

CAPÍTULO I

1.- INTRODUCCIÓN:

La mecánica de los suelos se origina hace varias décadas con el surgimiento de una gran necesidad, a medida de que los problemas prácticos que involucraban a los suelos crecían en extensión y se hacía cada vez más evidente que los instrumentos científicos existen para resolverlos resultaban insuficientes. Los intentos para remediar esta situación empezaron casi simultáneamente en Estados Unidos y Europa y dentro de un espacio de tiempo relativamente breve, dieron origen a un conjunto enorme de información útil.

El éxito inicial de este campo de la ciencia aplicada fue tan alentador que desde un principio se tuvo la impresión de que una nueva rama de la ingeniería de las estructuras estaba en formación, así que la extensión y la profundidad de las investigaciones teóricas aumentaron rápidamente; al mismo tiempo que se desarrollaban métodos y técnicas experimentales con un método racional para resolver los problemas que plantea la ingeniería de los suelos.

Infortunadamente, la investigación en mecánica de suelos tiene un efecto psicológico que a veces es nocivo, pues desvía la atención de muchos investigadores y profesores, los que olvidan las innumerables limitaciones que la naturaleza impone a la aplicación de soluciones matemáticas en la resolución de problemas de la ingeniería de los suelos.

Como secuencia de este efecto, se ha querido dar cada vez más énfasis a la necesidad de utilizar más refinamientos en la obtención de muestras y en la solución de esos pocos problemas que pueden resolverse con exactitud, olvidando que sólo se obtienen soluciones exactas cuando los estratos de suelo son prácticamente homogéneas y continuos en todas direcciones horizontales. Además, como las investigaciones que conducen a soluciones exactas involucran la utilización de métodos de muestreo y de ensayos altamente especializados, se justifican sólo en casos excepcionales.

El análisis de subrasantes en suelos arcillosos juega un papel importante para la elaboración de diferentes construcciones. Para esto se debe contar con datos seguros y abundantes respecto al suelo con el que se está tratando.

Se debe tomar en cuenta la manera de cómo se extrae el material para la realización del muestreo, se debe saber que características y requerimientos debe tener el suelo; estas características y requerimientos están impuestas a las muestras obtenidas por programas de pruebas obtenidas en laboratorio.

La mecánica de los suelos es muy importante en la ejecución de obras civiles y se utiliza como terraplenes, rellenos de alcantarillas, tratamientos de capas especiales como ser capas bases, subrasantes y otros, además de proporcionar los datos necesarios que inducen al ingeniero a desarrollar sus diseños con la confianza necesaria de que su obra no fallará.

En principio el suelo se encuentra suelto, por lo que para trabajarlo como material debe ser sometido a pruebas de laboratorio, que definirán las características principales como la dureza y la resistencia y ser capaz de resistir grandes esfuerzos en su etapa de funcionalidad.

El ensayo de CBR mide la resistencia al corte (esfuerzo cortante) de un suelo de bajas condiciones de humedad y densidad controlada, la ASTM denomina a este ensayo simplemente como Relación de Soporte y esta normado con el número ASTM D1883-73.

El ensayo de CBR es uno de los más importantes para el diseño de carreteras, así como el número de ellos que se deben realizar, tanto en el campo como en el laboratorio.

En nuestro país, la mayoría de nuestros caminos a nivel nacional requieren de costosos mantenimientos; esto se debe por no haberse realizado buenos estudios de suelos, considerando estos problemas se ha visto por conveniente realizar el análisis de relación entre compresibilidad y densidad in situ aplicada a subrasantes arcillosas, con el objeto

debuscar alternativas de mejoramiento de suelos basados en estudios más detallados en laboratorio.

1.2.-JUSTIFICACIÓN:

Desde hace muchísimos años se sabe que los suelos blandos (arcillas), bajo la interacción de cargas, tienden al hundimiento, esto trae consecuencias importantes en las obras viales, ya que recortan el tiempo de vida útil planificado.

Es obvio que las presiones de poro influyen bastante en este proceso, ya que como es de suponer, si se aprieta un suelo blando que se encuentra saturado, se obtendrá una disminución de volumen, es decir la relación de vacíos disminuye porque el agua que ocupa el volumen de vacíos tiene la necesidad de retirarse del suelo, ésto implica un drenaje rápido del agua.

Muchas veces este fenómeno no es perceptible, debido a que generalmente las subrasantes están bajo estructuras más estables como los son las capas sub base y capa base, por lo que el ingeniero no considera las propiedades especiales que tienen las arcillas. Estas propiedades se refieren a que las mismas en estado de saturación tienden a expandirse, pero en estado seco tienden a contraerse disminuyendo su volumen,(muchas veces a una velocidad importante) por lo que se producen deficiencias y asentamientos que traducen a fallas en la parte superior de los pavimentos.

Las condiciones laterales en una vía, impiden que los movimientos de cada capa de arcilla bajo las capas de un pavimento, sean notorias ya que las cargas aplicadas son verticales, por lo que se dice que los estudios de este tipo de estratos deban ser del tipo confinado. Por lo tanto, se puede afirmar lo siguiente.

El tema de la compresibilidad se centra en el estudio de las variaciones de dimensión del suelo (referente a su altura), en función de las cargas o esfuerzos aplicados al suelo.

La expulsión del agua que se encuentra en los poros, es un proceso fundamental de la consolidación, por lo que son importantes los siguientes conceptos.

- Si las sobrepresiones intersticiales son positivas, existe una disminución de volumen, por lo que el proceso se denomina *consolidación*.
- Si las sobrepresión intersticial son negativas, existe un incremento de volumen, por lo que el proceso se llama *expansión*.

El tema de la consolidación es similar al de la compresibilidad, pero con una variable adicional a su estudio, el *tiempo*.

1.3.- SITUACIÓN PROBLEMICA.-

1.3.1.- Determinación del Problema.-

Los parámetros que relacionen la Compresibilidad y la Densidad In Situ con un suelo arcilloso, problema que ayudaría a anticipar las fallas y deformaciones que alteran los paquetes estructurales, es a raíz de este problema que surge la determinación de encontrar los mencionados parámetros.

Por otro lado el proceso para detectar la compresibilidad de un suelo arcilloso, recurre a ensayos de consolidación complejos y que duran mucho tiempo, y en un estudio de subrasantes implica que se tendría mayores demoras y por ende mayores costos. Por lo que se tendría que tener parámetros que relacionen la Compresibilidad y la Densidad In Situ de un suelo arcilloso.

1.3.2.- Problema.-

¿La relación entre la densidad y la compresibilidad de arcillas permite establecer asentamientos de una manera más rápida y aproximada?

1.3.3.- Objeto del Estudio.-

Realizar un análisis empírico para comprobar si existen parámetros que relacionan la Compresibilidad y la Densidad In Situ, de los suelos arcillosos aplicado a estudios de subrasantes, con el fin de anticipar las fallas que alteren los paquetes estructurales y considerar acciones ingenieriles de prevención.

1.3.4.- Campo de Acción.-

Análisis de suelos arcillosos de alta, media y baja compresibilidad.

1.4.- OBJETIVOS.-

1.4.1.- Objetivo General.-

- Determinar parámetros entre la Compresibilidad y la Densidad In Situ de los suelos arcillosos de alta, media y baja compresibilidad que ayuden a tomar decisiones para la conformación de la subrasante, mediante ensayos estandarizados de laboratorio, normas y guías, que se podrán utilizar para prever las fallas y deformaciones en la conformación de la subrasante, permitiendo tomar una decisión acertada en el trabajo propuesto.

1.4.2.- Objetivos Específicos.-

- Realizar un análisis y clasificación de datos de suelos arcillosos de alta, media y baja compresibilidad.
- Determinar el tipo de suelos mediante muestreo y justificar con criterios técnicos en base de normas establecidas, mediante ensayos estandarizados en laboratorio, como ser:

- Granulometría de Suelos.
- Hidrómetro
- Límites Líquido y Plástico
- Compactación
- Densidad In Situ
- CBR
- Consolidación

Para así después determinar, comparar, establecer semejanzas y diferencias aplicadas a la conformación de lasubrasante.

- Verificar si existen parámetros basados en estudios detallados en laboratorio.
- Después de un análisis donde los resultados serán valores determinados entre la Compresibilidad y la Densidad In Situ, se podrá establecer el comportamiento de lasubrasante y así tratar de prever asentamientos, deformaciones en la conformación de esta capa.
- Aplicación práctica en la conformación de lasubrasante.

1.5.- ALCANCE.-

Se elaborará un análisis para determinar la existencia de parámetros entre Compresibilidad y la Densidad In Situ de suelos arcillosos, debido a que en nuestro departamento tiene un alto índice de asentamientos en sus carreteras, por lo que estos parámetros ayudarán a realizar un procedimiento a seguir para el diseño del paquete estructural, tomando en cuenta la enorme evolución del tráfico y las actividades sociales que surgen en el departamento.

La determinación de parámetros entre Compresibilidad y la Densidad In Situ de los suelos arcillosos de alta, media y baja compresibilidad ayudarán a la toma de decisiones para la conformación de la subrasante, mediante ensayos estandarizados de laboratorio, donde se podrá prever las fallas, asentamientos y deformaciones en la conformación de los paquetes estructurales, y así tener carreteras más seguras, a menor costo, optimizando su vida útil.

