borde del molde. Se pesa el molde con el suelo compactado. Determine la densidad húmeda ($\rho_h = M_s/V_m$). Se extrae muestras del suelo compactado, colocándolas en taras para determinar la humedad del suelo compactado. Repetimos para cada uno de los moldes restantes.



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

CALIBRACIÓN DE MOLDES

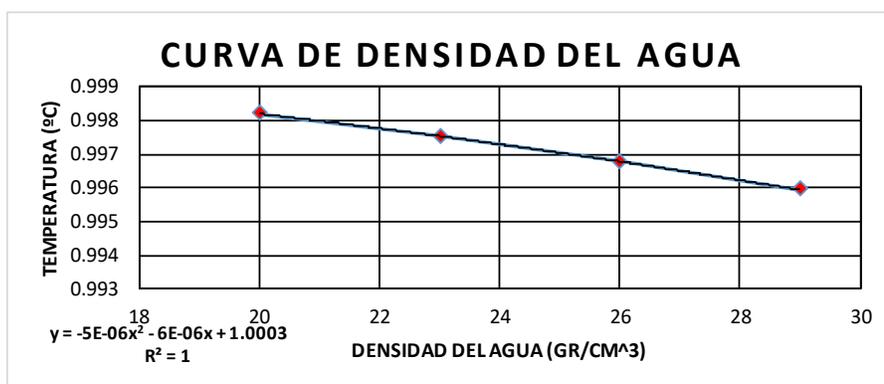
Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

Procedencia: El Valle

Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

Temperatura °C	ρ (gr cm ³)
20	0.9982
23	0.99754
26	0.99678
29	0.99594



MOLDE 1 T-99

Lectura	Diametro (cm)	Altura (cm)	Peso molde + base(gr)
1	15.3	11.5	6475.11
2	15.3	11.51	6475.14
3	15.31	11.6	6475.2
Promedio	15.30	11.54	6475.15

Peso del molde + agua (gr)	8594.30
Temperatura del agua (°C)	22
Densidad del agua (gr/cm ³)	0.9977
ti	2119.15
Volumen del molde (cm ³)	2123.93

MOLDE 2 T-180

Lectura	Diametro (cm)	Altura (cm)	Peso molde + base(gr)
1	15.3	11.51	6485.1
2	15.3	11.52	6485.14
3	15.32	11.6	6485.2
Promedio	15.31	11.54	6485.15

Peso del molde + agua (gr)	8603.10
Temperatura del agua (°C)	24
Densidad del agua (gr/cm ³)	0.9973
Peso del agua (gr)	2117.95
Volumen del molde (cm ³)	2123.74



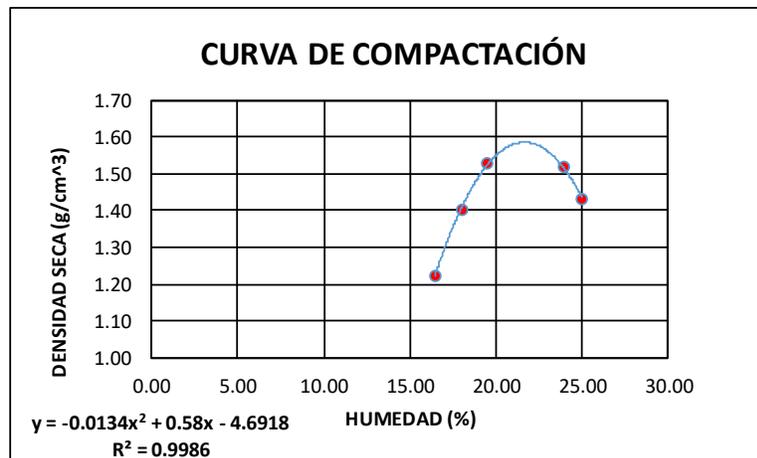
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEI SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
 PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

COMPACTACIÓN MÉTODO ÉSTNDAR

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"	
Procedencia: El Valle	Fecha: Septiembre/ 2017
Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina	

Compactación 1

Nº de capas	3	3	3	3	3
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	9500.00	9988.00	10348.00	10471.00	10280.00
Peso del molde (gr)	6475.15	6475.15	6475.15	6475.15	6475.15
Peso suelo húmedo (gr)	3024.85	3512.85	3872.85	3995.85	3804.85
Volumén de la muestra (cm ³)	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.42	1.65	1.82	1.88	1.79
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula (gr)	147.00	142.60	136.80	138.30	140.90
Peso suelo seco + cápsula (gr)	128.80	123.60	117.50	115.30	116.40
Peso del agua (gr)	18.20	19.00	19.30	23.00	24.50
Peso de la cápsula (gr)	18.00	18.10	18.30	19.00	18.40
Peso suelo seco (gr)	110.80	105.50	99.20	96.30	98.00
Contenido de humedad (%)	16.43	18.01	19.46	23.88	25.00
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.22	1.40	1.53	1.52	1.43



$$D_s \text{ (gr/cm}^3\text{)} = -0.013400 x^2 + 0.58 x - 4.6918$$

D máx (gr/cm ³)=	1.58
H opt (%)=	21.64

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
 LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
 RESP. LABORATORIO DE SUELOS



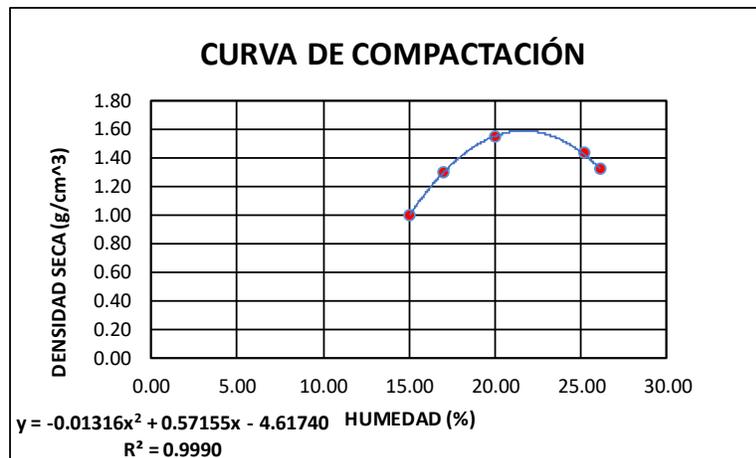
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

COMPACTACIÓN MÉTODO ÉSTANDAR

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"	
Procedencia: El Valle	Fecha: Septiembre/ 2017
	Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

Compactación 2

Nº de capas	3	3	3	3	3
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	8901.00	9695.00	10421.00	10280.00	10005.00
Peso del molde (gr)	6475.15	6475.15	6475.15	6475.15	6475.15
Peso suelo húmedo (gr)	2425.85	3219.85	3945.85	3804.85	3529.85
Volumén de la muestra (cm ³)	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.14	1.52	1.86	1.79	1.66
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula (gr)	155.90	153.50	133.90	131.80	137.80
Peso suelo seco + cápsula (gr)	138.10	134.00	114.80	109.01	113.30
Peso del agua (gr)	17.80	19.50	19.10	22.79	24.50
Peso de la cápsula (gr)	19.40	19.30	19.30	18.40	19.40
Peso suelo seco (gr)	118.70	114.70	95.50	90.61	93.90
Contenido de humedad (%)	15.00	17.00	20.00	25.15	26.09
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	0.99	1.30	1.55	1.43	1.32



$$D_s \text{ (gr/cm}^3\text{)} = -0.013160 x^2 + 0.57155 x - 4.6174$$

D máx (gr/cm ³)=	1.59
H opt (%)=	21.72

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
RESP. LABORATORIO DE SUELOS



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

COMPACTACIÓN MÉTODO ÉSTANDAR

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

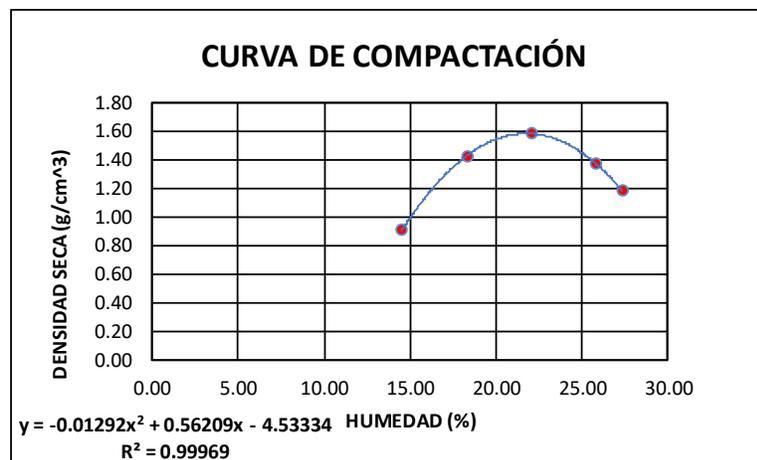
Procedencia: El Valle

Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

Compactación 3

Nº de capas	3	3	3	3	3
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	8672.00	10054.00	10589.10	10132.40	9673.00
Peso del molde (gr)	6475.15	6475.15	6475.15	6475.15	6475.15
Peso suelo húmedo (gr)	2196.85	3578.85	4113.95	3657.25	3197.85
Volumén de la muestra (cm ³)	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.03	1.69	1.94	1.72	1.51
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula (gr)	200.40	196.20	185.30	177.20	134.40
Peso suelo seco + cápsula (gr)	177.30	168.70	155.30	144.80	109.90
Peso del agua (gr)	23.10	27.50	30.00	32.40	24.50
Peso de la cápsula (gr)	18.00	18.70	19.60	19.20	20.20
Peso suelo seco (gr)	159.30	150.00	135.70	125.60	89.70
Contenido de humedad (%)	14.50	18.33	22.11	25.80	27.31
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	0.90	1.42	1.59	1.37	1.18



$$D_s \text{ (gr/cm}^3\text{)} = -0.012920 x^2 + 0.56209 x - 4.53334$$

D máx (gr/cm ³)=	1.58
H opt (%)=	21.75

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
 LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
 RESP. LABORATORIO DE SUELOS



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

COMPACTACIÓN MÉTODO MODIFICADO

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

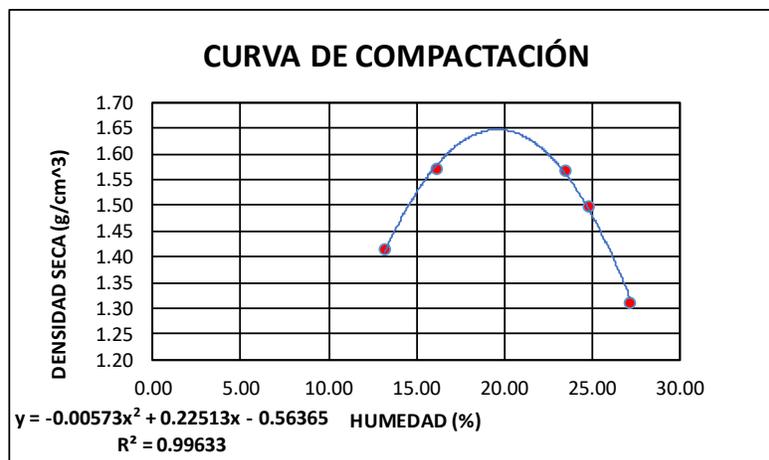
Procedencia: El Valle

Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

Compactación 1

Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	9881.00	10356.00	10591.00	10460.00	10029.00
Peso del molde (gr)	6485.15	6485.15	6485.15	6485.15	6485.15
Peso suelo húmedo (gr)	3395.85	3870.85	4105.85	3974.85	3543.85
Volumén de la muestra (cm ³)	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.60	1.82	1.93	1.871	1.67
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula (gr)	96.20	178.50	85.60	88.13	130.10
Peso suelo seco + cápsula (gr)	87.20	156.30	72.90	74.30	106.00
Peso del agua (gr)	9.00	22.20	12.70	13.83	24.10
Peso de la cápsula (gr)	18.90	18.90	18.80	18.60	17.50
Peso suelo seco (gr)	68.30	137.40	54.10	55.70	88.50
Contenido de humedad (%)	13.18	16.16	23.48	24.83	27.23
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.41	1.57	1.57	1.50	1.31



$$D_s \text{ (gr/cm}^3\text{)} = -0.00573 x^2 + 0.22513 x - 0.56365$$

D máx (gr/cm ³)=	1.65
H opt (%)=	19.64

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
RESP. LABORATORIO DE SUELOS



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

COMPACTACIÓN MÉTODO MODIFICADO

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

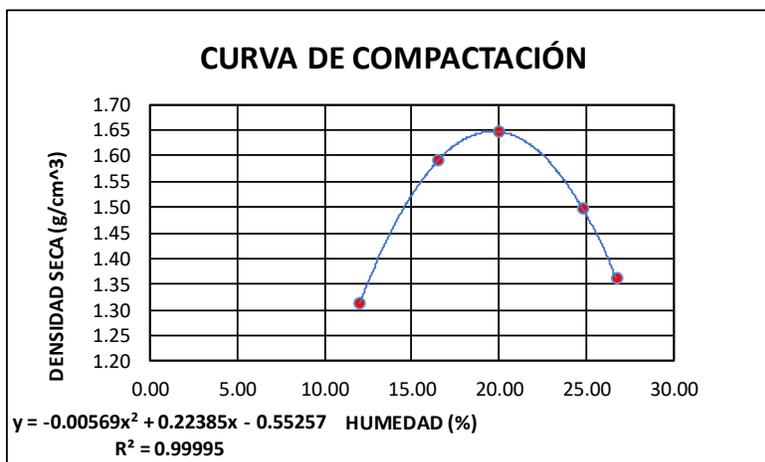
Procedencia: El Valle

Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

Compactación 2

Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	9608.00	10422.00	10683.00	10449.00	10152.00
Peso del molde (gr)	6485.15	6485.15	6485.15	6485.15	6485.15
Peso suelo húmedo (gr)	3122.85	3936.85	4197.85	3963.85	3666.85
Volumén de la muestra (cm ³)	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.47	1.85	1.98	1.87	1.73
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula (gr)	93.20	100.20	90.60	93.50	105.40
Peso suelo seco + cápsula (gr)	85.20	88.70	78.60	78.50	87.40
Peso del agua (gr)	8.00	11.50	12.00	15.00	18.00
Peso de la cápsula (gr)	18.50	19.00	18.60	18.00	20.10
Peso suelo seco (gr)	66.70	69.70	60.00	60.50	67.30
Contenido de humedad (%)	11.99	16.50	20.00	24.79	26.75
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.31	1.59	1.65	1.50	1.36



$$D_s \text{ (gr/cm}^3\text{)} = -0.005690 x^2 + 0.22385 x - 0.55257$$

D máx (gr/cm ³)=	1.65
H opt (%)=	19.67

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
 LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
 RESP. LABORATORIO DE SUELOS