Este problema se encuentra directamente relacionado con el entorno social. Por lo que al solucionar este problema surge un beneficio para la comunidad, que tiene que mejorar sus diseños y construcción de sus paquetes estructurales y así aumentar la calidad de vida de los beneficiarios, prolongando la vida útil de las carreteras.

Se seleccionarán los suelos arcillosos en función de su límite líquido, en la carta de plasticidad, se obtendrán suelos de alta, media y baja compresibilidad (De la carta de plasticidad se obtendrá la clasificación de suelos).

En el momento de la extracción de suelos en el sitio debe buscarse la humedad natural (In Situ).

Se estable el criterio de trabajar a las arcillas de forma natural y remoldeada.

Con las muestras inalteradas es necesario hacer de cada arcilla el ensayo de consolidación saturada, donde se encontrará la curva de consolidación y la más importante, la curva de esfuerzos versus relación de vacíos.

Para la forma remoldeada, es importante establecer un rango de densidades, desde su estado suelto hasta su estado más compacto. Para esto puede ser utilizando, energía de compactación de 12, 25 y 56 golpes. En este caso, con valores complementarios de suelos se puede establecer la relación de vacíos que existe en cada molde densidad respectiva, luego establecer una primera gráfica que relaciona densidad de suelos con relación de vacíos.

Calcular la densidad in Situ de una muestra de arcilla inalterada, luego ubicar esas densidades referidas a la densidad máxima que se haya encontrado en esa arcilla.

De las muestras alteradas, es necesario hacer una aproximación del número de golpes, necesarios para encontrar el valor de la densidad in Situ dentro del rango de densidades encontrado anteriormente.

Entonces se tendrá un espécimen remoldeado con la densidad muy aproximada a la densidad in Situ, a ese espécimen se le tendrá que realizar la prueba de consolidación saturada, para obtener la curva de consolidación y la curva de esfuerzos versus relación de vacíos.

Por lo tanto, una arcilla tendrá dos curvas de esfuerzos versus relación de vacíos (una arcilla inalterada y otra remoldeada), hay que sobreponerlas y establecer cuáles son las diferencias cuantitativas existentes referidas siempre a la relación de vacíos.

Establecer dentro de los últimos gráficos obtenidos el valor de las densidades respecto a la relación de vacíos y definir un rango (dentro de este rango siempre estar la densidad in situ).

Calcular los asentamientos respectivos a las densidades in situ y establecer los rangos resultantes.

De esa manera obtendré el primer gráfico donde intervienen densidades vs relación de vacíos. A distintos tipos de Densidades reemplazamos en la ecuación lineal y obtenemos la Rel. de Vacíos que es Y la cual es importante ya que este dato es necesario para poder pasar al segundo paso.

En nuestro segundo gráfico intervienen la Rel. de Vacíos vs Presión Efectiva todas las graficas tienden a bajar, porque están a distintos tipos de estratos y diferentes secuencias.

También podemos decir que a mayor carga menor es la relación de vacíos para las muestras saturadas y no saturadas ya que la presión efectiva es un proceso geológico y en consecuencia debe ser inferido de las pruebas de laboratorio.

Llegando así a reemplazar estos datos en la ecuación de Compresibilidad (pre compresión) y así analizamos la relación entre compresibilidad y la densidad in situ aplicada a subrasantes arcillosas.

CAPÍTULO II.

ESTADO DE CONOCIMIENTO

2.1.- GENERALIDADES DE SUELOS

2.1.1.- Definición de Suelo.-

Desde el punto de vista de la Ingeniería Civil, un suelo puede definirse como la masa disgregada de materiales minerales y orgánicos, que cubren a la corteza sólida de rocas graníticas y basálticas de la Tierra.

El suelo se forma principalmente por acción del medio ambiente y por otros procesos geológicos que ocurren en la superficie de la roca sólida en o cerca de la superficie de la Tierra. Los efectos del medio ambiente, son el resultado de los fenómenos físicos y químicos, debido principalmente a los factores atmosféricos que modifican a la estructura y composición de las rocas. La acción del medio ambiente ocurre ya sea mediante medios físicos o químicos.

Para fines de obra la palabra **SUELO** representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves. Quedan excluidos de la definición las rocas sanas, ígneas o metamórficas y los depósitos sedimentarios altamente cementados, que no se ablanden o desintegren rápidamente por acción de la intemperie. El agua contenida juega un papel fundamental en el comportamiento mecánico del suelo que debe considerarse como parte integral del mismo.

2.1.2.- Tipos de Suelos.-

De acuerdo con el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos: suelos cuyo origen se debe a la descomposición física y / o química de las rocas, o sea los suelos inorgánicos, y suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

★ Suelo Orgánico.-

En cuanto a los suelos orgánicos, ellos se forman casi siempre *in situ*. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta, o en su estado de descomposición, es tan alta con relación a la cantidad de suelo orgánico que las propiedades que pudieran derivar de la porción mineral quedan eliminadas. Ésto es muy común en las zonas pantanosas, en las cuales los restos de vegetación acuática llegan a formar verdaderos depósitos de gran espesor, conocidos con el nombre genéricos de *turbas*. Se caracterizan por su color negro o café oscuro, por su poco peso cuando están secos y su gran compresibilidad y porosidad. La turba es el primer paso de la conversión de la materia vegetal en carbón.

★ Suelo inorgánico.-

Si en los suelos inorgánicos el producto del intemperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó originalmente reciben el nombre de *suelos residuales*; en contraste algunos de esos productos intemperizados pueden ser removidos del lugar de su formación dando origen a los *suelos transportados*.

★ Suelos residuales.-

Estos suelos aparecen particularmente cuando los procesos químicos del intemperismo (que involucra diversos procesos naturales que resultan de la acción individual o combinada de factores tales como el viento, lluvia, heladas y cambio de temperatura) predominan sobre los físicos, lo que sucede en los terrenos llanos de las áreas tropicales.

La composición de estos suelos es muy variable, con una gran diversidad tanto de tipos minerales como de tamaños de partículas. En los climas calientes, el intemperismo puede eliminar algunos minerales, dejando otros más resistentes en depósitos concentrados.

★ Suelos Transportados.-

Son aquellos suelos que por medio de agentes físicos son redepositados en otros lugares, generando así los suelos sobre yacientes a otros estratos, sin relación directa con ellos. Según el agente de transporte se subdividen en las siguientes categorías.

★Suelos Aluviales o Fluviales.-

Depositados por agua en movimiento, produciendo el arrastre de materiales de gran tamaño que se van depositando en forma graduada a lo largo de su curso, correspondiendo los materiales más finos (limos y arcillas) a depósitos próximos a su desembocadura en zonas planas.

★Suelos Glaciales.-

Depositados por acción glacial, están formados por suelos heterogéneos, que van desde grandes bloques, hasta materiales muy finamente granulados, a causa de las grandes presiones desarrolladas y de la abrasión producidas por el movimiento de las masas de hielo.

★Suelos Eólicos.-

Depositados por la acción del viento, el cual puede arrastrar partículas cuyo tamaño puede variar desde limos hasta arenas gruesas; dos tipos de suelo se pueden destacar dentro de esta categoría: *El Loess* que es un depósito constituido por una mezcla uniforme de arenas finas y limos.

★Suelos Médanos.-

Son aglomeraciones de arena suelta arrastrada por el viento y que se vio detenida por algún obstáculo natural de la superficie del terreno.

2.1.3.- Características de los Suelos.-

Se pueden describir en términos de su estructura, forma de sus partículas, peso específico, tamaño y distribución granulométrica, y su constitución mineralógica.

➤Forma de sus Partículas.-

La forma que tienen las partículas de un suelo, está relacionada con la composición mineralógica del material, la misma influye en la formación de vacíos o espacios en la masa de un suelo incidiendo en el comportamiento mecánico de este.

En los suelos gruesos la forma característica es la equidimensional, de las cuales se pueden considerar: la forma redonda (es casi prácticamente esférica), y la angulosa (es aquella partícula que presenta aristas). Las formas angulosas se presentan en arenas residuales, arenas volcánicas, la forma redondeada, es frecuente en arenas de río y en arenas eólicas.

➤ **Peso Específico Relativo.-**

El peso específico relativo de los suelos, depende de clase de mineral o minerales que lo componen, así como de su mayor o menor contenido de materia orgánica, y varía de 2 a 3.

Así por ejemplo, el peso específico relativo del cuarzo es 2.67 y del feldespato es 2.6. En suelos con abundante hierro se puede llegar a 3; en la turba se ha llegado a medir valores hasta de 1.5, debido a la presencia de materia orgánica. Los minerales de arcilla que constituyen la fracción coloidal de un suelo pueden llegar a tener un peso específico relativo promedio comprendido entre 2.8 y 2.9. Así pues es normal que en un suelo los minerales de las fracciones muy finas y coloidales tengan su peso específico relativo mayor que los minerales de la fracción más gruesa.

➤ **Distribución Granulométrica.-**

En los comienzos de la investigación de las características y propiedades de los suelos, se creyó que las propiedades mecánicas dependían directamente de la distribución de las partículas constituyentes, según sus tamaños; por ello era preocupación especial de los ingenieros la búsqueda de métodos adecuados para obtener tal distribución.

La granulometría de un suelo, puede clasificarse en términos de su apariencia, la cual depende principalmente del tamaño, la forma de sus partículas y su distribución. Por ejemplo, los suelos que consisten principalmente de limos y arcillas con tamaños de partícula muy pequeños, se conocen como *Suelos Finos*. Mientras que los suelos que consisten principalmente de arenas y grava con partículas mucho más grandes, se conocen como *Suelos Gruesos*.

➤ **Tamaño de las Partículas del Suelo.-**

Independientemente del origen del suelo, los tamaños de las partículas, en general, que conforman un suelo, varían en un amplio rango. Los suelos en general son llamados *grava*, *arena*, *limo* o *arcilla*, dependiendo del tamaño predominante de las partículas. Para describir los suelos por el tamaño de sus partículas, varias organizaciones desarrollaron límites de tamaño para suelos, que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1.- Límites de Tamaño para Suelos

<i>Tamaño del grano (mm)</i>				
<i>Nombre de la Organización</i>	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico De Massachussets(MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (U.S. Bureau of Reclamation)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, Limos y arcillas) > 0.075	

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica de Braja M. Das

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S.), ha sido adoptado por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (A.S.T.M.). Las arcillas son principalmente partículas submicroscópicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales. Como muestra la tabla 1. Las arcillas se definen como partículas menores a 0.002 mm.

❖ **GRAVAS.-**

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de rocas y que tienen más de dos milímetros de diámetro. Dado el origen, cuando son acarreadas por las aguas las gravas

sufren desgaste en sus aristas y son, por lo tanto, redondeadas. Como material suelto, suele encontrarse en los lechos, en los márgenes y en los conos de deyección de los ríos, también en muchas depresiones de terrenos rellenadas por el acarreo de los ríos y en muchos otros lugares a los cuales las gravas han sido retransportadas.

❖ ARENAS.-

La arena es el nombre que se le da a los materiales de granos finos procedentes de la denudación de las rocas o de su trituración artificial, y cuyas partículas varían entre 2 mm y 0.05 mm de diámetro.

El origen y la existencia de las arenas es análoga a la de las gravas: las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. La arena de río contiene muy a menudo proporciones relativamente grandes de grava y arcilla.

❖ ARCILLAS.-

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas con diámetro menor de 0.005 mm y cuya masa tiene la propiedad de volverse plástica al ser mezclada con agua. Químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene también silicatos de hierro o de magnesio hidratados. La estructura de estos minerales es, generalmente, cristalina y complicada y sus átomos están dispuestos en forma laminar. De hecho se puede decir que hay dos tipos clásicos de tales láminas: uno de ellos del tipo silíceo y el otro del tipo alumínico.

Las arcillas son agregados de partículas microscópicas y submicroscópicas derivadas de la descomposición química que sufren los constituyentes de las rocas. Son suelos plásticos dentro de límites extensos en contenido de humedad y cuando están secos son duros, sin que sea posible despegar polvo de una pasta frotada con los dedos. Tienen, además, una permeabilidad extremadamente baja.

El tipo sílice se encuentra formada por un átomo de sílice rodeado de cuatro átomos de oxígeno. La unión entre partículas se lleva a cabo mediante un mismo átomo de oxígeno. Algunas entidades consideran como arcillas a las partículas menores a 0.002 mm.

❖LIMOS.-

Los limos son suelos de granos finos con poca o ninguna plasticidad, pudiendo ser limo inorgánico como el producido en canteras, o limo orgánico como el que suele encontrarse en los ríos, siendo en este último caso de características plásticas. El diámetro de las partículas de los limos está comprendido entre 0.05 mm y 0.005 mm. Los limos sueltos y saturados son completamente inadecuados para soportar cargas por medio de zapatas. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. La permeabilidad de los limos orgánicos es muy baja y su compresibilidad muy alta. Los limos, de no encontrarse en estado denso, a menudo son considerados como suelos pobres para cimentar.

2.2.- Composición de la Arcilla.-

Al realizar un análisis mineralógico y químico de este tipo de suelo, se puede establecer que está compuesto principalmente de minerales como la montmorillonita e illita entre otros, los cuales contienen en su estructura átomos de aluminio y silicio, que de acuerdo a la valencia que tienen se pueden combinar con los átomos de oxígeno, los cuales conforman una serie de cadenas que determinan las características de las arcillas.

Los minerales arcillosos, son filosilicatos hidratados que se presentan en cristales muy pequeños. Debido a su estructura **crystalina**, las arcillas son intercambiadores de iones muy eficaces. Las arcillas poseen una carga neta superficial negativa que les permite absorber cationes y materia orgánica.

Los minerales de arcilla poseen dos componentes **estructurales** básicos: uno es el tetraedro de Silicio - Oxígeno y el otro es el octaedro, en el cual un átomo de aluminio, magnesio y/o hierro es rodeado por seis aniones (2 ó 4 oxígenos y 4 ó 2 hidróxidos).

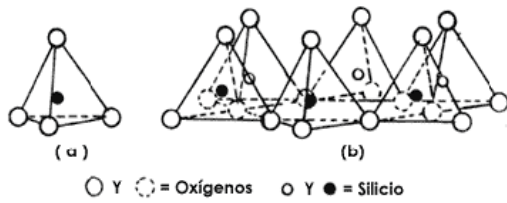


Figura 1. Tetraedro de Silicio – Oxígeno

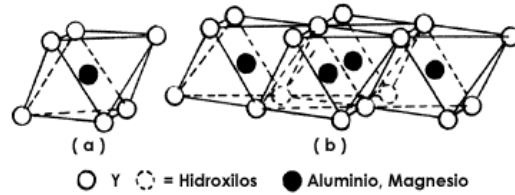


Figura 2. Octaedro Aluminio / magnesio - Hidróxidos

Los filosilicatos que componen las arcillas pertenecen fundamentalmente a cuatro grupos: el del Caolín, el de la Montmorillonita, el de la Mica arcillosa (fundamentalmente illita), y el de la Clorita.

Los minerales arcillosos pueden proceder de la alteración de la roca magmática o metamórfica, y después del transporte, dar arcillas detríticas (es el caso más frecuente).

Pueden formarse en una cuenca de sedimentación en cuyo caso son minerales arcillosos neoformados. En otros casos pueden proceder de una reorganización mineralógica durante la diagénesis (minerales arcillosos diagenéticos). Las arcillas detríticas son corrientemente denominadas arcillas primarias o heredadas, y las otras arcillas secundarias.

Desde el punto de vista mineralógico, la Arcilla engloba a un grupo de minerales (minerales de la arcilla), filosilicatos en su mayor parte, cuyas propiedades físico-químicas dependen de su estructura y de su tamaño de grano, muy fino (inferior a $2\mu\text{m}$).

Por tanto, el término arcilla no sólo tiene connotaciones mineralógicas, sino también de tamaño de partícula. Según esto todos los filosilicatos pueden considerarse verdaderas arcillas si se encuentran dentro de dicho rango de tamaños, incluso minerales no pertenecientes al grupo de los filosilicatos (cuarzo, feldspatos, etc.) pueden ser considerados partículas arcillosas cuando están incluidos en un sedimento arcilloso y sus tamaños no superan las $2\mu\text{m}$.

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 que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan.

2.2.1.- Características de la Arcilla.-

Es una roca sedimentaria clástica poco consolidada, constituida por silicato de aluminio hidratado.

La arcilla pura, es el caolín (o arcilla china), que aparece en cristalitas en forma de escamas, es blanda y blanca con plasticidad variable y que retiene su color blanco durante la cocción.

Las demás arcillas contienen impurezas, a las cuales deben su color, y varían en plasticidad, aunque todas son más o menos maleables y capaces de ser moldeadas cuando se humedecen con agua.



a).- Arcilla Roja



b) Arcilla Blanca

Figura 2 Arcilla roja y Arcilla Blanca

Las arcillas son principalmente partículas submicroscópicas en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales. Las arcillas se definen como partículas menores a 0,002 mm. En algunos casos las partículas de tamaño entre 0,002 y 0,005 mm también se denominan arcillas. Las partículas se clasifican como arcilla con base en su tamaño y no contienen necesariamente minerales arcillosos. Las arcillas se definen como aquellas

partículas “que desarrollan plasticidad cuando se mezclan con una cantidad limitada de agua” (Grim, 1953). Los suelos no arcillosos pueden contener partículas de cuarzo, feldespato o mica, suficientemente pequeñas para caer dentro de la clasificación de las arcillas. Por consiguiente, es apropiado para las partículas de suelo menores que 2μ o 5μ como se definen bajo diferentes sistemas, ser llamadas partículas tamaño arcilla en vez de arcillas. Las partículas de arcilla son en su mayoría de tamaño coloidal ($< 1 \mu$) con 2μ de límite superior.

Los suelos arcillosos, son suelos desintegrados son transportados por el agua y por el viento hasta que se depositan y se acumulan como sedimentos.

Estos depósitos se compactan por el peso de las sucesivas capas de material y se disponen en forma de capas y estratos. La dureza depende del grado de cementación de las partículas.