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
LABORATORIO DE SUELOS

COMPACTACIÓN MÉTODO MODIFICADO

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"

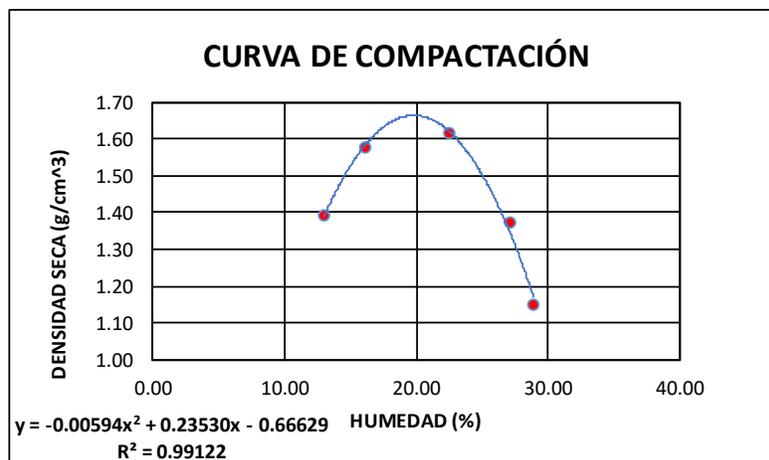
Procedencia: El Valle

Fecha: Septiembre/ 2017

Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

Compactación 3

Nº de capas	5	5	5	5	5
Nº de golpes por capa	56	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde (gr)	9833.00	10371.00	10685.00	10192.00	9631.00
Peso del molde (gr)	6485.15	6485.15	6485.15	6485.15	6485.15
Peso suelo húmedo (gr)	3347.85	3885.85	4199.85	3706.85	3145.85
Volumén de la muestra (cm ³)	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93	2123.93
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1.58	1.83	1.98	1.75	1.48
Cápsula Nº	1	2	3	4	5
Peso suelo húmedo + capsula (gr)	96.20	98.30	91.76	95.60	122.80
Peso suelo seco + cápsula (gr)	87.20	87.30	78.20	79.10	99.40
Peso del agua (gr)	9.00	11.00	13.56	16.50	23.40
Peso de la cápsula (gr)	18.00	19.00	18.00	18.30	18.60
Peso suelo seco (gr)	69.20	68.30	60.20	60.80	80.80
Contenido de humedad (%)	13.01	16.11	22.52	27.14	28.96
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.39	1.58	1.61	1.37	1.15



$$D_s \text{ (gr/cm}^3\text{)} = -0.005940 x^2 + 0.2353 x - 0.66629$$

D máx (gr/cm ³)=	1.66
H opt (%)=	19.81

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
 LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
 RESP. LABORATORIO DE SUELOS

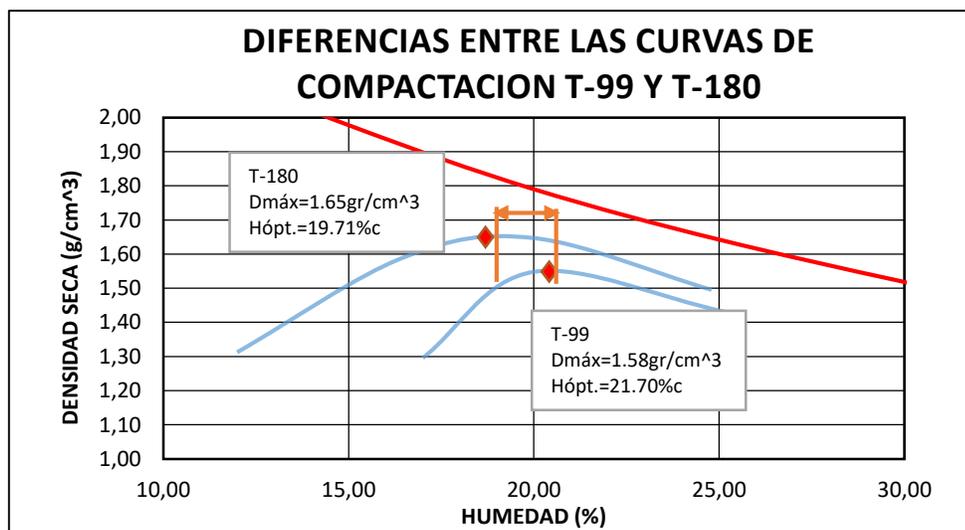
Tabla N° 3.4. Densidades del suelo para T-99 y T-180.

	T-99		T-180	
	D máx (gr/cm ³)	H opt (%)	D máx (gr/cm ³)	H opt (%)
Compactación 1	1.58	21.64	1.65	19.64
Compactación 2	1.59	21.72	1.65	19.67
Compactación 3	1.58	21.75	1.66	19.81
PROMEDIO	1.58	21.70	1.65	19.71

Fuente: Elaboración propia.

De los ensayos se obtuvo los valores de humedad y densidad, que se ve en las tablas, para cada método se puede observar la variación existente, como la de tanto la humedad y densidad seca máxima del T-99 al T-180. Pero dentro de rangos aceptables para suelos arcillosos, el mayor contenido de humedad en uno de los métodos es lógico pues el T-99 al tener menos fuerza de compactación requiere mayor agua para un mejor amasado del material, claro estafeta igualmente a su densidad seca máxima siento esta menor a la lograda por me método del T-180.

Figura N° 3.8. Curva de compactación.



Fuente: Elaboración propia.

Al realizar una comparación entre ellas como se muestra en el gráfico es más evidente como baja las curvas, el T-99 se desplaza hacia abajo y a la derecha, moviendo su punto

máximo de curva correspondiente a la humedad óptima y densidad seca máxima. También podemos ver como la rama húmeda es paralela a la curva de saturación en ambos métodos, lo cual es un buen indicador de los valores encontrados, debido a que este el comportamiento típico que debe tener las curvas de compactación respecto de la curva de saturación.

3.10. Determinación de la relación de soporte del suelo en el laboratorio (CBR) y expansión del material

Determinar un índice de resistencia de los suelos, conocido como Razón de Soporte de California (CBR). Sirve para medir la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. Se usó el siguiente equipo:

- Prensa de Ensayo, está conformada por un marco de carga con una capacidad mínima de 44.5 kN (10.000 lbf) y una gata mecánica capaz de desplazar una base metálica rígida a una velocidad uniforme de 1.27 mm/min., contra el pistón con un dispositivo indicador de carga de una capacidad mínima de 26.7 kN (6.000 lbf), el pistón debe llevar, además, sujeto a él, un dial.
- Moldes; metálicos, cilíndricos, con un diámetro 152.4 mm y una altura de 177.8mm. con un collar de extensión metálico y una base metálica.
- Disco Espaciador, Pistón de 4.5kg para el método estándar y para el método modificado, Cargas ranuradas de 2.27 Kg. cada una.
- Aparato Medidor de Expansión (Extensómetro), Pistón de Penetración, de 2” de diámetro y una longitud no inferior a 101.6 mm.
- Horno, balanza, probetas, espátulas, ensarador, brochas y discos de papel filtro.

Procedimiento en laboratorio

Pesar y registrar la masa del molde vacío sin collar, se determinó el volumen de los moldes tomando medidas de diámetro y altura.

La preparación de muestras se realiza al igual que el procedimiento para realizar la compactación de suelo por métodos Estándar y Modificado, se preparara con las

humedades óptimas obtenidas de compactación. El acondicionamiento será el mismo, se fija el molde con su collar sobre su base y coloque el disco con el papel filtro, compactando cada una de las porciones de suelo húmedo, en 5 capas para el T-99 y T-180. Cada probeta se debe compactar con 56, 25 y 12 golpes a cada capa para cada molde, luego se retira el collar y se enrase. Quitando el disco se toma el peso de la probeta, se coloca un papel filtro sobre la base, se invierte molde y asegura a la base.

Se pone el vástago sobre la probeta, junto con las cargas para producir una sobrecarga igual a la ejercida por la estructura del pavimento de un peso aproximado de 4.50Kg.

- Para la expansión: Se usará el extensómetro acomodando sobre los moldes y marcando su posición, tomando lecturas iniciales de expansión, llevar las probetas a saturar, tomando lecturas de los siguientes 3 días, tirar del agua, dejando drenar durante 15 minutos. Se retira las cargas y se pesa el molde con el suelo. Determine la masa de suelo compactado después de la inmersión.

- Para penetración: Se coloca nuevamente las pesas (4.5kg.) sobre la probeta. Se apoya el pistón de penetración con la carga más pequeña posible, se ajustan y los diales de tensión y deformación en cero. Se aplica la carga en el pistón de manera que la velocidad sea de 1.27 mm/min. Y se anota las lecturas de carga para los niveles de penetración: 0.64; 1.27; 1.91; 2.54; 3.18; 3.81; 4.45; 5.08; 7.62; 10.16 y 12.7mm.

Figura N° 3.9. Toma de lecturas de carga.



Fuente: Elaboración propia.

Se desmolda el suelo y se establece su humedad con tres puntos abajo, la parte superior y otro del medio de la muestra.



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"	Fecha: Septiembre/ 2017
Procedencia: El Valle	Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

COMPACTACION T-99

CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO

Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	56			25			12		
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse	D. de M		Antes de mojarse	D. de M		Antes de mojarse	D. de M	
Peso muestra húm.+molde	11313.00	11460.00		10259.40	10440.00		11305.00	11520.00	
Peso Molde	7244.70	7244.70		6250.80	6250.80		7421.50	7421.50	
Peso muestra húmeda	4068.30	4215.30		4008.60	4189.20		3883.50	4098.50	
Volumen de la muestra	2077.31	2077.31		2086.77	2086.77		2077.31	2077.31	
Peso Unit. Muestra Húm.	1.96	2.03		1.92	2.01		1.87	1.97	
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	107.70	127.70	140.20	121.30	94.10	102.20	145.10	122.30	110.40
Peso muestra seca + tara	88.50	99.80	114.00	98.70	74.90	78.00	116.20	96.10	89.72
Peso del agua	19.20	27.90	26.20	22.60	19.20	24.20	28.90	26.20	20.68
Peso de tara	18.00	17.60	17.60	18.10	18.00	17.80	19.30	18.40	20.20
Peso de la muestra seca	70.50	82.20	96.40	80.60	56.90	85.90	96.90	77.70	69.52
Contenido humedad %	27.23	33.94	27.18	28.04	33.74	28.17	29.82	33.72	29.75
Promedio cont. Humedad	30.59		27.18	30.89		28.17	31.77		29.75
Peso Unit.muestra seca	1.50		1.60	1.47		1.57	1.42		1.52

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
21.70	1.58

EXPANSION

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION	
			EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%
18-sep	10:50	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19-sep	10:30	2	5.22	0.52	4.62	6.45	0.65	5.52	6.28	0.63	5.38
20-sep	11:30	3	5.89	0.59	5.21	6.51	0.65	5.57	6.66	0.67	5.70
21-sep	12:30	4	6.41	0.64	5.67	6.56	0.66	5.62	6.69	0.67	5.73

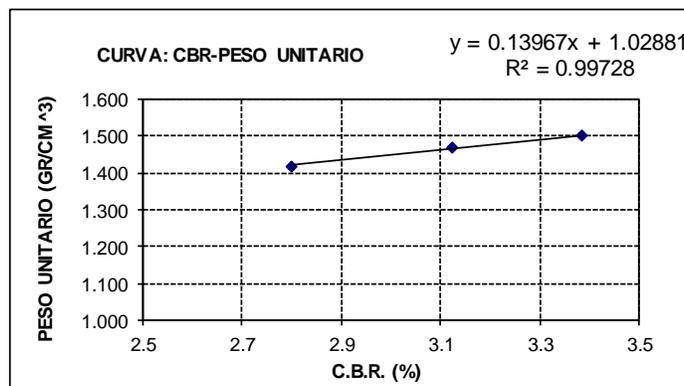
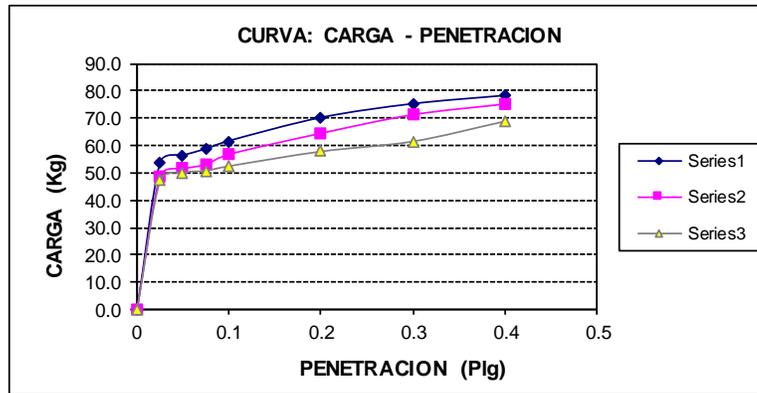
C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
3.38	1.50
3.12	1.47
2.80	1.42

PENETRACION		CARGA NORMA	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3				
Pulg.	mm		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0.00	0.00		0.00	0.00				0.00	0.00			0.00	0.00		
0.025	0.63		53.57	2.73				48.88	2.49			47.20	2.40		
0.05	1.27		56.26	2.87				51.56	2.63			50.22	2.56		
0.075	1.9		58.61	2.99				53.24	2.71			50.89	2.59		
0.1	2.54	70.31	61.53	3.13			4.46	56.93	2.90			4.12	52.57	2.68	3.81
0.2	5.08	105.4	70.02	3.57			3.38	64.65	3.29			3.12	57.94	2.95	2.80
0.3	7.62		75.05	3.82				71.46	3.64			61.63	3.14		
0.4	10.16		78.07	3.98				75.39	3.84			69.01	3.51		
0.5	12.7		0.00	0.00				0.00	0.00			0.00	0.00		