2.2.2.- Tipos de Arcillas.-

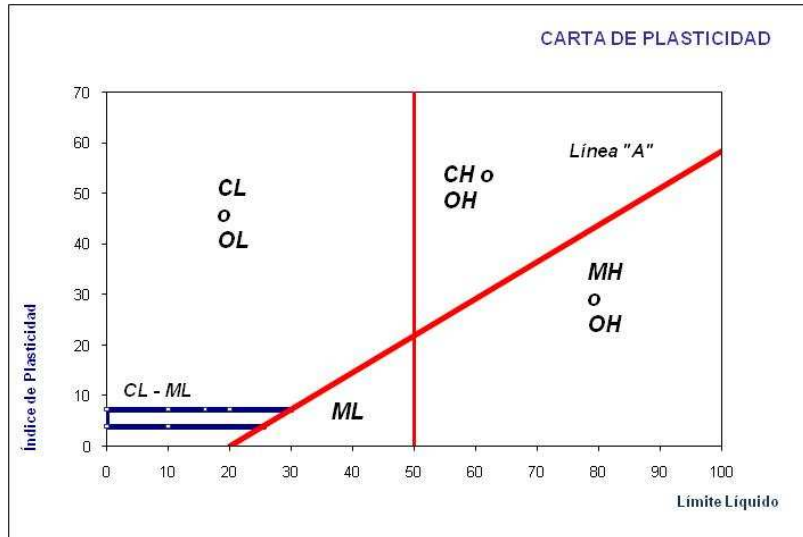
Las principales arcillas, son: la caolinita, que presenta una baja capacidad de intercambio y dos capas de cationes, se llama arcilla 1/1 (capa tetraédrica + capa octaédrica); la illita y la montmorillonita que son arcillas 2/1 con una capacidad de intercambio media en la illita y alta en la montmorillonita (arcilla hinchable o expansiva).

Los minerales de arcilla producirán caolinita si el clima es tropical drenado y en especial cuando el material parental es granito, illita si se da en clima seco y frío y montmorillonita, que se asocia a bentonita si se da en suelos alcalinos pero mal drenados.

- **La caolinita.** Es rica en sílice y aluminio, colores: blanco, amarillo, verde y pardo. Muestra una perfecta exfoliación, es apreciada para fabricar utensilios.
- **La illita.** Está ligada por potasio, con sílice y aluminio; normalmente amarilla o roja, si tiene hierro, o blanca si es pura.

- **La montmorillonita.** Presenta magnesio o aluminio hidratado entre láminas de silicio. Tiene en su estructura molecular n moléculas de agua; el parámetro n, variable, le da su característica de expansiva.

2.2.3.- Clasificación de Arcillas (Carta De Plasticidad).-



Carta de Plasticidad

2.3.- SUBRASANTES.-

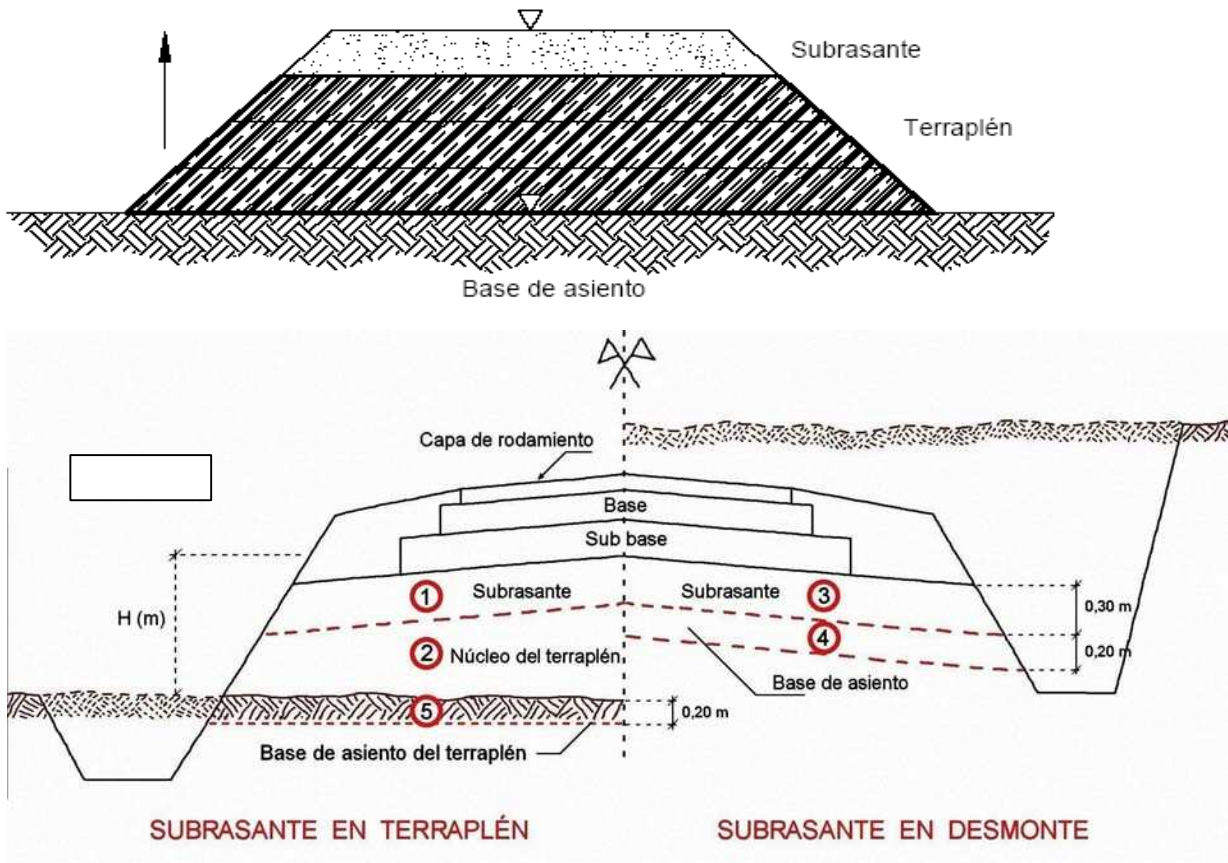
2.3.1.- Introducción.-

En muchos casos, esta capa no se considera como perteneciente al firme, sino a la explanación u obra de tierra. Sin embargo, su función es muy importante respecto de aquél, ya que le dota de una base uniforme y de buena capacidad portante. Los materiales que se emplean en su confección son suelos seleccionados, a ser posible procedentes de la propia excavación o de los alrededores de la obra.

Al conseguir un cimiento de características uniformes, los espesores de las capas superiores pueden ser constantes, lo que es muy conveniente desde el punto de vista constructivo, económico y de proyecto. La situación contraria implicaría constantes cambios en los espesores del firme, según las características locales de la explanada natural.

Actualmente se tiende a cuidar la terminación de la subrasante natural, por lo que esta capa se halla en desuso.

Figura N° 3: Ubicación de la Subrasante



Incidencia de Arcillas en Obras Viales.-

La incidencia de las Arcillas, radica en que: constituyen en alto porcentaje los suelos naturales (Subrasantes), con mayor énfasis en los que geológicamente aún se encuentran en formación.

Constituyen la fracción fina de los materiales arcillo-gravosos, de fuente o de cantera, que empleamos para constituir las capas intermedias de las estructuras viales; incrementan los costos al hacer presencia, indeseable, en los materiales que se emplean para construir las bases y en los agregados de las rodaduras de nuestras vías. Finalmente son las causantes de la contaminación y deterioro de los caminos y de las rodaduras, en las vías sin pavimento.

El hombre hábilmente ha ido desarrollando e implementando tecnologías para solucionar dichos problemas, dedicando gran parte de la Investigación y la Ciencia a analizar los materiales disponibles y a estudiar sus aplicaciones, para obtener la mejor estructura vial, que se adaptará, en cada época y en cada oportunidad, a sus requerimientos. En su afán de encontrar estructuras viales, durables y confiables, descuidó, hasta hace algunos pocos años, el aspecto económico y el deterioro ambiental que estaba infringiendo a su entorno. Incluso abandonó y olvidó procedimientos y tecnologías que antes le habían sido útiles y que conservando los recursos naturales producían, menor deterioro ecológico.

2.4.- DESCRIPCIÓN DE LOS DOS SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS MÁS UTILIZADOS EN LABORATORIO.-

La clasificación proporciona información cualitativa de las propiedades mecánicas y comportamiento de un suelo. Existen diversos sistemas de clasificación, pero nos centraremos en los dos siguientes:

- Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, creado por Casagrande e incluido en las normas de la ASTM (American Society for Testing and Materials).
- AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Es evidente que un sistema de clasificación de suelos debe agruparlos de acuerdo con sus propiedades mecánicas básicas, por ser éstas lo que interesa para las aplicaciones ingenieriles. A la vez, el criterio clasificador ha de ser preponderantemente de naturaleza cualitativa, puesto que un sistema que incluyera relaciones cuantitativas resultaría excesivamente engorroso y complicado.

Probablemente, lo menos que puede esperar un técnico de un sistema de clasificación es que sirva para normar su criterio respecto al suelo en cuestión, antes de que adquiera conocimientos más profundos y extensos de las propiedades del mismo; así, al usar el sistema será posible, entre otras cosas, obtener criterios para saber en qué direcciones es conveniente profundizar la investigación.

A pesar de su sencillez, los criterios de clasificación puramente granulométricos resultan hoy poco apropiados, porque la correlación de la distribución granulométrica con las propiedades fundamentales (resistencia, compresibilidad, relaciones esfuerzo-deformación, permeabilidad, etc.) resulta demasiado insegura y sujeta a excepciones y casos especiales.