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)



CBR 100% D.máx	4 %
CBR 95% D.Máx.	3 %

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"	Fecha: Septiembre/ 2017
Procedencia: El Valle	Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

COMPACTACION T-180

CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO

Nº capas	5			5			5		
Nº golpes por capa	56			25			12		
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse	D. de M		Antes de mojarse	D. de M		Antes de mojarse	D. de M	
Peso muestra húm.+molde	10515.00	10800.00		10195.00	10550.00		10960.00	11470.00	
Peso Molde	6240.00	6240.00		6255.00	6255.00		7420.00	7420.00	
Peso muestra húmeda	4275.00	4560.00		3940.00	4295.00		3540.00	4050.00	
Volumen de la muestra	2114.77	2114.77		2113.56	2113.56		2099.53	2099.53	
Peso Unit. Muestra Húm.	2.02	2.16		1.86	2.03		1.69	1.93	
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	106.20	82.80	93.40	97.90	104.40	100.30	110.00	109.90	95.10
Peso muestra seca + tara	86.20	64.80	76.00	78.60	80.20	80.10	85.40	85.00	75.90
Peso del agua	20.00	18.00	17.40	19.30	24.20	20.20	24.60	24.90	19.20
Peso de tara	18.00	17.60	17.60	18.20	16.70	18.10	17.14	19.30	22.40
Peso de la muestra seca	68.20	47.20	58.40	60.40	63.50	62.00	68.26	65.70	53.50
Contenido humedad %	29.33	38.14	29.79	31.95	38.11	32.58	36.04	37.90	35.89
Promedio cont. Humedad	33.73		29.79	35.03		32.58	36.97		35.89
Peso Unit.muestra seca	1.51		1.66	1.38		1.53	1.23		1.42

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
19.71	1.65

EXPANSION

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.	EXTENSION	%	LECT.	EXTENSION	%	LECT.	EXTENSION	%
			EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%
18-sep	10:50	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
19-sep	10:30	2	4.00	0.40	3.42	5.32	0.53	4.55	5.92	0.59	5.07
20-sep	11:30	3	7.16	0.72	6.13	8.32	0.83	7.12	11.10	1.11	9.50
21-sep	12:30	4	11.01	1.10	9.43	11.22	1.12	9.61	11.45	1.15	9.80

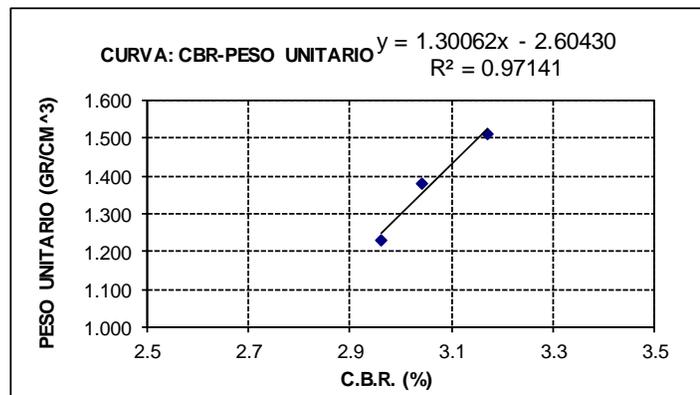
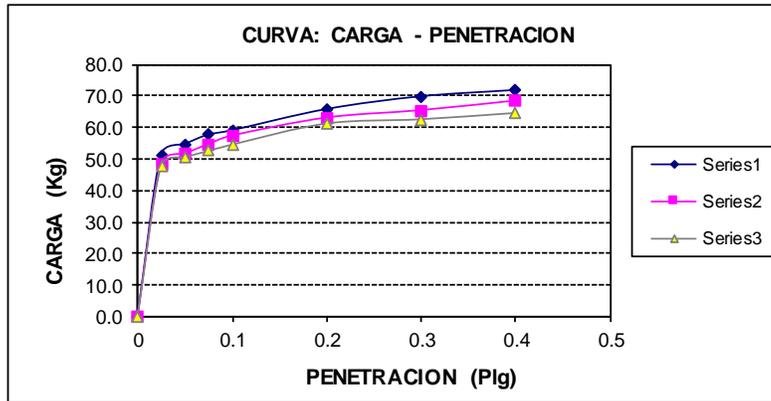
C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
3.17	1.51
3.04	1.38
2.96	1.23

PENETRACION		CARGA NORMA	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3				
Pulg.	mm		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0.00	0.00		0.00	0.00				0.00	0.00			0.00	0.00		
0.025	0.63		51.22	2.61				48.54	2.47			47.87	2.44		
0.05	1.27		54.58	2.78				51.56	2.63			50.55	2.57		
0.075	1.9		57.60	2.93				54.58	2.78			52.57	2.68		
0.1	2.54	70.31	58.94	3.00		4.27	57.27	2.92		4.15	54.58	2.78		3.95	
0.2	5.08	105.4	65.66	3.34		3.17	62.97	3.21		3.04	61.29	3.12		2.96	
0.3	7.62		69.68	3.55			65.32	3.33			62.63	3.19			
0.4	10.16		71.70	3.65			68.34	3.48			64.65	3.29			
0.5	12.7		44.51	2.30			44.51	2.30			44.51	2.30			



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)



CBR 100% D.máx	3 %
CBR 95% D.Máx.	3 %

Observación: Antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"	Fecha: Abril / 2018
Procedencia: El Valle	Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

COMPACTACION T-99

CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO

Nº capas	5			5			5		
	56			25			12		
Nº golpes por capa	56			25			12		
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M
Peso muestra húm.+molde	11185.00	#####		10705.00	10905.00		10885.00	11085.00	
Peso Molde	6265.80	6265.80		6265.80	6265.80		7235.00	7235.00	
Peso muestra húmeda	4919.20	5049.20		4439.20	4639.20		3650.00	3850.00	
Volumen de la muestra	2049.89	2049.89		2049.89	2049.89		2058.72	2058.72	
Peso Unit. Muestra Húm	2.40		2.46	2.17		2.26	1.77		1.87
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	106.00	119.02	108.20	110.80	193.60	144.20	172.40	134.00	149.80
Peso muestra seca + tara	85.30	92.60	86.60	88.60	147.50	117.20	138.30	107.20	121.20
Peso del agua	20.70	26.42	21.60	22.20	46.10	27.00	34.10	26.80	28.60
Peso de tara	18.00	17.40	17.60	18.80	18.60	32.20	32.00	33.00	32.80
Peso de la muestra seca	67.30	75.20	69.00	69.80	128.90	85.00	106.30	74.20	88.40
Contenido humedad %	30.76	35.13	31.30	31.81	35.76	31.76	32.08	36.12	32.35
Promedio cont. Humedad	32.95		31.30	33.78		31.76	34.10		32.35
Peso Unit.muestra seca	1.81		1.88	1.62		1.72	1.32		1.41

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
26.59	1.47

EXPANSION

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION		LECT.	EXPANSION	
			EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%	EXTENS	CM.	%
30-abr	6:00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02-may	6:00	3	6.00	0.60	5.14	7.00	0.70	5.99	7.50	0.75	6.42
03-may	6:00	4	8.00	0.80	6.85	8.50	0.85	7.28	8.10	0.81	6.93

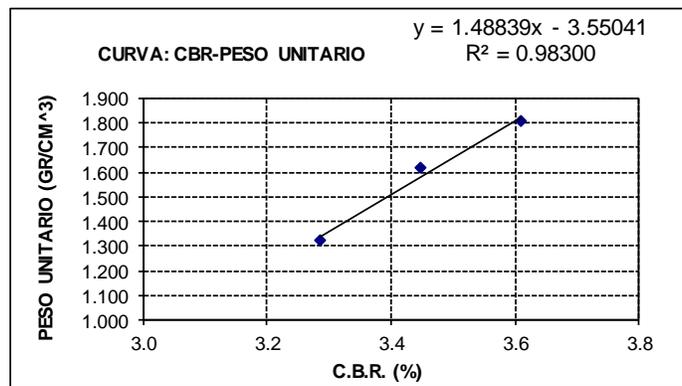
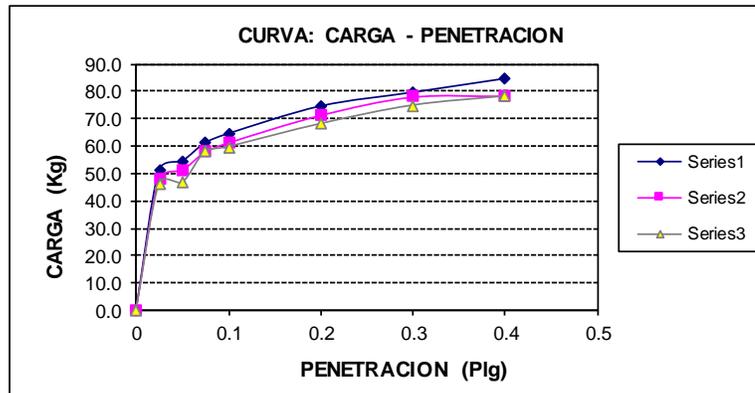
C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
3.61	1.81
3.45	1.62
3.29	1.32

PENETRACION		CARGA NORMA	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3				
Pulg.	mm		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0.00	0.00		0.00	0.00				0.00	0.00			0.00	0.00		
0.025	0.63		51.22	2.61				47.87	2.44			46.19	2.35		
0.05	1.27		54.58	2.78				51.22	2.61			46.53	2.37		
0.075	1.9		61.29	3.12				57.94	2.95			57.94	2.95		
0.1	2.54	70.31	64.65	3.29		4.68	61.29	3.12		4.44	59.61	3.04		4.32	
0.2	5.08	105.4	74.72	3.81		3.61	71.36	3.63		3.45	68.00	3.46		3.29	
0.3	7.62		79.75	4.06			78.07	3.98			74.72	3.81			
0.4	10.16		84.78	4.32			78.41	3.99			78.07	3.98			
0.5	12.7		91.50	4.73			84.78	4.38			81.43	4.21			



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)



CBR 100% D.máx	3 %
CBR 95% D.Máx.	3 %

Observación: Después de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
 LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
 RESP. LABORATORIO DE SUELOS



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAE SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)

Proyecto de Investigación: "Estudio de la influencia de saturación en el proceso de compactación"	Fecha: Abril / 2018
Procedencia: El Valle	Laboratorista: Vivian Bravo Tejerina

COMPACTACION T-180

CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO

Nº capas	5		5		5				
Nº golpes por capa	56		25		12				
CONDICION DE MUESTRA	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M	Antes de mojarse	D. de M			
Peso muestra húm.+molde	12105	12345	10380	10570	11185	11440			
Peso Molde	6805	6805	6260	6260	7220	7220			
Peso muestra húmeda	5300	5540	4120	4310	3965	4220			
Volumen de la muestra	2049.89	2049.9	2077.31	2077.31	2113.13	2113.13			
Peso Unit. Muestra Húm.	2.586	2.703	1.983	2.075	1.876	1.997			
MUESTRA DE HUMEDAD	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.
Tara Nº	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Peso muestra húm + tara	135.80	118.00	136.60	130.20	137.60	104.20	114.90	151.60	129.60
Peso muestra seca + tara	109.00	90.90	110.30	103.70	105.50	84.70	91.10	117.30	102.70
Peso del agua	26.80	27.10	26.30	26.50	32.10	19.50	23.80	34.30	26.90
Peso de tara	18.20	19.50	20.60	17.80	19.80	20.00	18.20	19.80	19.60
Peso de la muestra seca	90.80	71.4	89.7	85.9	85.7	64.7	72.9	97.5	83.1
Contenido humedad %	29.52	37.96	29.32	30.85	37.46	30.14	32.65	35.18	32.37
Promedio cont. Humedad	33.74	29.32	29.32	34.15	30.14	30.14	33.91	33.91	32.37
Peso Unit.muestra seca	1.93	2.09	1.48	1.59	1.40	1.40	1.40	1.40	1.51

Hum. Opt. %	Peso Unit. gr/cm3
26.53	1.47

EXPANSION

FECHA	HORA	TIEMPO EN DIAS	MOLDE Nº 1			MOLDE Nº 2			MOLDE Nº 3		
			LECT. EXTENS	EXPANSION CM.	%	LECT. EXTENS	EXPANSION CM.	%	LECT. EXTENS	EXPANSION CM.	%
			30-abr	6:00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02-may	6:00	3	7.70	0.77	6.59	8.80	0.88	7.53	11.50	1.15	9.85
03-may	6:00	4	11.70	1.17	10.02	12.10	1.21	10.36	12.40	1.24	10.62

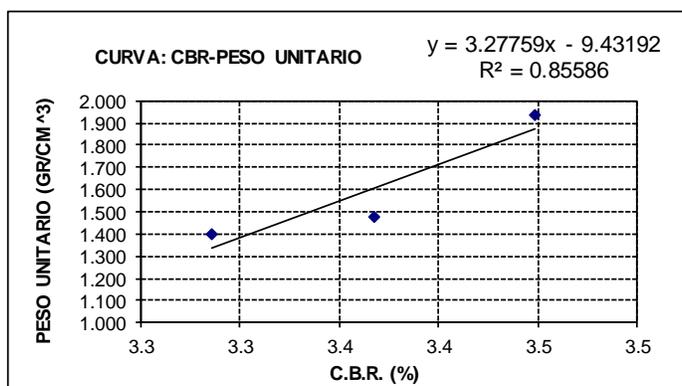
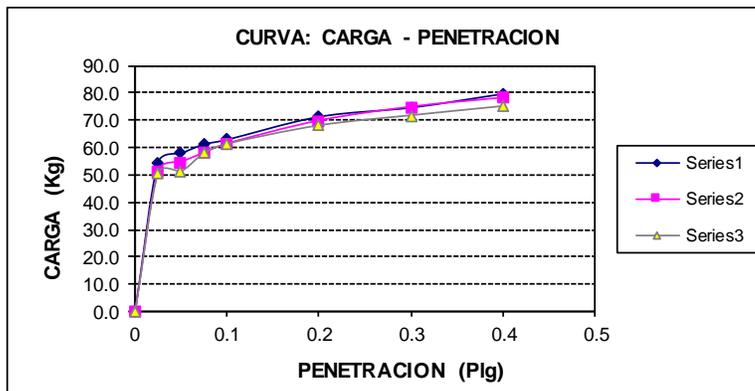
C.B.R. %	Peso Unit. gr/cm3
3.45	1.93
3.37	1.48
3.29	1.40

PENETRACION		CARGA NORMA	MOLDE Nº 1				MOLDE Nº 2				MOLDE Nº 3				
Pulg.	mm		Kg	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%	Kg	Kg/cm2	Kg	%
0.00	0.00		0.00	0.00				0.00	0.00			0.00	0.00		
0.025	0.63		54.58	2.78				51.22	2.61			50.55	2.57		
0.05	1.27		57.94	2.95				54.58	2.78			51.22	2.61		
0.075	1.9		61.29	3.12				57.94	2.95			57.94	2.95		
0.1	2.54	70.31	64.65	3.29		4.68	62.97	3.21		4.56	61.29	3.12		4.44	
0.2	5.08	105.4	71.36	3.63		3.45	69.68	3.55		3.37	68.00	3.46		3.29	
0.3	7.62		76.39	3.89			74.72	3.81			71.70	3.65			
0.4	10.16		79.75	4.06			78.07	3.98			75.05	3.82			
0.5	12.7		0.00	0.00			0.00	0.00			0.00	0.00			



UNIVERSIDAD AUTONOMA "JUAN MISAEL SARACHO"
 FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGIA
 PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
 LABORATORIO DE SUELOS

CALIFORNIA BEARING RATIO (CBR)



CBR 100% D.máx	3 %
CBR 95% D.Máx.	3 %

Observación: Después de ser sometido a ciclos de saturación y secado

Univ. Vivian Bravo Tejerina
 LABORATORISTA

Ing. José Ricardo Arce A.
 RESP. LABORATORIO DE SUELOS

- Material antes de ser sometido a ciclos de saturación y secado.