El sistema clasifica a los suelos finos principalmente con base en sus características de plasticidad, cuya correlación con las propiedades mecánicas básicas es consistente y confiable. Los suelos gruesos, mayores que la malla N° 200 (0.074 mm de abertura), se clasifican sobre todo con criterio granulométrico, si bien son cuidadosamente tomadas en cuenta también las características de plasticidad de su fracción fina. No está claramente definido el tamaño máximo de los suelos que quedan comprendidos en el Sistema, pero como han de poder ser cribados, frecuentemente se fija en forma arbitraria en 7.6 cm. (3").

El Sistema Unificado nació como medio para clasificar suelos finos únicamente (menores que la malla 200, con 0.074 mm de abertura), y después fue extendido hasta incluir gravas y arenas.

a) Sistema Unificado de Clasificación de Suelos

La base del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es la Carta de Plasticidad, resultado de una investigación realizada por A. Casagrande en el laboratorio. En esta investigación se vio que, si se sitúan los suelos en un sistema coordinado que tenga el Límite Líquido en el eje de las abscisas y al Índice Plástico en el de las ordenadas, su agrupamiento no ocurre al azar, sino que se agrupan de manera que en cada zona de la carta se sitúan suelos con características de plasticidad y propiedades mecánicas e hidráulicas cualitativamente definidas.

El Sistema unificado abarca tanto a los suelos gruesos como a los finos, distinguiéndolos por el cribado a través de la malla N° 200. El suelo es **fino** cuando más del 50% pasa el Tamiz N° 200.

Los tipos de suelo que establece el sistema son:

- GW: Grava bien gradada, mezclas gravosas, poco o ningún fino.
- GP: Grava mal gradada, mezclas grava – arena, poco o ningún fino.
- GM: Grava limosa, mezclas grava, arena, limo.
- GC: Grava arcillosa, mezclas grava – arena arcillosas.
- SW: Arena bien gradada.
- SP: Arena mal gradada, arenas gravosas, poco o ningún fino.
- SM: Arenas limosas, mezclas arena – limo.
- SC: Arenas arcillosas, mezclas arena – arcilla.
- ML: Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, limo arcilloso, poco plástico, arenas finas limosas, arenas finas arcillosas.
- CL: Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras (pulpa).
- OL: Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.
- MH: Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos (ambiente marino, naturaleza orgánica silíceo), suelos elásticos.
- CH: Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas gruesas.
- OH: Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos.
- Pt: Turba (carbón en formación) y otros suelos altamente orgánicos.

Las gravas y arenas limpias se dividen en bien graduadas o mal graduadas en función de los coeficientes C_c y C_u . Las gravas y arenas sucias se diferencian en función del índice de plasticidad y la línea A. En el caso de gravas y arenas pueden existir, además, símbolos dobles si el porcentaje de finos está entre el 5 y 12 % o si el suelo se encuentra sobre la línea A, del ábaco de plasticidad de Casagrande, y el índice de plasticidad entre 4 y 7. Una simbología corresponderá a uno de los grupos de las gravas o arenas limpias, (aquella que cumpla con los requisitos), y otra a uno de los grupos de las gravas o arenas con finos, (el que cumpla otros requisitos). Las gravas con símbolo doble podrán ser GC-GW, GM-GW, GC-GP o GM-GP. Las posibles arenas con símbolo serán SC-SW, SM-SW, SC-SP o SM-SP.

Con el Índice de Plasticidad y el Límite Líquido se obtiene la posición del suelo en el gráfico de plasticidad de Casagrande. La ecuación de la línea A es: **$IP = 0.73 (LL-20)$** .

Suelos no cohesivos o granulares.- se consideran como suelos no cohesivos o granulares los que cumplen las siguientes condiciones, de acuerdo al sistema de clasificación unificada de suelos, con algunas modificaciones:

- a) Todos los materiales clasificados como GW, GP, GW-GM, GP-GM, GW-GC, GP-GC, SW, SP, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC.
- b) Todos los materiales clasificados como GM, GC, GM-GC, SM, SC, SM-SC, en los cuales 30% o menos del peso pase por tamiz no 200 y que tengan límite líquido $WL \leq 30\%$ e Índice Plástico $IP \leq 10\%$.

Suelos cohesivos.- se consideran como suelos cohesivos todos aquellos que no cumplan con las condiciones de suelos no cohesivos o granulares.

Tabla Nro. 3 Clasificación de los suelos según la ASTM.

				Criterios de Laboratorio			
Descripción		Símbolo	Símbolo de Grupo	Criterios de Laboratorio			
Descripción		de		Criterios de Laboratorio			
		Grupo	Finos(%)	Gradación	Plasticidad	Notas	
Grano Grueso (más de 50% de Tamaño mayor que la medida del Tamiz Nro. 200	Gravas más de 50 % de la fracción gruesa es retenida por el tamiz N° 4	Gravas bien escalonadas, gravas arenosas, con escasos finos o sin ellos	GW	0-5	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$		símbolos duales si los finos van de 5 a 12%
		Gravas pobremente escalonadas, arenosas, con escasos finos o sin ellos	GP	0-5	$1 < Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}} < 3$		
		Gravas sedimentarias, gravas arenosas arcillosas	GM	>12	$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$	Por debajo de la línea A IP<4	
		Gravas arcillosas, gravas arenosas arcillosas	GC	>12	$1 < Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} D_{60}} < 3$	Por encima de la línea A con IP>7	
	Arena más de 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz N° 4	Arenas bien escalonadas, arenas con grava, con poco finos o si ellos	SW	0-5			símbolos duales si están sobre la línea A
		Arenas pobremente escalonadas arenas con gravas, con pocos finos o sin ellos	SP	0-5			
		Arenas sedimentarias	SM	>12		Por debajo de la línea A IP<4	4<IP<7
		Arenas arcillosas	SC	>12		Por encima de la línea A con IP>7	

			Finos(%)	Gradación	Plasticidad	Notas
Grano fino más de 50% de tamaño menor que la medida del tamiz N° 200	Sedimentos y arcillas Límite Líquido inferior a 50	Sedimentos inorgánicos, arenas finas sedimentarias o arcillosas, con leve plasticidad	ML	Usar diagrama de plasticidad		
		Arcillas inorgánicas, sedimentarias, arenosas de baja plasticidad	CL	Usar diagrama de plasticidad		
		Sedimentos orgánicos y arcillas sedimentarias orgánicas de baja plasticidad	OL	Usar diagrama de plasticidad		
	Sedimentos y arcillas Límite Líquido superior a 50	Sedimentos orgánicos de alta plasticidad	NH	Usar diagrama de plasticidad		
		Arcillas inorgánicas de alta plasticidad	CH	Usar diagrama de plasticidad		
		Arcillas orgánicas de alta plasticidad	OH	Usar diagrama de plasticidad		

Figura Nro. 4: Equipo para la Clasificación de Suelos



b) Método AASHTO

La AASHTO, que representa a todos los departamentos de carreteras de los Estados Unidos de Norte América, ha adoptado esta clasificación, se designa esta clasificación como “Clasificación de Suelos AASHTO”.

Los suelos se clasifican en siete grupos, basándose en la composición granulométrica, en el Límite Líquido y en el Índice de Plasticidad de un suelo. La evaluación de cada grupo, se hace por medio de su “Índice de Grupo”, el que es calculado mediante la fórmula empírica.

$$IG = (F - 35) [0.2 + 0.005 (LL - 40)] + 0.01 (F - 15) (PI - 10)$$

Donde:

F = Porcentaje que pasa la malla N° 200

LL = Límite Líquido

PI = Índice de Plasticidad

También se podrá determinar el IG mediante la siguiente fórmula:

$$IG = 0,2 a + 0,005 a c + 0,01 b d$$

Donde:

↗ Si % > 75 = 40

(F - 35) = a [es % material pasa N° 200 menor 35% (0-40)] ↘ Si % < 35 = 0

(F - 15) = b [es % material pasa N° 200 menor 15% (0-40)] ↗ Si % > 55 = 40
↘ Si % < 15 = 0

(LL - 40) = c [es valor de LL menor 40% (0-20)] ↗ Si LL > 60 = 20
↘ Si LL < 40 = 0

(PI - 10) = d [es valor de IP menor de 10% (0-20)] ↗ Si IP > 30 = 20
↘ Si IP < 10 = 0

Los tipos de suelo que establece el sistema son:

- A-1-a: Principalmente gravas con o sin partículas finas de granulometrías bien definidas.
- A-1-b: Arena con o sin partículas finas de granulometrías bien definidas.
- A-2-4: Materiales granulares con partículas finas limosas.
- A-2-5: Intermedio.
- A-2-6: Materiales granulares con partículas finas arcillosas.
- A-2-7: Intermedio.
- A-3: Arena de granulometría deficiente que casi no contiene partículas finas ni gravas.
- A-4: Principalmente partículas finas limosas.
- A-5: Tipos de suelos poco frecuentes que contienen partículas finas limosas, generalmente elásticos y difíciles de compactar.
- A-6: Contienen partículas finas limosas o arcillosas con un límite líquido bajo.
- A-7-5: Las arcillas y limos más plásticos.
- A-7-6: Las arcillas y limos más plásticos.

Para la clasificación de los suelos A-4, A-5, A-6 y A-7, conocidos el IP y el LL, se debe recurrir, además, a la figura 5.

Figura Nro. 5 Clasificación de los suelos de textura fina según la AASHTO.