Para trazar la curva de carga-penetración se calculó las cargas con la fórmula correspondiente al anillo para material fino, la ecuación fue proporcionada por los auxiliares de laboratorio. Así se obtuvo para la humedad y densidad de T-99 de 30.59% para 1.50 kg/cm³, 30.89% para 1.47 kg/cm³ y 31.77% para 1.42 kg/cm³. Y para el T-180 de 33.73 % para 1.51 kg/cm³, 35.03 % para 1.38 kg/cm³ y 36.97% para 1.23 kg/cm³. La humedad al centro de la probeta es menor debido tal vez a la baja permeabilidad de este tipo de suelo.

Tabla N° 3.5. CBR del suelo para T-99 y T-180.

	T-99	T-180
CBR 100% D.Máx.	4	3
CBR 95% D.Máx.	3	3

Fuente: Elaboración propia.

La Razón de Soporte - Densidad Seca para cada uno es para T-99 al 100% resulta mayor que la del T-180, pero al 95% resultan las mismas. El CBR aumenta con mayor uso de energía pues con mayor energía se tiene mayor densidad seca por ello se requiere de menor cantidad de agua, pero después del periodo de inmersión esto se me afectado claramente pues el CBR del T-99 obtuvo lecturas más elevadas a pesar de tener mayor cantidad de agua, esto podría ser a como se mencionan Rico A. y Orozco J.M. en los suelos CH se tiene este tipo de comportamiento al ser sumergidos, no se puede distinguir una gran diferencia a pesar de usar. Se diferente energía en estas prueba.

Tabla N° 3.6. Expansión del suelo para T-99 y T-180.

	MOLDE 1 (56 golpes)		MOLDE 2 (25 golpes)		MOLDE 3 (12 golpes)	
	EXP (cm)	EXP (%)	EXP (cm)	EXP (%)	EXP (cm)	EXP (%)
T-99	0.64	5.49	0.66	5.62	0.67	5.73
T-180	1.10	9.43	1.12	9.61	1.15	9.80

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a la expansión del material como puede apreciarse en la tabla, la expansión para el T-99 se encuentra entre 0.64 y 0.67 cm, mientras que para el T-180 entre 1.10

y 1.15 cm. Puede observarse como el hinchamiento es mayor con el método Proctor a pesar de usar mayor energía y mayor densidad que el método Estándar.

Las lecturas de CBR para el T-99 fueron mayores que para el T-180 aunque tiene menor densidad seca y mayor humedad, pero en cuanto a su hinchamiento este es menor pudiendo ser esta la razón de sus valores superiores, recalcando que son ligeramente más elevados. Antes ya se señaló como un suelo compactado más enérgicamente es más susceptible a la acción del agua de ahí que el hinchamiento mayor y mayores lecturas en el T-99 que usa menor energía, pero en resultados de CBR menores presentarían un comportamiento esperado.

- Material después de ser sometido a ciclos de saturación y secado.

Una vez concluidos los ciclos se vuelve a moler el suelo de las probetas resultantes para realizar nuevamente el ensayo, esta vez tomando como densidad y humedad optima los valores resultantes de densidad y humedad de equilibrio de los ciclos de saturación y secado. Los valores correspondientes fueron: para el T-99 Dseca 1.465kg/cm³ y Heq 26.59% y para el T-180 Dseca 1.468kg/cm³ y Heq 26.39%.

Obteniéndose así para la humedad y densidad de T-99 de 32.95% para 1.81 kg/cm³, 33.78% para 1.62 kg/cm³ y 34.10% para 1.32 kg/cm³. Y para el T-180 de 33.74 % para 1.93 kg/cm³, 34.15 % para 1.48 kg/cm³ y 33.91% para 1.40 kg/cm³. La humedad al centro de la probeta es menor debido tal vez a la baja permeabilidad de este tipo de suelo.

Tabla N° 3.7. CBR del suelo para T-99 y T-180.

	T-99	T-180
CBR 100% D.Máx.	3	3
CBR 95% D.Máx.	3	3

Fuente: Elaboración propia.

La Razón de Soporte - Densidad Seca para cada uno es para T-99 de 20% para 1.58 kg/cm³. Y para el T-180 de 12% para 1.62 kg/cm³.

Tabla N° 3.8. Expansión del suelo para T-99 y T-180.

	MOLDE 1 (56 golpes)		MOLDE 2 (25 golpes)		MOLDE 3 (12 golpes)	
	EXP (cm)	EXP (%)	EXP (cm)	EXP (%)	EXP (cm)	EXP (%)
T-99	0.80	6.85	0.85	7.28	0.81	6.93
T-180	1.17	10.02	1.21	10.36	1.24	10.62

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la expansión como se puede observar en la tabla, esta para el T-99 se encuentra entre 0.80 y 0.85 cm, mientras que para el T-180 entre 1.17 y 1.24 cm. Puede apreciarse como el hinchamiento es mayor con el método Proctor a pesar de usar mayor energía y mayor densidad que el método Estándar, como paso en el anteriores ensayos.

Comparando con el ensayo anterior se puede observar como la expansión en ambos casos (T-99 y T-180) ha subido, cabe destacar que pese a tener contenidos de humedad similares la expansión para el T-180 continua siendo mayor, esto debido al proceso que pasaron las partículas durante los ciclos al ser saturadas y secadas, como resultado las partículas del T-99 parecen resultar en una condición más estable, probablemente porque desde el inicio este tubo mayor cantidad de agua provocando menores expansiones, es decir siendo estas más constantes. Por otro lado se observa en las lecturas, con los nuevos valores de humedad y densidad, no hay variación significativa, al final se mantienen. Aquí nuevamente pasa lo mismo, antes ya se habló sobre la susceptibilidad de las arcillas al agua, pero también del comportamiento de suelo CH que tras periodos de inmersión sus CBRs son similares para cualquier las dos energías de compactación, esto se puede ver en el primer ensayo, antes de los ciclos, las lecturas para las penetraciones son mayores para el Estándar, pero los valores resultantes para el ambos son parejos, y para los ensayos al final de los ciclos de saturación y secado, las lecturas de cargas son mayores, pero en los puntos de interés (0.1 y 0.2 pulg.) su aumento no es muy elevado, resultando en CBR casi igual o con una ligera disminución respecto de los calculados en el suelos antes de ser sometido a los ciclos.

3.11. Determinación de la densidad de equilibrio (ciclos de saturación y secado)

La densidad de equilibrio es el peso unitario seco al que llega el material en condiciones de servicio normales, o aumento de volumen debido a la succión de agua. Los ciclos estacionales que comprenden las épocas de calor y de lluvia, son los que afectan a las propiedades del suelo, con ciclos de saturación (periodo de lluvias) y secado (periodo cálido). El equipo usado fue:

- Moldes; metálicos, cilíndricos, con un diámetro interno de 152.4 ± 0.7 mm y una altura de 177.8 ± 0.5 mm. Deben tener un collar de extensión metálico de 50,8 mm de altura y una placa base metálica de 9,5mm de espesor con perforaciones de un diámetro menor o igual que 1,6 mm.
- Disco Espaciador; metálico, cilíndrico, con un diámetro de 150.8 ± 0.8 mm y una altura de 61.4 ± 0.2 mm, pisón; 2.5kg para el método estándar y 4.5kg para el método modificado y cargas; para cada molde de 2.27 ± 0.05 Kg. cada una.
- Horno, balanza, recipientes, probetas graduadas, espátulas, reglas, brochas, discos de papel filtro, cronómetro, etc.

Procedimiento en laboratorio

Los moldes a utilizar serán los usados de CBR por los orificios que tienen para realizar el periodo de saturación, a cada se le tomo las medidas tanto del diámetro, como altura y peso para tener su volumen y hacer cálculos posteriores, es decir la saturación y secado (peso), como también realizar el cálculo de la energía usada (volumen).

Se realiza probetas compactadas en moldes de CBR, como el procediendo habitual para ensayo de compactación, para ello se prepara material que ha sido previamente molido, tamizado por el tamiz N°4 y secado al horno, con las humedades óptimas para las densidades máximas correspondientes de cada energía, es decir para el método Estándar una humedad del 21.70% y Proctor humedad de 19.68%. Dejando reposar la muestra durante un periodo de 24 más o menos para que las fases de suelo se mezclen adecuadamente.

De los moldes compactados se toma los pesos iniciales, realizar 4 muestras de cada método (estándar y modificado), tomando sus pesos respectivos al inicio que corresponderán al primer peso del primer ciclo.

Figura N° 3.10. Compactación de material.



Fuente: Elaboración propia.

Se colocan los vástagos con las pesas correspondientes a unos 4.5 kg más o menos, los cuales simularan al igual que en el ensayo de CBR al pavimento, se toman las lecturas con el extensómetro a cada una de las probetas, este es la lectura inicial o cero para medir la expansión durante el ciclo de saturación.

Después someter los moldes a saturación, los cuales deberán de medirse su expansión usando el extensómetro, diariamente en lo posible, hasta que no muestre grandes variaciones, dando lugar al fin del ciclo de saturación.

Sacar del agua los moldes después de concluido este periodo y para ser colocados en lugar donde llegue el sol, un secado al sol, como es imposible lograr un secado total de los moldes, se recurrió a ponerlo en el horno eléctrico, después de que este se seicara por tiempo naturalmente al sol, para acelerar este proceso y lograr el cometido.

Durante el proceso de secado se pesó regularmente la muestra de material en el molde, para verificar su secado y disponer el momento apropiado para llevar a cabo el secado en horno, y continuar tomando el peso de las probetas hasta que este sea constante, aquí se marcará el final del ciclo de secado.

Finalizado el ciclo de secado se retira el vástago y las pesas, para anotar los nuevos diámetros y nuevas alturas que tendrá el material compactado dentro del molde, estos servirán para el cálculo de la densidad seca en cada ciclo. De esta manera se concluye el primer ciclo de saturación y secado.

Luego de tomados los datos necesarios de cada molde, se coloca el vástago y pesas correspondientes para tomar nuevamente la lectura inicial con el extensómetro, esta corresponderá a la primera lectura del segundo ciclo de saturación, luego colocar nuevamente las probetas dentro de la piscina, para su saturación. Es así como se iniciará el segundo ciclo.

Le procedimiento realizado será el mismo para ciclo de saturación y secado, por lo tanto deberá repetirse por 4 ciclos más, inmodicadamente después de concluido cada uno. Con los datos tomados a lo largo de todos los ciclos calcular la evolución de la densidad y densidad final que obtiene del suelo compactado. La densidad fue calculada como la resultante del final de los ciclos de saturación y secado. Obtenida de la relación masa del suelo seco sobre el volumen del mismo.

Tabla N° 3.9. Densidades del suelo en moldes de CBR.

MOLDE	P. ESTANDAR		P. MODIFICADO	
	D _{máx} (gr/cm ³)	H opt (%)	D _{máx} (gr/cm ³)	H opt (%)
1	1.58	21.80	1.63	19.67
2	1.60	21.80	1.65	19.67
3	1.56	21.66	1.64	19.70
4	1.58	21.66	1.65	19.70
5	1.58	21.66	1.64	19.70

Fuente: Elaboración propia.

Como se aprecia las humedades corresponden a las óptimas, dando lugar a las densidades las que también se encuentran cercanas o iguales a las calculadas en el ensayo de compactación de cada método. Por lo tanto se puede trabajar con dichas probetas y pasar al siguiente paso que sería la saturación del suelo es decir el primer ciclo de saturación.

- RESUMEN DE CICLOS DE SATURACIÓN Y EXPANSIÓN

Tabla N° 3.10. Primer ciclo de saturación T-99.

PRIMER CICLO							
T-99 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	25/09/2017	Lunes	18:00:00	0	0	0
	4to día	28/09/2017	Jueves	12:00:00	66	4.24	3.60
	Fin	17/10/2017	Martes	9:00:00	519	9.63	8.18
2	Inicio	00/01/1900	Lunes	18:00:00	0	0	0
	4to día	28/11/2017	Jueves	12:00:00	66	4.22	3.63
	Fin	06/12/2017	Martes	9:00:00	519	9.52	8.20
3	Inicio	00/01/1900	Lunes	18:00:00	0	0	0
	4to día	22/02/2018	Jueves	12:00:00	66	4.23	3.62
	Fin	27/02/2018	Martes	9:00:00	519	9.55	8.16
4	Inicio	00/01/1900	Lunes	18:00:00	0	0	0
	4to día	16/03/2018	Jueves	12:00:00	66	4.26	3.63
	Fin	20/03/2018	Martes	9:00:00	519	9.57	8.16
5	Inicio	00/01/1900	Lunes	18:00:00	0	0	0
	4to día	03/04/2018	Jueves	12:00:00	66	5.04	4.30
	Fin	05/04/2018	Martes	9:00:00	519	9.55	8.14

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.11. Segundo ciclo de saturación T-99.