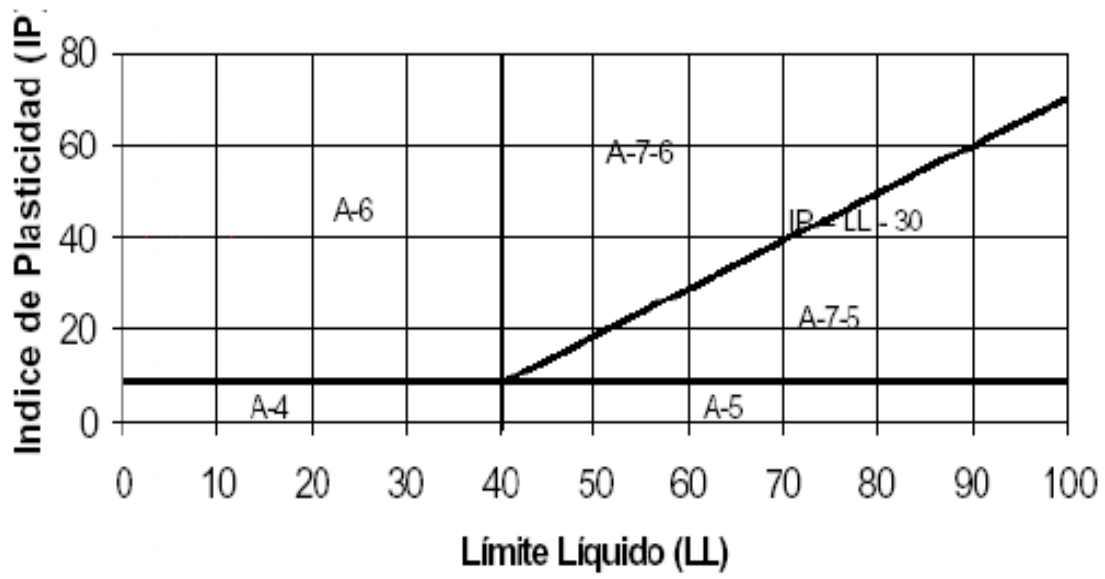


Tabla Nro. 4 Clasificación de los suelos según la AASHTO

CLASIFICACIÓN GENERAL	MATERIALES GRANULARES (Menor del 35% pasa por el tamiz N° 200)							MATERIALES LIMO-ARCILLOSOS (Más del 35% pasa por el tamiz N° 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
<u>Análisis granulométrico % que pasa el tamiz</u>											
N° 10	50 máx.										
N°40	30 máx.	50 máx.	51 máx.								
N°200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
<u>Características de la fracción que pasa por N° 40</u>											
Límite Líquido				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min. (1)
Índice de Plasticidad (1)	6 máx.	6 máx.	No plástico	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.
Índice del Grupo (2)	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Tipos de materiales Preponderantes	Fragmento de piedra grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Valor general como cimiento	Excelente a bueno							Regular a malo			

2.5.- DEFINICIÓN DE COMPACTACIÓN.-

Se denomina compactación de suelos al proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y esfuerzo-deformación de los mismos; por lo general el proceso implica una reducción más o menos rápida de los vacíos, como consecuencia de la cual en el suelo ocurren cambios de volumen de importancia, fundamentalmente ligados a pérdida de volumen de aire, pues por lo común no se expulsa agua de los huecos durante el proceso de compactación.

No todo el aire sale del suelo, por lo que la condición de un suelo compactado es la de un suelo parcialmente saturado.

Es un proceso de la disminución o minimización de espacios vacíos por medio de la acción mecánica de los equipos de compactación. Durante este proceso se pueden mejorar las características del suelo, con un aumento simultáneo de densidad. El suelo como un elemento que recibe diferentes estructuras construídas por el hombre (como por ejemplo calles, estacionamientos, edificaciones), por lo que con la compactación de un suelo se busca.

I.- Mayor capacidad de carga. Al compactar un suelo se obtiene mayor densidad del mismo, debido a lo anterior se obtiene una mejor distribución de fuerzas que actúan directamente sobre el suelo como consecuencia de la carga que transmite la carga, lo que da una mayor capacidad de carga.

II.- Mayor estabilidad. Al construirse alguna edificación sobre un suelo sin compactar o compactado en forma desigual, el suelo por la acción de la carga, se asienta en forma desigual, lo cual ocasionara grietas en la estructura, y en un momento dado la inestabilidad de la construcción.

III.- Disminución de la contracción del suelo. Al existir espacios de aire en el suelo, el agua penetra con facilidad, por lo que se produce un fenómeno de dilatación y contracción del suelo, el cual se separa de la estructura, modificando las condiciones iniciales de diseño.

IV.- Disminución de la permeabilidad. La permeabilidad de un suelo depende de la granulometría del suelo y de su densidad, un suelo bien compactado impide el paso del agua, evitando así deformaciones en el suelo, modificando las características de diseño, (como es el caso de los baches).

V.- Disminución de asentamiento. Cuando un suelo está mal compactado, en esos espacios se pueden llenar de agua, con bajas temperaturas se congela, y en los cambios de estado puede producir agrietamiento en la estructura de los pavimentos, bases de estructuras, muros etc.

Pruebas de Compactación.-

Históricamente, los primeros métodos en el sentido de la técnica actual, es el debido a R.R. Proctor y es conocido hoy en día como (Prueba Proctor Estándar).

•Prueba Proctor Estándar.-

La prueba consiste en compactar el suelo en cuestión en tres capas dentro de un molde de dimensiones y forma especificadas, por medio de golpes de un pisón, también especificado, que se deja caer libremente desde una altura prefijada.

El Molde: es un cilindro de 943.3 cm³ de capacidad, de 10.2 cm. (4 pulgadas) de diámetro y 11.7 cm. (4.59 pulgadas) de altura provisto de una extensión desmontable de igual diámetro y 5 cm. (2 pulgadas) de altura. El molde puede fijarse a una base metálica con tornillos de mariposa.

El Pisón: es de 2.5 Kg. (5.5 libras) de peso y consta de un vástago en cuyo extremo inferior hay un cilindro metálico de 5 cm. (2 pulgadas) de diámetro. Los golpes se aplican dejando caer el pisón desde una altura de 30.5 cm. (12 pulgadas).

Dentro del molde el suelo debe colocarse en tres capas que se compactan dando 25 golpes, repartidos en el área del cilindro, a cada una de ellas.

•Prueba Proctor Estándar Modificada.-

Con el desarrollo de rodillos pesados y su uso en la compactación de campo la Prueba Proctor Estándar fue modificada para representar mejor las condiciones de campo. A ésta se le llama Prueba Proctor Modificada, una modificación aumentando la energía de compactación de modo que conservando el número de golpes por capa se elevó el número de éstas de 3 a 5 aumentando el peso del pisón y la altura de caída del mismo. Las nueva dimensiones son 4.5 Kg. (10 libras) y 45.7 cm. (18 pulgadas) respectiva y aproximadamente. La energía específica de compactación es ahora de $27.2 \text{ Kg.} \cdot \text{cm.} / \text{cm}^3$ ($56.200 \text{ libras} \cdot \text{pie} / \text{pie}^3$), sobre la base de que el molde utilizado es el mismo que en la Prueba Proctor Estándar.

Figura Nro. 6 Equipo usado para la Prueba Proctor Modificada



Factores que afectan el Proceso de la Compactación de los Suelos.-

1.- Naturaleza y Tipo de Suelo: Los granulares consiguen alcanzar mayores densidades que los de textura fina y por tanto tendrán mayor resistencia y capacidad de soporte. Interesan, pues, suelos con alto contenido en gravas y arenas por su mayor densidad y resistencia.

2.- Contenido de Humedad: El Ingeniero R. Proctor demostró que para contenidos de humedad crecientes y una determinada energía de compactación, la densidad lograda aumenta ya que el agua actúa como lubricante entre las partículas del suelo, incrementándose la densidad hasta un cierto punto en el cual al seguir añadiendo agua, la densidad empieza a decrecer; el agua ha dejado de desplazar aire y como es incompresible, empieza a desplazar las partículas de suelo, incrementando el volumen y disminuyendo la densidad. Para cada suelo existe un contenido en humedad que proporciona la máxima densidad seca. Éste es el contenido de humedad óptimo que es el que se debe utilizar en obra cuando se va a compactar un suelo.

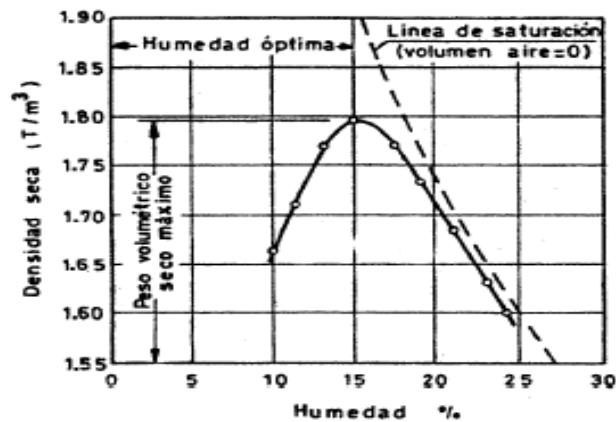
3.- Energía y Método de Compactación Empleado: Al aumentar la energía de compactación se obtiene un aumento de la densidad seca máxima y una disminución del contenido óptimo de humedad, lo que produce que la curva Proctor de compactación se traslade hacia la izquierda y hacia arriba. Esta circunstancia que se produce en el ensayo de Proctor modificado, en el cual se emplea una mayor energía de compactación que en el normal, se aprecia en la siguiente figura.