SEGUNDO CICLO							
T-99 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	06/12/2017	Miércoles	17:00:00	190	10.30	8.75
2	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	06/12/2017	Miércoles	17:00:00	190	10.18	8.76
3	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	06/12/2017	Miércoles	17:00:00	190	10.27	8.78
4	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	06/12/2017	Miércoles	17:00:00	190	10.25	8.74
5	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	06/12/2017	Miércoles	17:00:00	190	10.23	8.72

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.12. Tercer ciclo de saturación T-99.

TERCER CICLO							
T-99 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	9:00:00	112	10.24	8.18
2	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	9:00:00	112	10.3	8.17
3	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	9:00:00	112	10.16	8.19
4	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	9:00:00	112	10.24	8.17
5	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	9:00:00	112	10.23	8.16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.13. Cuarto ciclo de saturación T-99.

CUARTO CICLO							
T-99 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	16/03/2018	Viernes	15:00:00	0	0	0
	Fin	20/03/2018	Martes	8:00:00	92	10.15	8.02
2	Inicio	16/03/2018	Viernes	15:00:00	0	0	0
	Fin	20/03/2018	Martes	8:00:00	92	10	8.05
3	Inicio	16/03/2018	Viernes	15:00:00	0	0	0
	Fin	20/03/2018	Martes	8:00:00	92	10.23	8.13
4	Inicio	16/03/2018	Viernes	15:00:00	0	0	0
	Fin	20/03/2018	Martes	8:00:00	92	10.15	8.05
5	Inicio	16/03/2018	Viernes	15:00:00	0	0	0
	Fin	20/03/2018	Martes	8:00:00	92	10.15	8.05

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.13. Quinto ciclo de saturación T-99.

QUINTO CICLO							
T-99 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	03/04/2018	Lunes	11:00:00	0	0	0
	Fin	28/09/2017	Jueves	12:00:00	55	10.2	8.04
2	Inicio	03/04/2018	Lunes	11:00:00	0	0	0
	Fin	28/09/2017	Jueves	12:00:00	55	10.05	7.98
3	Inicio	03/04/2018	Lunes	11:00:00	0	0	0
	Fin	28/09/2017	Jueves	12:00:00	55	10.2	8.04
4	Inicio	03/04/2018	Lunes	11:00:00	0	0	0
	Fin	28/09/2017	Jueves	12:00:00	55	10.19	8.04
5	Inicio	03/04/2018	Lunes	11:00:00	0	0	0
	Fin	28/09/2017	Jueves	12:00:00	55	10.18	8.02

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.14. Primer ciclo de saturación T-180.

PRIMER CICLO							
T-180 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	21/09/2017	Jueves	18:00:00	0	0	0
	4to día	26/09/2021	Martes	9:00:00	87	10.98	9.38
	Fin	17/10/2017	Martes	10:00:00	594	12.74	10.89
2	Inicio	21/09/2017	Jueves	18:00:00	0	0	0
	4to día	26/09/2021	Martes	9:00:00	87	10.98	9.44
	Fin	17/10/2017	Martes	10:00:00	594	12.66	10.88
3	Inicio	21/09/2017	Jueves	18:00:00	0	10.91	9.34
	4to día	26/09/2021	Martes	9:00:00	87	12.71	10.88
	Fin	17/10/2017	Martes	10:00:00	594	0	0.00
4	Inicio	21/09/2017	Jueves	18:00:00	0	10.95	9.33
	4to día	26/09/2021	Martes	9:00:00	87	12.77	10.88
	Fin	17/10/2017	Martes	10:00:00	594	0	0.00
5	Inicio	21/09/2017	Jueves	18:00:00	0	0	0
	4to día	26/09/2021	Martes	9:00:00	87	10.94	9.32
	Fin	17/10/2017	Martes	10:00:00	594	12.78	10.89

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.15. Segundo ciclo de saturación T-180.

SEGUNDO CICLO							
T-180 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	11/12/2017	Lunes	10:00:00	303	13.45	11.56
2	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	11/12/2017	Lunes	10:00:00	303	13.45	11.56
3	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	11/12/2017	Lunes	10:00:00	303	13.53	11.58
4	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	11/12/2017	Lunes	10:00:00	303	13.58	11.57
5	Inicio	28/11/2017	Martes	18:00:00	0	0	0
	Fin	11/12/2017	Lunes	10:00:00	303	13.56	11.56

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.16. Tercer ciclo de saturación T-180.

TERCER CICLO							
T-180 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	18:00:00	121	12.52	10.12
2	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	18:00:00	121	12.52	10.14
3	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	18:00:00	121	12.49	10.08
4	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	18:00:00	121	12.54	10.17
5	Inicio	22/02/2018	Jueves	18:00:00	0	0	0
	Fin	27/02/2018	Martes	18:00:00	121	12.54	10.17

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.17. Cuarto ciclo de saturación T-180.

CUARTO CICLO							
T-180 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	19/03/2018	Lunes	8:00:00	0	0	0
	Fin	23/03/2018	Viernes	9:00:00	98	12.4	9.82
2	Inicio	19/03/2018	Lunes	8:00:00	0	0	0
	Fin	23/03/2018	Viernes	9:00:00	98	12.38	10.01
3	Inicio	19/03/2018	Lunes	8:00:00	0	0	0
	Fin	23/03/2018	Viernes	9:00:00	98	12.35	9.76
4	Inicio	19/03/2018	Lunes	8:00:00	0	0	0
	Fin	23/03/2018	Viernes	9:00:00	98	12.4	9.86
5	Inicio	19/03/2018	Lunes	8:00:00	0	0	0
	Fin	23/03/2018	Viernes	9:00:00	98	12.42	9.87

Fuente: Elaboración propia.

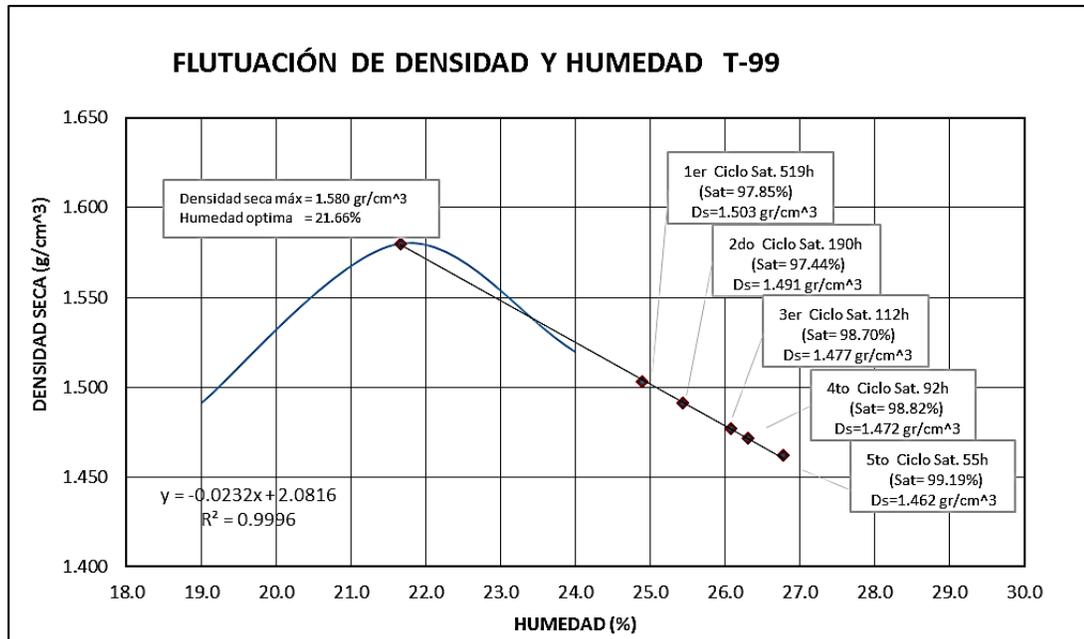
Tabla N° 3.17. Quinto ciclo de saturación T-180.

QUINTO CICLO							
T-180 MUESTRA	DETALLE	FECHA	DÍA	HORA	TIEMPO ACUM. (hr)	LECTURA EXT.	EXPANSIÓN (%)
1	Inicio	06/04/2018	Viernes	9:00:00	0	0	0
	Fin	26/09/2021	Martes	9:00:00	99	12.28	9.65
2	Inicio	06/04/2018	Viernes	9:00:00	0	0	0
	Fin	26/09/2021	Martes	9:00:00	99	12.29	9.76
3	Inicio	06/04/2018	Viernes	9:00:00	0	0	0
	Fin	26/09/2021	Martes	9:00:00	99	12.28	9.65
4	Inicio	06/04/2018	Viernes	9:00:00	0	0	0
	Fin	26/09/2021	Martes	9:00:00	99	12.30	9.69
5	Inicio	06/04/2018	Viernes	9:00:00	0	0	0
	Fin	26/09/2021	Martes	9:00:00	99	12.31	9.69

Fuente: Elaboración propia.

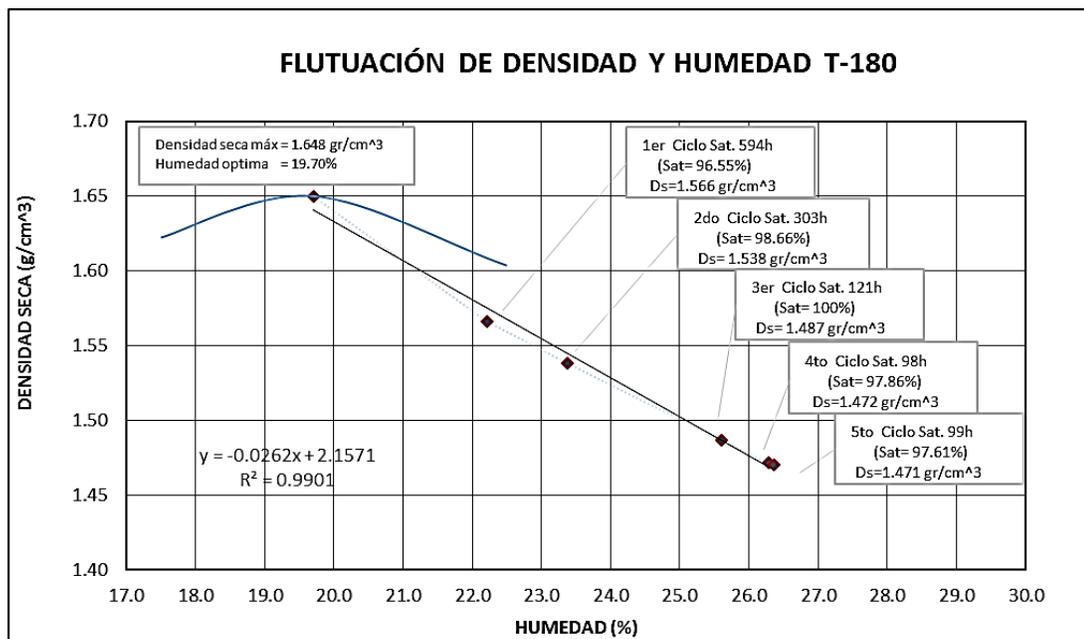
- FLUCTUACIÓN DE LA DENSIDAD Y HUMEDAD DURANTE LOS CICLOS DE SATURACIÓN Y SECADO

Figura N° 3.11. Fluctuación de densidad T-99.



Fuente: Elaboración propia.

Figura N° 3.12. Fluctuación de densidad T-180.



Fuente: Elaboración propia.

- RESUMEN DE LOS CICLOS DE SATURACIÓN Y SECADO

Tabla N° 3.18. Primer Ciclo T-99.

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.58	1.57	1.56	1.58	1.58	-	
Humedad ópt. (%)	21.80	21.80	21.66	21.66	21.66	-	
Humedad de saturación (%)	34.22	34.40	34.44	34.20	34.17	34.29	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.52	1.52	1.53	1.53	1.53	1.53	
Relación de vacíos e	0.83	0.84	0.82	0.82	0.83	0.83	
Expansión (%)	8.18	8.10	8.14	8.16	8.13	8.14	
Incremento de altura (Δh =cm)	0.96	0.95	0.96	0.96	0.96	0.96	
Altura muestra sat. (cm)	12.73	12.70	12.69	97.96	12.71	29.76	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.41	1.41	1.42	0.18	1.41	1.17	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	114.91	114.17	119.16	114.55	115.08	115.57
	Con Δh	97.35	98.25	96.65	97.96	97.85	97.61
Diametro de muestra seca (cm)	14.9	14.90	14.9	14.9	14.9	14.90	
Altura de muestra seca (cm)	12.37	12.35	12.38	12.40	12.37	12.37	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.502	1.504	1.503	1.500	1.503	1.50	
Humedad de equilibrio (%)	24.96	25.00	24.49	25.33	24.90	24.93	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.19. Segundo Ciclo T-99.

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.58	1.57	1.56	1.58	1.58	-	
Humedad ópt. (%)	21.80	21.80	21.66	21.66	21.66	-	
Humedad de saturación (%)	35.40	35.32	35.32	35.49	35.54	35.41	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	1.50	
Relación de vacíos e	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	
Expansión (%)	8.33	8.24	8.30	8.27	8.27	8.28	
Incremento de altura (Δh =cm)	1.03	1.02	1.03	1.03	1.02	1.02	
Altura muestra sat. (cm)	13.40	13.37	13.41	13.43	13.39	13.40	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.38	1.39	1.39	1.38	1.39	1.38	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	114.45	114.75	111.60	111.66	114.84	113.46
	Con Δh	97.00	97.37	96.60	97.58	97.44	97.20
Diametro de muestra seca (cm)	14.84	14.83	14.84	14.84	14.84	14.84	
Altura de muestra seca (cm)	12.52	12.55	12.55	12.54	12.52	12.54	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.491	1.490	1.493	1.493	1.491	1.49	
Humedad de equilibrio (%)	25.44	25.61	25.24	25.36	25.44	25.42	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.20. Tercer Ciclo T-99.

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.58	1.57	1.56	1.58	1.58	-	
Humedad ópt. (%)	21.80	21.80	21.66	21.66	21.66	-	
Humedad de saturación (%)	36.58	36.55	36.46	36.06	36.45	36.42	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.49	1.48	1.49	1.49	1.49	1.49	
Relación de vacíos e	0.88	0.88	0.87	0.87	0.88	0.87	
Expansión (%)	8.18	8.21	8.10	8.16	8.17	8.16	
Incremento de altura (Δh =cm)	1.02	1.03	1.02	1.02	1.02	1.02	
Altura muestra sat. (cm)	13.54	13.58	13.57	13.57	13.54	13.56	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.37	1.37	1.37	1.38	1.37	1.37	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	116.25	116.04	114.10	112.07	115.97	114.88
	Con Δh	98.93	98.71	98.20	96.20	98.70	98.15
Diametro de muestra seca (cm)	14.80	14.81	14.82	14.84	14.80	14.81	
Altura de muestra seca (cm)	12.65	12.65	12.66	12.65	12.66	12.65	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.478	1.477	1.477	1.477	1.477	1.48	
Humedad de equilibrio (%)	26.04	26.23	25.98	26.09	26.08	26.09	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.21. Cuarto Ciclo T-99.

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.58	1.57	1.56	1.58	1.58	-	
Humedad ópt. (%)	21.80	21.80	21.66	21.66	21.66	-	
Humedad de saturación (%)	37.04	37.01	37.05	37.02	37.03	37.03	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.47	1.47	1.48	1.47	1.47	1.47	
Relación de vacíos e	0.89	0.89	0.88	0.89	0.89	0.89	
Expansión (%)	8.03	7.91	8.08	8.02	8.04	8.01	
Incremento de altura (Δh =cm)	1.02	1.00	1.02	1.02	1.02	1.01	
Altura muestra sat. (cm)	13.66	13.65	13.68	13.67	13.68	13.67	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	115.88	115.59	113.88	112.43	115.66	114.69
	Con Δh	99.02	99.00	99.20	98.92	98.82	98.99
Diametro de muestra seca (cm)	14.80	14.80	14.81	14.81	14.80	14.80	
Altura de muestra seca (cm)	12.68	12.67	12.69	12.70	12.67	12.68	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.471	1.473	1.472	1.473	1.472	1.47	
Humedad de equilibrio (%)	26.37	26.42	26.30	26.28	26.31	26.34	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.22. Quinto Ciclo T-99

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.58	1.57	1.56	1.58	1.58	-	
Humedad ópt. (%)	21.80	21.80	21.66	21.66	21.66	-	
Humedad de saturación (%)	37.29	37.20	37.29	37.18	37.33	37.26	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.47	1.47	1.48	1.47	1.47	1.47	
Relación de vacíos e	0.90	0.89	0.89	0.89	0.90	0.89	
Expansión (%)	8.05	7.93	8.04	8.02	8.05	8.02	
Incremento de altura (Δh =cm)	1.02	1.01	1.02	1.02	1.02	1.02	
Altura muestra sat. (cm)	13.70	13.68	13.71	13.72	13.69	13.70	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	1.36	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	115.68	115.90	111.67	112.80	116.09	114.43
	Con Δh	98.87	99.23	97.50	97.24	99.19	98.41
Diametro de muestra seca (cm)	14.80	14.80	14.81	14.82	14.80	14.81	
Altura de muestra seca (cm)	12.74	12.75	12.74	12.75	12.74	12.74	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.461	1.462	1.460	1.464	1.462	1.46	
Humedad de equilibrio (%)	26.82	26.91	26.86	26.68	26.77	26.81	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.24. Primer Ciclo T-180.

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.63	1.65	1.64	1.65	1.64	-	
Humedad ópt. (%)	19.67	19.67	19.70	19.70	19.70	-	
Humedad de saturación (%)	32.98	32.96	33.03	33.09	32.82	33.02	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.59	1.60	1.59	1.58	1.59	1.59	
Relación de vacíos e	0.75	0.74	0.76	0.76	0.76	0.75	
Expansión (%)	10.89	10.85	10.88	10.88	10.92	10.87	
Incremento de altura (Δh =cm)	1.27	1.27	1.27	1.28	1.28	1.27	
Altura muestra sat. (cm)	12.97	12.94	12.95	13.01	12.98	12.97	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.44	1.44	1.43	1.43	1.43	1.44	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	121.89	123.33	121.45	121.02	120.92	121.92
	Con Δh	98.23	97.34	96.98	97.65	96.55	97.55
Diametro de muestra seca (cm)	15.1	15.10	15.1	15.07	15.1	15.09	
Altura de muestra seca (cm)	12.10	12.07	12.11	12.15	12.10	12.11	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.564	1.565	1.563	1.562	1.566	1.56	
Humedad de equilibrio (%)	22.24	22.48	22.70	22.39	22.21	22.45	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.25. Segundo Ciclo T-180.

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.63	1.65	1.64	1.65	1.64	-	
Humedad ópt. (%)	19.67	19.67	19.70	19.70	19.70	-	
Humedad de saturación (%)	35.31	35.30	35.53	35.39	35.20	35.38	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.55	1.56	1.55	1.55	1.55	1.55	
Relación de vacíos e	0.80	0.79	0.80	0.80	0.79	0.80	
Expansión (%)	11.19	11.14	11.17	11.18	11.21	11.17	
Incremento de altura (Δh =cm)	1.35	1.35	1.35	1.36	1.36	1.35	
Altura muestra sat. (cm)	13.45	13.42	13.47	13.51	13.46	13.46	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.40	1.40	1.39	1.39	1.40	1.40	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	123.55	124.28	123.92	123.32	123.65	123.77
	Con Δh	98.65	99.25	98.02	98.54	98.66	98.61
Diametro de muestra seca (cm)	15	15.00	15	15	15.00	15.00	
Altura de muestra seca (cm)	12.37	12.38	12.38	12.36	12.39	12.37	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.538	1.537	1.536	1.537	1.538	1.54	
Humedad de equilibrio (%)	23.34	23.65	23.46	23.43	23.37	23.47	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.26. Tercero Ciclo T-180.

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.63	1.65	1.64	1.65	1.64	-	
Humedad ópt. (%)	19.67	19.67	19.70	19.70	19.70	-	
Humedad de saturación (%)	37.14	37.11	37.47	37.14	36.92	37.22	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	1.52	
Relación de vacíos e	0.84	0.84	0.84	0.84	0.83	0.84	
Expansión (%)	10.12	10.11	10.09	10.15	10.10	10.12	
Incremento de altura (Δh =cm)	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	
Altura muestra sat. (cm)	13.62	13.64	13.63	13.61	13.64	13.63	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	1.38	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	123.93	123.76	124.50	123.85	123.46	124.01
	Con Δh	98.38	99.27	98.96	100.28	100.01	99.22
Diametro de muestra seca (cm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	
Altura de muestra seca (cm)	12.63	12.65	12.64	12.62	12.67	12.64	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.488	1.486	1.485	1.487	1.487	1.49	
Humedad de equilibrio (%)	25.54	25.59	25.71	25.60	25.60	25.61	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.27. Cuarto Ciclo T-180.

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.63	1.65	1.64	1.65	1.64	-	
Humedad ópt. (%)	19.67	19.67	19.67	19.70	19.70	-	
Humedad de saturación (%)	37.56	37.60	37.81	37.69	37.38	37.67	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	
Relación de vacíos e	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	0.88	
Expansión (%)	9.82	9.79	9.77	9.83	9.83	9.80	
Incremento de altura (Δh =cm)	1.24	1.24	1.24	1.24	1.25	1.24	
Altura muestra sat. (cm)	13.87	13.89	13.88	13.86	13.92	13.87	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	1.35	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	119.18	119.05	119.64	119.33	118.41	119.30
	Con Δh	98.50	98.47	98.99	98.63	97.86	98.65
Diametro de muestra seca (cm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	
Altura de muestra seca (cm)	12.73	12.74	12.73	12.72	12.76	12.73	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.472	1.472	1.471	1.471	1.472	1.47	
Humedad de equilibrio (%)	26.24	26.27	26.31	26.33	26.29	26.29	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla N° 3.28. Quinto Ciclo T-180.

MOLDE	1	2	3	4	5	PROM.	
Densidad máx. (gr/cm ³)	1.63	1.65	1.64	1.65	1.64	-	
Humedad ópt. (%)	19.67	19.67	19.67	19.70	19.70	-	
Humedad de saturación (%)	38.41	38.17	38.35	39.42	39.43	38.58	
Peso especf. seco (gr/cm ³)	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	1.47	
Relación de vacíos e	0.90	0.90	0.90	0.91	0.91	0.90	
Expansión (%)	9.65	9.67	9.64	9.68	9.63	9.66	
Incremento de altura (Δh =cm)	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23	
Altura muestra sat. (cm)	13.96	13.94	13.96	13.93	13.95	13.95	
Peso especf. seco con Δh (gr/cm ³)	1.34	1.34	1.34	1.33	1.33	1.34	
Grado de saturación (%)	Sin Δh	119.43	118.41	118.97	117.56	117.30	118.59
	Con Δh	99.19	98.33	98.83	97.71	97.61	98.51
Diametro de muestra seca (cm)	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00	
Altura de muestra seca (cm)	12.73	12.71	12.73	12.72	12.74	12.73	
Densidad seca (gr/cm ³)	1.470	1.468	1.468	1.467	1.464	1.47	
Humedad de equilibrio (%)	26.35	26.42	26.39	26.89	27.03	26.39	

Fuente: Elaboración propia.

Interpretación de resultados durante los ciclos de saturación y secado

- **Primer ciclo de saturación y secado**

Del primer ciclo de saturación podemos apreciar que la expansión final es mayor que la presente en el CBR a los 4 días de inmersión, que se la presumía como la saturación completa, pero esta al comparar con las extensiones a lo largo de ciclo se aprecia que no es así, pues para el T-99 se tienen expansiones de 0.95cm a 0.96cm, y el CBR para 56 golpes 0.64cm, para 25 golpes 0.66cm y para 12 golpes 0.67cm. Mientras en el T-180 se tienen expansiones 1.27cm a 1.28cm y el CBR para 56 golpes 1.10 cm, para 25 golpes 1.12cm y para 12 golpes 1.15cm. Así se puede ver la importancia sobre un estudio más detallado de estos suelos. Para el método del T-180 no se puede establecer si la extensión a los 4 días en las probetas compactadas y saturadas es cercano al obtenido del CBR porque no se tuvo lectura de esta a los 4 días, en cambio en T-99 si es posible, de allí vemos que expansión no es similar a la del CBR, sino que es mayor la expansión que presenta el CBR a los 4 días de inmersión que la resultante en las probetas, esto tal vez sea el resultado de la energía usada pues para realizar el ensayo de CBR en el cual se usó el martillo normado, variando las variables que afectan a la energía, peso de martillo y altura de caída, ya que en las probetas se usó el martillo correspondiente a el método Estándar con altura y peso menor.

La humedad de saturación sigue en aumento desde el primer ciclo con 38.81% para el T-180 y 34.06 % para el T-99.

En cuanto al tiempo para llegar a la saturación este llevo unas 3 semanas y media para ser alcanzado para el método Estándar, mientras para el Modificado 4 semanas, además en cuanto a la expansión entre ambos el método Modificado obtuvo una expansión de 1.27cm siendo esta mayor que la del T-99 de 0.96cm, también se pudo observar que en los primeros días de saturación las probetas del método T-180 tuvieron una expansión más rápida que las del método Estándar.

La saturación del material al inicio es 114 % pero tomando en cuenta el cambio debió a la expansión se llega a una saturación real entre 100 a 95 % para el método Estándar. En cuanto al método Modificado al inicio la saturación es 123 % debió a la expansión

se llega a una saturación real entre 100 y 95%, esta diferencia se debe a que el contenido de agua para ambos métodos de diferente, para el T-180 al tener menor contenido de agua sus poros tienen mayor potencial de absorción, esto se afirma cuando se observa que la relación de vacíos para el método Modificado es 0.76 y el Estándar es de 0.84 es decir los vacíos estaban listos para ser llenados sin producir una expansión tan notoria.

En cuanto al secado del material no se tuvo grandes problemas al principio no se observa grandes variaciones en el peso en ninguna de las probetas, al pasar los días y dependiendo del calor y el clima fueron secando lentamente, para acelerar el proceso se lo seco por periodos en el horno.

Después del secado las alturas disminuyen y suelo presenta pequeñas contracciones. Del ciclo de saturación se tenía una altura promedio 12.66cm y al final del secado fue de 12.33 cm, con un diámetro de 14.89cm, existen variaciones entre las alturas esto se debe a que las densidades y humedades iniciales pese a ser similares a las óptimas no son las mismas, pudiendo afectar esto como aprecio en las alturas. Para el T-180 se observa el mismo comportamiento pero con alturas mayores por su expansión mayor, con 12.96cm aproximadamente y al final del secado su altura fue 12.09cm, con diámetro de 15.09cm es posible observar la diferencia entre sus expansiones y alturas, que es mayor para el T-180 nuevamente debido a su mayor cantidad de vacíos.

Para el cálculo de la densidad seca se usan los datos del suelo seco en el molde, para el T-99 tanto como el T-180 se observa como la densidad ha bajado, en el método Estándar la densidad inicial eran del orden 1.56gr/cm^3 a 1.58gr/cm^3 , pero al final del primer ciclo se encuentran en 1.48gr/cm^3 , 1.51gr/cm^3 , 1.50gr/cm^3 y 1.50gr/cm^3 en cada molde, se mantiene una constancia entre ellas pero se aprecia la disminución de estas, en el método Modificado la densidad inicial eran del orden 1.63gr/cm^3 a 1.65gr/cm^3 , pero al final del primer ciclo se encuentran en 1.564gr/cm^3 , en cada molde, se mantenido similares entre ellas pero mostrando la disminución respecto a su inicial.

En cuanto al contenido de humedad (Hop) para cada ciclo correspondiente a cada densidad final (Deq), el método Estándar subió de la inicial 24.70% a 24.83% y para

el Modificado creció de 19.71% a 22.48%, para ambos se nota como existe un aumento es decir se desplazaron a la derecha de la curva, moviendo el punto de máximo de la curva de compactación igualmente a la derecha.