Curva de Compactación.-

Como ya se dijo, Proctor visualizó la correlación entre los resultados de un proceso de compactación y el aumento del peso volumétrico seco del material compactado, y estableció la costumbre, que aún hoy se sigue, de juzgar los resultados de un proceso de compactación con base en la variación del peso volumétrico seco que se logre; también comprendió el fundamental papel que desempeña el contenido de agua del suelo en la

compactación que de él se obtiene, con un cierto procedimiento. Relacionando estos aspectos que considero básicos, estableció la costumbre, que también ha subsistido hasta la actualidad, de representar la marcha de un proceso de compactación por medio de una gráfica en la que se haga ver el cambio de peso volumétrico seco al compactar al suelo con diversos contenidos de agua, utilizando varias muestras del mismo suelo, cada una de las cuales proporciona un punto de la curva.

Figura Nro. 7 :Curva típica de compactación



2.6.- CONCEPTO DE DENSIDAD IN SITU.-

La calidad durante un proceso de compactación en campo se mide a partir de un parámetro conocido como grado de compactación, el cual presenta un cierto porcentaje. Su evaluación involucra la determinación previa del peso específico y de la humedad óptima correspondiente a la capa de material ya compactado. Este método es para conocer el grado de compactación; es un método destructivo ya que se basa en determinar el peso específico seco de campo a partir del material extraído de una muestra, la cual se realiza sobre la capa de material ya compactado.

Un suelo natural o compactado requiere la determinación de la densidad in situ. En la mayoría de los proyectos, esta verificación se logra con el cono de arena o por el densímetro nuclear.

2.7.- DEFINICIÓN DE CONSOLIDACIÓN.-

Consolidación es la disminución del volumen del suelo debido al flujo de agua. Por el cambio de la carga hidráulica a causa de las sobrepresiones intersticiales positivas generada por la aplicación de la carga.

Un incremento del esfuerzo provocado por la construcción de obras civiles u otras cargas comprime los estratos del suelo. La compresión es causada por:

- a) Deformación de las partículas del suelo
- b) Reacomodo de las partículas del suelo
- c) Expulsión de agua o aire de los espacios vacíos

Desde hace muchísimos años, se sabe que zapatas, o estructuras de cimentación superficiales, apoyadas en terrenos blandos (generalmente arcillas blandas), sufren grandes asientos e incluso se hunden. Ya antiguamente se vio la necesidad de cimentar sobre pilotes o pilares-pozos que atravesaran la capa blanda y descansaran en estratos más firmes. Pero, si bajo una capa de arena existe una de arcilla blanda, las consecuencias no serán tan fáciles de prever. De aquí que los estratos confinados de arcilla haya que estudiarlos a fondo, para prevenir y calcular los asientos. A esos estratos se les denomina *confinados*, pues la adherencia y fricción en los bordes impiden la expansión horizontal.

De ahí que los estudios y ensayos se hagan sobre muestras lateralmente confinadas, para asemejarse más al comportamiento real.

El tema de la compresibilidad se centra en el estudio de las variaciones de dimensión del suelo, (preferentemente en lo referente a su altura), en función de las cargas o esfuerzos aplicados al suelo.

El estudio de la compresibilidad se realiza fundamentalmente para arcillas o suelos arcillosos, y en estado de saturación. Cuando el incremento de carga es asumido

conjuntamente por las partículas minerales y el agua -que conforman el total del suelo-, la variación de presión intersticial, o presión de poro, obliga al agua a moverse a través del suelo, hasta disipar esa sobrepresión intersticial, con lo cual muchas propiedades del suelo varían con el tiempo en que se produce ese fenómeno.

La expulsión de agua de los poros, que permite el reajuste de las partículas sólidas en los huecos que han quedado vacíos, es la base del fenómeno de la consolidación.

Si las sobrepresiones intersticiales son positivas, y en consecuencia el suelo disminuye de volumen, el proceso se denomina *consolidación*.

Si las sobrepresiones intersticiales son negativas, de modo que el suelo tiende a aumentar su volumen, el proceso se denomina *expansión*.

El tema de la consolidación es similar al de la compresibilidad, pero con una variable adicional en su estudio: el tiempo.

Cuando el suelo se somete a una sobrecarga q los esfuerzos totales se incrementan en esa misma cuantía. En suelos saturados, esto conduce al incremento de la presión de poros; pero dado que el agua no resiste esfuerzos cortantes, sin que se modifique el nuevo esfuerzo total, el exceso de presión intersticial se disipa a una velocidad controlada por la permeabilidad k del suelo, con lo que el esfuerzo efectivo se va incrementando a medida que el agua fluye. Así, en la cuantía de la sobrecarga q , cuando se reduce la presión de poros que se habían incrementado se incrementa el esfuerzo efectivo: esto significa reducción de la relación de vacíos e incremento del esfuerzo efectivo. Por lo anterior se da el asentamiento del terreno por deformación del suelo que se ve afectado con el incremento de esfuerzos causado por la sobrecarga y el incremento de la resistencia al corte del suelo después de disiparse el exceso de presión de poros.

Al someter una masa de suelo saturado a un incremento de carga, ésta es soportada inicialmente por el agua contenida en los poros, ya que ella es incompresible

en comparación con la estructura del suelo. La presión que resulta en el agua a causa del incremento de la carga es llamada exceso de presión hidrostática. A medida que el agua drena de los poros del suelo, el incremento de carga es transmitido a la estructura del suelo.

La transferencia de carga es acompañada por un cambio en el volumen del suelo igual al volumen de agua drenada. Este proceso es conocido como consolidación.

Éste es un proceso que tiene un tiempo acotado de ocurrencia, comienza cuando se aplica el incremento de carga, y finaliza cuando la presión de los poros es igual a la hidrostática, o lo que es lo mismo, cuando se ha producido la totalidad de la transferencia de carga del agua a la estructura de suelo. Terminado este proceso llamado consolidación primaria, el suelo continúa deformándose, aunque en menor magnitud, debido a un reajuste de los granos. A este último proceso se lo denomina consolidación secundaria.

El asiento total, suponiendo que el último valor medido coincide con el momento en que desaparece toda la sobrepresión intersticial creada al aplicar la carga, es una medida de la deformación del esqueleto del suelo. Si se realizan varios escalones de carga, se obtendrá una curva de compresibilidad, que relaciona la presión efectiva (en escala logarítmica) con la deformación del esqueleto mineral, expresada por el índice de poros o relación de vacíos.

El propósito fundamental del ensayo de consolidación es determinar ciertos parámetros que se utilizan para predecir la velocidad y la magnitud del asentamiento de estructuras fundadas sobre arcillas. Además, el ensayo permite obtener información acerca de la historia de presiones a que ha sido sometido el suelo.

El tema de la compresibilidad se centra en el estudio de las variaciones de dimensión del suelo, (preferentemente en lo referente a su altura), en función de las cargas o esfuerzos aplicados al mismo.

El estudio de la compresibilidad se realiza fundamentalmente para arcillas o suelos arcillosos, y en estado de saturación. Cuando el incremento de carga es asumido

conjuntamente por las partículas minerales y el agua -que conforman el total del suelo-, la variación de presión intersticial, o presión de poro, obliga al agua a moverse a través del suelo, hasta disipar esa sobrepresión intersticial, con lo cual muchas propiedades del suelo varían con el tiempo en que se produce ese fenómeno. La expulsión de agua de los poros, que permite el reajuste de las partículas sólidas en los huecos que han quedado vacíos, es la base del fenómeno de la **consolidación**.

En general, el asentamiento del suelo causado por cargas se divide en tres amplias categorías:

El fenómeno de los depósitos de suelos, al situarse uno sobre otro, hace que los estratos inferiores sean sometidos a esfuerzos de compresión, que puede ser lenta a lo largo de muchos años, esta compresión se la denomina consolidación de los suelos y es necesario considerar algunas propiedades que los suelos tienen para entender mejor.

- La deformación de las partículas de suelo.
- El reacomodo de las partículas de suelo.
- Expulsión del agua y el aire que se encuentra dentro de los suelos.

♥Clases de Consolidación.-

Puede ser PRIMARIA o SECUNDARIA. Primaria, cuando cargado el suelo, la reducción de volumen se debe a la expulsión del agua, fenómeno en el que se transfiere la carga soportada por el agua al esqueleto mineral, esta es la consolidación propiamente dicha, típica del caso de los suelos de Ciudad de México y de la Torre de Pisa, y con la que nace la Mecánica de Suelos (Terzaghi, 1925). Secundaria, cuando la consolidación se da por reajuste del esqueleto mineral y luego de que la carga está casi toda soportada por éste y no por el agua.

Asentamiento inmediato: Provocado por la deformación elástica del suelo seco y de suelos húmedos y saturados sin ningún cambio en el contenido de agua. Los cálculos de los

asentamientos inmediatos se basan, generalmente, en ecuaciones derivadas de la teoría de la elasticidad.

Asentamiento por consolidación primaria: Es el resultado de un cambio de volumen en suelos saturados cohesivos debido a la expulsión del agua que ocupa los espacios vacíos.

Asentamiento por consolidación secundaria: Se observa en suelos saturados cohesivos y es resultado del ajuste plástico de la estructura del suelo. Éste sigue al asentamiento por consolidación primaria bajo un esfuerzo efectivo constante.