Al final del primer ciclo podemos ver como disminuye la densidad y aumenta la humedad del suelo por ambos métodos, esto representa el comportamiento esperado, y por lo tanto la evolución de las probetas es la adecuada.

- **Segundo ciclo de saturación y secado**

Del segundo ciclo de saturación podemos apreciar que la expansión para el T-99 y el T-180 van en aumento respecto del ciclo anterior, al final tiene una expansión de 1.03cm es decir aumenta 0.08cm, mientras que para el T-180 la expansión final es de 1.35cm creciendo la probeta un 0.09cm mas. La humedad de saturación sigue en aumento desde el primer ciclo con 42.42% para el T-180 y 35.23 % para el T-99.

Se observa también que al poner las probetas a saturar, las del método Modificado presentan una expansión más rápida que las del otro método. En cuanto al tiempo para llegar a la saturación este llevo 1 semana y media para ser alcanzado para el método Estándar, mientras para el Modificado 2 semanas.

La saturación del material al inicio es 114.65 % pero tomando en cuenta el cambio debió a la expansión se llega a una saturación real de 98.58 % para el método Estándar. En cuanto al método Modificado al inicio la saturación es 125.11 % debió a la expansión se llega a una saturación real de 100.05 %, la relación de vacíos para el método Modificado es 0.81 menor que el Estándar el cual es de 0.86 estos han aumentado respecto del anterior ciclo.

Para el secado del material al principio no se observa grandes variaciones en el peso en ninguna de las probetas, al pasar los días y dependiendo del calor y el clima fueron secando lentamente, para acelerar el proceso se lo seco por periodos en el horno, para el método Estándar sin embargo al llegar antes a la saturación su secado fue más rápido adelantándose al Modificado.

Después del secado las alturas disminuyen y suelo presenta pequeñas contracciones. Del ciclo de saturación se tenía una altura promedio 13.36 cm y al final del secado fue de 12.52cm, con diámetro de 14.84cm, existen variaciones entre las alturas de las probetas esto se debe a que las densidades y humedades iniciales pese a ser similares no son las mismas, pudiendo afectar esto como se ve en las alturas para ambos casos. Para el T-180 se observa el mismo comportamiento pero con alturas mayores por su expansión mayor, con 13.43cm aproximadamente y al final del secado su altura fue 12.36cm, con diámetro de 14.98cm es posible observar la diferencia entre sus expansiones y alturas, que es mayor para el T-180.

Para el cálculo de la densidad seca se usan los datos del suelo seco en el molde, para el T-99 tanto como el T-180 se observa como la densidad ha bajado, en el método Estándar la densidad al inicio de este ciclo fue 1.50gr/cm^3 , pero al final del segundo ciclo se encuentran en 1.47gr/cm^3 a 1.49gr/cm^3 , se aprecia la disminución de estas, en el método Modificado la densidad inicial eran del orden 1.56gr/cm^3 , pero al final del primer ciclo se encuentran en 1.530gr/cm^3 y 1.534gr/cm^3 , manteniéndose parejas entre ellas pero mostrando la disminución respecto a su anterior.

En cuanto al contenido de humedad (Hop) para cada ciclo correspondiente a cada densidad final (Deq), el método Estándar subió de la inicial 24.83% a 25.47% y para el Modificado creció de 22.48% a 23.80%, para ambos se nota como existe un aumento de la humedad, moviendo el punto de máximo de la curva de compactación igualmente a la derecha.

Al final del segundo ciclo se observa como disminuye la densidad y aumenta la humedad del suelo por ambos métodos, esto es lo mismo que ocurrió en el anterior ciclo, demostrando una tendencia a disminuir y aumentar sus humedades en cada ciclo.

- **Tercer ciclo de saturación y secado**

En el tercer ciclo de saturación se observa que la expansión para el T-99 y el T-180 ya no aumento respecto del ciclo anterior, sino que disminuye un poco respecto de su anterior, al final tiene una expansión de 1.02cm es decir aumenta 0.01cm, mientras que para el T-180 la expansión final es de 1.25cm creciendo la probeta un 0.1cm menos.

La humedad de saturación sigue en aumento desde el primer ciclo con 43.96% para el T-180 y 36.97 % para el T-99.

Se observa también que al poner las probetas a saturar, las del método Modificado al igual que en el anterior ciclo presentan una expansión más rápida que las del otro método, pero esta fue casi inmediata por lo que en este ciclo se tomó dos medidas al día. En cuanto al tiempo para llegar a la saturación este llevo 5 días (112 horas) para ser alcanzado para el método Estándar, mientras para el Modificado 5 días (121 horas), la diferencia radica en el número de horas para cada método, además en cuanto a la expansión entre ambos el método Modificado obtuvo una expansión mayor que la del T-99, cabe destacar que el método Estándar a tenido mayor variación en los datos medidos en las probetas 2 y 3.

La saturación del material al inicio es 117.23 % pero tomando en cuenta el cambio debió a la expansión se llega a una saturación real de 100.99 % para el método Estándar. En cuanto al método Modificado al inicio la saturación es 117.23 % debió a la expansión se llega a una saturación real de 100.99 %, la relación de vacíos para ambos métodos continua en aumento respecto del anterior ciclo, debido a la saturación a la que es sometido los llenando así los vacíos y permitiendo un agrandamiento en los poros de las probetas.

El secado de probetas sigue siendo un proceso largo, dependiendo el clima seco lentamente, para acelerar el proceso nuevamente se lo seco por periodos en el horno, para el método Estándar sin embargo al llegar antes a la saturación su secado fue más rápido adelantándose al Modificado al igual que el anterior ciclo.

Después del secado las alturas disminuyen y suelo presenta contracciones nuevamente. Del ciclo de saturación se tenía una altura promedio 13.54 cm y al final del secado fue de 12.64cm de diámetro 14.80cm, existen variaciones entre las alturas de las probetas esto se debe a que las densidades y humedades iniciales pese a ser similares no son las mismas, pudiendo afectar esto como se ve en las alturas en probetas 2 y 3. Para el T-180 se observa el mismo comportamiento pero con alturas mayores por su expansión mayor, con 13.61cm aproximadamente y al final del secado su altura fue 12.62cm, de

diámetro 15cm, es posible observar la diferencia entre sus expansiones y alturas, que es mayor para el T-180.

Para el cálculo de la densidad seca se usan los datos del suelo seco en el molde, para el T-99 tanto como el T-180 se observa como la densidad ha bajado, en el método Estándar la densidad anterior era 1.49gr/cm^3 , pero al final de este ciclo se encuentran en 1.46gr/cm^3 a 1.48gr/cm^3 , se aprecia la disminución de estas, en el método Modificado la densidad inicial fue 1.53gr/cm^3 , pero al final del primer ciclo se encuentran en 1.48gr/cm^3 y 1.487gr/cm^3 , manteniéndose parejas entre ellas pero mostrando la disminución respecto a su anterior.

El contenido de humedad (Hop) para cada ciclo correspondiente a cada densidad final (Deq), se aprecia que en el método Estándar subió de la inicial 25.47% entre 26.10% y para el Modificado creció de 23.80% a 25.83%, para ambos se nota como existe un aumento de la humedad, nuevamente se ve las diferencias entre probetas para ambos casos, es posible observar como en el T-99 los puntos ya no se alejan tanto mientras que para el otro método existe un gran recorrido desde el punto anterior al actual, esto puede apreciarse en las gráficas de curvas que muestran el desplazamiento de cada probetas.

Al final del tercer ciclo se observa como disminuye la densidad y aumenta la humedad del suelo, siendo el mismo comportamiento que mostro en el anterior ciclo, señalando una tendencia a disminuir y aumentar sus humedades en cada ciclo de saturación.

- **Cuarto ciclo de saturación y secado**

En el cuarto ciclo de saturación la expansión para el T-99 y el T-180 ya no aumento respecto del ciclo anterior, sino que disminuye un poco, al final tiene una expansión de 1.02cm, mientras que para el T-180 la expansión final es de 1.24cm creciendo la. La humedad de saturación sigue en aumento desde el primer ciclo con 44.51% para el T-180 y 36.97 % para el T-99.

Se observa también que al poner las probetas a saturar, las del método Modificado al igual que en el anterior ciclo presentan una expansión más rápida que las del otro método, pero esta fue casi inmediata por lo que en este ciclo se tomó dos medidas al

día. En cuanto al tiempo para llegar a la saturación este llevo 4 días (92 horas) para ser alcanzado para el método Estándar, mientras para el Modificado 4 días (98 horas), la diferencia está en la cantidad de horas para cada método, en cuanto a la expansión entre ambos, el método Modificado obtuvo una expansión mayor, igualmente hay variación en los datos medidos en las probetas 2 y 3 igualmente la probeta 4 del otro método también muestra variaciones.

La saturación del material al inicio es 117.23 % pero tomando en cuenta el cambio debió a la expansión se llega a una saturación real de 100.99 % para el método Estándar. En cuanto al método Modificado al inicio la saturación es 117.52 % debió a la expansión se llega a una saturación real de 100.82 %, la relación de vacíos para ambos métodos continua en aumento respecto del anterior ciclo, debido a la saturación a la que es sometido los vacíos y poros de las probetas se agrandan.

Para acelerar el secado de probetas nuevamente se lo seco por periodos en el horno, para el método Estándar sin embargo al llegar antes a la saturación su secado fue más rápido adelantándose al Modificado el cual tarda más en secar a pesar de hacer uso del horno.

Después del secado las alturas disminuyen y suelo presenta pequeñas contracciones. Del ciclo de saturación se tenía una altura promedio 13.54 cm y al final del secado fue de 12.64cm, existen variaciones entre las alturas de las probetas, como se ve en las alturas en probetas 2 y 3. Para el T-180 se observa el mismo comportamiento pero con alturas mayores por su expansión mayor, con 13.86cm aproximadamente y al final del secado su altura fue 12.72cm el diámetro se mantiene igual al del anterior ciclo para ambos métodos, pero es posible observar la diferencia entre sus expansiones y alturas, que es mayor para el T-99.

Para el cálculo de la densidad seca se usan los datos del suelo seco en el molde, para el T-99 tanto como el T-180 se observa como la densidad ha bajado, en el método Estándar la densidad anterior era 1.47gr/cm^3 , pero al final de este ciclo se encuentran en 1.460gr/cm^3 a 1.468gr/cm^3 , se aprecia la disminución de estas, en el método Modificado la densidad inicial fue 1.49gr/cm^3 , pero al final del primer ciclo se

encuentran en 1.470gr/cm^3 y $1,473\text{gr/cm}^3$, manteniéndose parejas entre ellas pero mostrando la disminución respecto a su anterior.

El contenido de humedad (Hop) para cada ciclo correspondiente a cada densidad final (Deq), se aprecia que en el método Estándar subió de la inicial a 26.10% entre 26.51% y para el Modificado creció de 25.83% a 26.29%, para ambos se nota como existe un aumento de la humedad, nuevamente se ve las diferencias entre probetas para ambos casos, es posible observar como en el T-99 los puntos ya no se alejan tanto mientras que para el otro método existe un gran recorrido desde el punto anterior al actual, esto puede apreciarse en las gráficas de curvas que muestran el desplazamiento de cada probetas.

- **Quinto ciclo de saturación y secado**

En el quinto ciclo de saturación la expansión tanto para el T-99 como para el T-180 ya no aumenta respecto del ciclo anterior, sino que disminuye un poco, al final tiene una expansión de 1.02cm, mientras que para el T-180 la expansión final es de 1.23cm, la humedad de saturación sigue en aumento desde el primer ciclo con 44.95% para el T-180 y 37.78 % para el T-99.

Se observa que al poner las probetas a saturar, las del método Modificado al igual que en el anterior ciclo presentan una expansión más rápida que las del otro método, pero esta fue casi inmediata por lo que en este ciclo se tomó dos medidas al día. En cuanto al tiempo para llegar a la saturación este llevo 3 días (55 horas) para ser alcanzado para el método Estándar, mientras para el Modificado 4 días (99 horas, una más que el anterior ciclo), la diferencia radica en el número de horas para cada método, además en cuanto a la expansión entre ambos el método Modificado obtuvo una expansión de 1.23cm siendo esta mayor que la del T-99 de 1.02cm cabe destacar que el método Estándar a tenido mayor variación en los datos medidos en las probetas 2 y 3 igualmente la probeta 4 del otro método también muestra variaciones.

La saturación del material al inicio es 117 % pero tomando en cuenta el cambio debió a la expansión se llega a una saturación real de 100.7 % para el método Estándar. En cuanto al método Modificado al inicio la saturación es 117.35 % debió a la expansión

se llega a una saturación real de 100.72 %, la relación de vacíos para ambos métodos continua en aumento respecto del anterior ciclo, debido a la saturación a la que es sometido agrandando los poros, en el T- 99 se tiene mayor cantidad de agua y poros desde el inicio, pero estos estaban llenados en parte por el agua de la compactación por lo que al saturarse no se hincho tanto como ocurre con el T-180 que debido a la mayor energía usada requiere de menos agua de compactación y tenía entonces una menor cantidad de poros y vacíos los cuales tienen un mayor potencial en sus partículas para absorber agua e hincharse como se vio en cada ciclo, esto pasa en el T-180 y T-99 con vacíos de 0.90 mientras después de los ciclos ambos métodos han alcanzado un reacomodo de partículas similar .

Nuevamente se aceleró el secado de con periodos en el horno, para el método Estándar sin embargo al llegar antes a la saturación su secado fue más rápido adelantándose al Modificado el cual tarda más en secar a pesar de hacer uso del horno.

Después del secado las alturas disminuyen y suelo presenta contracciones. Del ciclo de saturación se tenía una altura promedio 13.70 cm y al final del secado fue de 12.69cm, existen variaciones entre las alturas de las probetas, como se ve en las alturas en probetas 2 y 3. Para el T-180 se observa el mismo comportamiento pero con alturas mayores por su expansión mayor, con 13.95cm aproximadamente y al final del secado su altura fue 12.73cm, se observar la diferencia entre sus expansiones y alturas, que es mayor para el T-99 y como se mantuvo desde hace dos ciclos los diámetros contraídos.

La densidad seca se calcula con los datos del suelo seco en el molde, para el T-99 tanto como el T-180 se observa como la densidad ha bajado, en el método Estándar la densidad anterior era 1.47gr/cm^3 , pero al final de este ciclo se encuentran en 1.460gr/cm^3 a $1,466\text{gr/cm}^3$, se aprecia la disminución de estas, en el método Modificado la densidad inicial fue 1.47gr/cm^3 , pero al final del primer ciclo se encuentran en 1.466gr/cm^3 y $1,470\text{gr/cm}^3$, mostrando la disminución respecto a su anterior.

El contenido de humedad (Hop) para cada ciclo correspondiente a cada densidad final (Deq), se aprecia que en el método Estándar subió de la inicial a 26.51% entre 26.59% y para el Modificado creció de 26.29% a 26.39%, para ambos se nota como existe un

aumento de la humedad, nuevamente se ve las diferencias entre probetas para ambos casos, es posible observar como en el T-99 y T-180 los puntos ya no se alejan tanto del punto anterior al actual, esto puede apreciarse en las gráficas de curvas que muestran el desplazamiento de cada probetas.

Tabla N° 3.29. Detalle de muestras.

MOLDE	T-99					T-180				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
N° de capas	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56
Peso del pisón o martillo (kg)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Altura del pisón o martillo (cm)	30.5	30.5	30.5	30.5	30.5	46.0	46.0	46.0	46.0	46.0
Volumen de la muestra (cm ³)	2125.81	2137.63	2109.12	2110.48	2125.80	2133.32	2129.52	2138.68	2139.40	2138.00
Energía (kg*cm/cm ³)	6.03	5.99	6.07	6.07	6.03	27.17	27.22	27.10	27.09	27.11
ANTES DE SER SOMETIDO A CICLO DE SATURACIÓN Y SECADO										
Contenido de humedad (%)	21.80	21.80	21.66	21.66	21.66	19.67	19.67	19.70	19.70	19.70
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.580	1.570	1.560	1.580	1.580	1.630	1.650	1.640	1.650	1.640
DESPUÉS DE SER SOMETIDO A CICLO DE SATURACIÓN Y SECADO										
Contenido de humedad (%)	26.82	26.91	26.86	26.68	26.77	26.333	26.367	26.368	26.292	26.354
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1.461	1.469	1.460	1.463	1.462	1.470	1.470	1.469	1.467	1.466

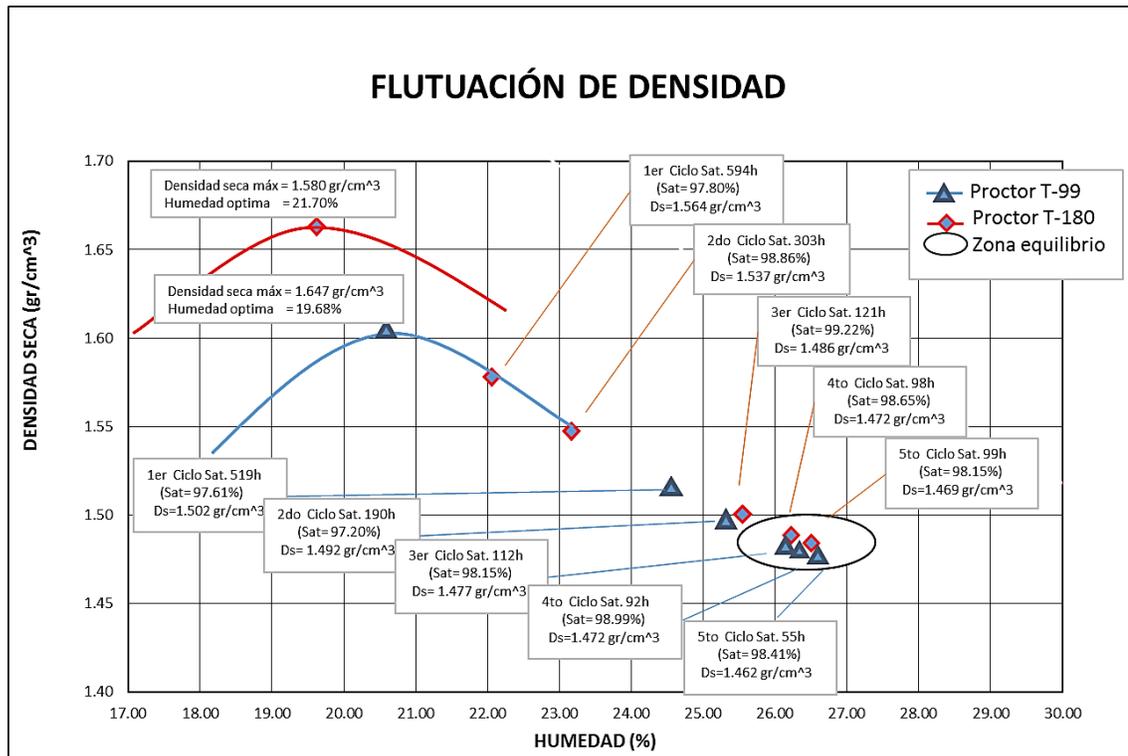
Fuente: Elaboración propia.

Finalmente las densidades iniciales bajaron a un punto casi igual para ambos métodos, el método Modificado bajo más respecto del otro, lo contrario pasa con las humedades correspondientes donde estas son mayores que las del T-180. El método Esta dar luego antes a la zona de equilibrio de sus densidades, están ya estaban próximas en el cuarto ciclo, mientras que el Modificado aun mostraba variaciones entre el cuarto y quinto.

Ambas curvas para cada método se recorren y bajan hacia la derecha, aun punto donde tanto su humedad como densidad llegan a un punto llamado zona de equilibrio.

Si hablamos de las densidades en los CBR iniciales, es interesante como las densidades se acercan a las de equilibrio pero esto no ocurre con la mayor energía (56 golpes) sino en el caso de los 25 y 12 golpes.

Figura N° 3.13. Fluctuación de densidad, hasta la zona de equilibrio.



Fuente: Elaboración propia.

Comprobando con este y el anterior punto como los suelos compactados después de ciclos de saturación y secado se ven afectadas hasta llegar a dicha zona, mostrando como una compactación con mayor esfuerzo se ve innecesaria después de que el suelo esté en condiciones reales o de servicio, y que una compactación con energía menor se reflejaría el mismo resultado.

3.12. Planteamiento de aplicación

Los suelos arcillosos están presentes en gran variedad de suelos en diferentes porcentajes, lo que hace que casi siempre estén presentes en los trabajos y proyectos a realizar, teniéndose que hallar la forma de trabajar con estos debido a factores económicos pues a veces no se puede optar por un reemplazo de material en su totalidad, pese a que al compactarlos estos presentan una apariencia firme buena densidad y resistencia, al estar en contacto con el agua se presentan problemas de estabilidad, encasillando a este como el peor suelo para realizar una fundación, estos

pasaran inevitablemente por varios periodos húmedos y secos a lo largo de los años, cambiando las características de este suelo.

Es por ello que en este estudio se examina el comportamiento que tendrá este suelo compactado en densidad y resistencia antes y después de pasar este por periodos de saturación y secado y como la energía de compactación va a influir en su estos cambios.

Al optar por mayor densidad en compactación se requiere de mayor energía y esto en obra se traduce en mayor uso de la maquinaria para lograr ese grado de compactación, teniendo por lo tanto mayores gastos, pero a lo largo del año este suelo será afectado por varios factores entre los más importante están los aumentos de humedad, que van a producir como se ya dijo anteriormente, disminuciones en densidad y resistencia del suelo, es por ello que lo que se pretende es definir el porqué del uso de una energía menor y por lo tanto una densidad inicial menor, da como resultado un suelo que ante la presencia del agua no presente grandes problemas en deformación de volumétrica, pérdida de densidad y disminución en la resistencia, siendo este punto más importante en la construcción de carreteras, pues es conocidos que los movimientos en estos suelos tienen un patrón irregular causando grandes daños pavimentos al igual que en estructuras que se apoyan sobre ellos. Si se logra prever el comportamiento del suelo arcilloso durante su vida de servicio afectado por estos factores y así tomar medidas para reducir la sensibilidad de este suelo al agua y con esto los esto los problemas como son los asentamientos que provocan fracturas en las carreteras en algunos casos, ayudara en la edificación de caminos que sean más estables, requiriendo de menor mantenimiento brindando un buen servicio para la población.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

Se verifica los cambios es decir la disminución de la densidad seca y resistencia, así como el aumento de la humedad del suelo compactado como resultado de exponer el suelo compactado a periodos de saturación y secado simulando las condiciones de servicio que experimenta en su vida útil, estableciendo así la influencia del agua en suelos compactados.

En el capítulo 2 se manifestó las características y comportamiento que tienen los suelos arcillosos y suelos arcillosos parcialmente saturados, además de la zona de equilibrio y como los cambios de humedad afectan las estructuras de las obras de ingeniería en vías terrestres. No existe una teoría muy extensa sobre el tema de la zona de equilibrio, hasta la que fluctúan las densidades de un suelo compactado por la influencia de la humedad del ambiente, solo se menciona en algunos apartados y de manera reducida, incluso fuera del país, los únicos que parecen tener normativas respecto al tema son Argentina y Colombia.

Al realizar la caracterización el suelo natural es un CH (suelo arcilloso alta compresibilidad) según la clasificación del SUCS y A 7-5(14) según la AASHTO. El suelo fue analizado después de pasar por los periodos húmedos determinando que se convierte en un suelo menos plástico y aunque su clasificación no cambia su índice de grupo baja.

De la compactación por los métodos Estándar y Modificado es evidente la diferencia entre resultados para el suelo, pues se tiene una densidad de 1,58 kg/cm³ y humedad de 21.70% para el T-99 y una densidad de 1,65 kg/cm³ y humedad de 19.71% para el T-180, esta estructura resultante de cada método desempeña un papel fundamental en su comportamiento.

Se observó las variantes en el comportamiento volumétrico del suelo para cada método, la energía del Proctor Modificado sobre el suelo arcilloso condujo a condiciones de expansión mayores que la energía del Proctor Normal, con cada periodo saturado esta expansión aumentaba, hasta que en el cuarto ciclo bajo la expansión y algunas muestras se mantuvo, resultando que para el T-99 la expansiones sobre el suelo compactado son menores después de pasar por varios periodos húmedos y secos que las correspondientes al Proctor T-180, influyendo esto directamente sobre la condición seca de las muestras compactadas, se apreció una contracción en el diámetro tanto como en la altura, de donde se tendría el valor de la densidad del suelo compactado.

Durante los ciclos de saturación y secado el peso saturado aumento por lo tanto también su peso saturado y el peso seco disminuyo respecto de ciclos pasados.

Las densidades secas fueros disminuyendo y las humedades aumentaron, desplazando la densidad inicial en suelo, ambos métodos se posicionaron por debajo del punto máximo hallado por el T-99, el material compactado inicialmente por el método estándar presento una legada más rápida a la densidad de equilibrio del suelo, igualmente presento menos fluctuación y menor disminución de esta comparada con la resultante del Proctor Modificado.

El valor del CBR hallado en el suelo natural fue de 3% para las humedades de T99 y T-180, coloca a éste como apto para el uso en subrasante, después de los ciclos se analizó el suelo resultante, el valor del CBR en ambos casos tuvo una pequeña disminución pero se mantuvo el valor en 3%, pese a la baja en la densidad seca y el aumento en la humedad resultante de los ciclos.

En el establecimiento de criterios que conduzcan a un suelo arcilloso compactado más estable tanto en resistencia como en cambios de volumen frente a futuras variaciones de humedad, se tiene el uso de contenidos de humedad óptimos superiores, pues la compactación por el lado seco tiene más riesgos en estabilidad, estando asociadas a mayor uso de energía, mientras que mayor cantidad de agua en compactación ayuda un mejor reacomodo de las partículas usando menos energía. Al encontrarse este suelo

inicialmente con un mayor contenido de humedad presenta más estabilidad tanto en la densidad como en resistencia frente a las futuras fluctuaciones. Al usar método Estándar en compactación se presentan más beneficios utilizando menor energía y por lo tanto menor costo, que los resultantes del uso del Proctor Modificado.

4.2. Recomendaciones

Los suelos arcillosos expansivos requieren de estudio, por eso el análisis del suelo compactado en laboratorio considerando que pasa por periodos de saturación es de mucha importancia pues es lo que ocurre con los suelos en la naturaleza por las variaciones climáticas, en este proyecto se trató de analizar algunas de sus características, pero debido al tiempo, pues se debe destacar que los periodos de saturación y secado se realizaron en un año, no se pudo hacer más ensayos, además de que no se contaba con el material suficiente, para estudiar sus propiedades después de los ciclos.

Entre los ensayos que se recomiendan están caracterizar nuevamente el suelo, hallar sus límites y granulometría, para un mejor estudio de sus partículas realizar el ensayo del hidrómetro, igualmente se podría realizar el ensayo de CBR.

Aunque en la naturaleza el suelo rara vez se satura o seca al 100% realizar un estudio sobre estas condiciones nos permite tener parámetros que pueden ayudar a definir una densidad seca para otro grado de saturación.

Conociendo el comportamiento del suelo expansivo al realizarse una construcción en carreteras se podrá elegir el método de compactación que resulte en más beneficios, siendo este el T-99 pues se requiere de menor energía y por lo tanto menor costo para lograr la densidad de laboratorio, además que como ya se demostrado presenta menores expansiones y con el paso del tiempo el suelo compactado llegara a una condición similar que la resultante de usar más energía inicialmente.

Analizando la compactación desde una perspectiva global, se tiene que tener cuenta la gran influencia de los distintos factores, tales como son el tipo de material, la maquinaria, la humedad inicial, la climatología, que van a afectar al producto final compactado, en un proyecto se tendrá en cuenta esas circunstancias, si se deciden por

una compactación más enérgica pudiendo dar un poco más de durabilidad al estado del suelo al tardar más en llegar a su densidad de equilibrio o si se opta por una energía menor al correr menos riesgos de deformación y teniendo mayor estabilidad, se adoptaran las soluciones que se consideren más oportunas en el momento para lograr cumplir con los objetivos del proyecto, en relación tanto con su estabilidad, deformabilidad y durabilidad.