Evaluación de asentamientos. La *consolidación* impone la necesidad de evaluar la magnitud y la velocidad de los asentamientos. Si las deformaciones totales del terreno varían en la dirección horizontal, se producen asentamientos diferenciales. Si el suelo es altamente deformable, las sobrecargas altas producen asentamientos excesivos.

Si el suelo es un limo arenoso, la permeabilidad puede ofrecer asentamientos rápidos que suelen darse durante la construcción. Si el suelo es limo arcilloso, los asentamientos pueden prolongarse un tiempo importante después de terminada la obra.

Análisis de asentamientos. Pueden considerarse dos casos: asentamientos por una sobrecarga q en un área infinita, o asentamiento por sobrecarga q en un área de tamaño finito. Lo anterior se define según la extensión del área cargada en comparación con el espesor de la capa de subsuelo que se considera deformable.

Para el caso de un área cargada de extensión infinita, según Terzagui, las deformaciones y el flujo de agua se dan en una dimensión que es la dirección vertical, e interesa la permeabilidad vertical del suelo. En este caso se considerará el efecto de la sobrecarga constante a cualquier profundidad del terreno deformable.

Para el segundo caso, cuando el área cargada es pequeña (como suele darse en el caso de una zapata), es evidente la deformación tridimensional del subsuelo. Esta evaluación se hará teniendo en cuenta la variación del esfuerzo en profundidad y la rigidez o flexibilidad de la cimentación causante de la sobrecarga.

Suelos normalmente consolidados y sobreconsolidados.

Los yacimientos que se encuentran en un estado tal que la única carga de consolidación que ha actuado durante su historia es la actual geostática, y que es la máxima soportada hasta ahora, se dice que son *normalmente consolidados*.

♥Consideraciones Fundamentales sobre la Consolidación.-

Cuando un estrato de suelo saturado está sometido a un incremento de esfuerzos, la presión de poro del agua (expulsión del agua o aire de los espacios vacíos del suelo), aumenta repentinamente. En suelos arenosos que son altamente permeables, el drenaje causado por el incremento en la presión de poro del agua se lleva a cabo inmediatamente. El drenaje del agua de los poros en los suelos arenosos, el asentamiento inmediato y la consolidación se efectúan inmediatamente. Sin embargo, no es el caso para suelos arcillosos, que tienen baja permeabilidad. El asentamiento por consolidación depende del tiempo.

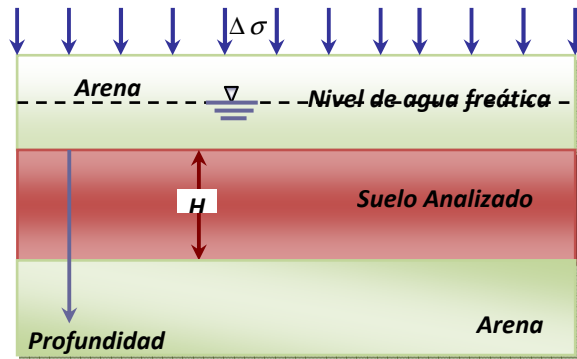
Así es como analizaremos la deformación de un estrato de suelo saturado sometido a un incremento de esfuerzos. Un estrato de suelo saturado de espesor H está confinado entre dos estratos de arena y sometido a un incremento instantáneo, es el *esfuerzo total* de $\Delta\sigma$. Del análisis de los *esfuerzos en una masa de suelo*, sabemos que,

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta\mu$$

donde: $\Delta\sigma'$ = incremento en el esfuerzo efectivo

$\Delta\mu$ = incremento en la presión de poro del agua

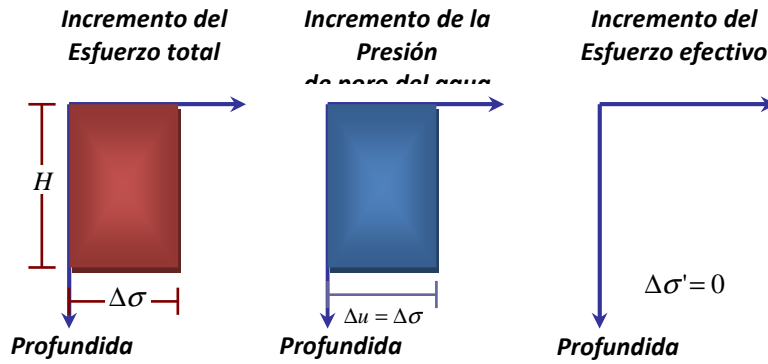
Figura No 15: Incremento de esfuerzos



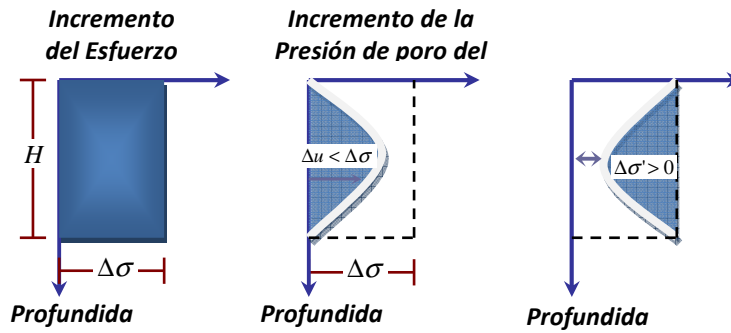
Como el suelo analizado tiene baja permeabilidad y el agua es incompresible comparada con el esqueleto del suelo, en el tiempo $t = 0$, el esfuerzo incrementado total, $\Delta\sigma$, será tomado por el agua ($\Delta\sigma = \Delta\mu$) a toda profundidad (figura 15). Ningún esfuerzo será tomado por el esqueleto del suelo; (es decir, el esfuerzo efectivo incrementado $\Delta\sigma' = 0$).

Después de la aplicación del esfuerzo incrementado $\Delta\sigma$ al estrato de suelo, el agua en los espacios vacíos empezará a ser expulsada y se drenará en ambas direcciones hacia los estratos de arena. Por medio de este proceso, el exceso de presión de poro del agua en cualquier profundidad sobre el estrato de suelo decrecerá gradualmente y el esfuerzo tomado por los sólidos del suelo (esfuerzo efectivo) se incrementará. Así entonces, en el tiempo $0 < t < \infty$, $\Delta\sigma = \Delta\sigma' + \Delta\mu$ ($\Delta\sigma' > 0$ y $\Delta\mu < \Delta\sigma$). Sin embargo, las magnitudes de $\Delta\sigma'$ y $\Delta\mu$ a diversas profundidades cambiará (figura 16), dependiendo de la distancia mínima de la trayectoria de drenaje a cualquiera de los estratos de arena, superior o inferior. Teóricamente, en el tiempo $t = \infty$, la presión de poro completa en exceso, se disipará por drenaje desde todos los puntos del estrato del suelo analizado, dando $\Delta\mu = 0$. el incremento de esfuerzo total $\Delta\sigma$, se tomará entonces por la estructura del suelo, por lo que: $\Delta\sigma = \Delta\sigma'$.

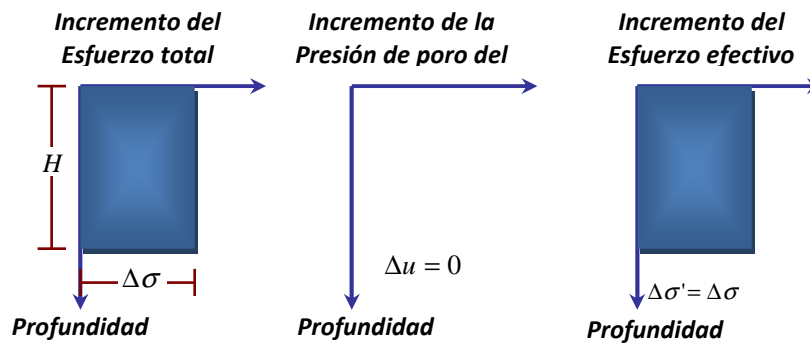
Figura No 16: Incremento de esfuerzos totales



(b) En el tiempo $t = 0$



(c) En el Tiempo $0 < t < \infty$



(d) En el Tiempo $t = \infty$

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO BÁSICO DE INFORMACIÓN

3.1.- INTRODUCCIÓN.-

Desde hace muchísimos años se sabe que los suelos blandos (arcillas de alta, media y baja compresibilidad), bajo la interacción de cargas, tienden al hundimiento, esto trae consecuencias importantes en las obras viales, ya que recortan el tiempo de vida útil planificado.

Es obvio que las presiones de poro influyen bastante en este proceso, ya que como es de suponer, si usted aprieta un suelo blando que se encuentre saturado, obtendrá una disminución de volumen, es decir la relación de vacíos disminuye y ésto porque el agua que ocupa el volumen de vacíos tiene la necesidad de retirarse del suelo; ésto implica un drenaje rápido del agua.

Muchas veces este fenómeno no es perceptible, debido a que generalmente las subrasantes están bajo estructuras más estables como los son las capas sub base y capa base, por lo que el ingeniero no considera las propiedades especiales que tienen las arcillas. Estas propiedades se refieren a que las mismas, en estado de saturación tienden a expandirse, pero en estado seco tienden a contraerse disminuyendo su volumen, muchas veces a una velocidad importante por lo que se producen deficiencias y asentamientos que traducen a fallas en la parte superior de los pavimentos.

El análisis de subrasantes en suelos arcillosos juega un papel importante ya sea para la elaboración de diferentes construcciones; para ésto se debe contar con datos seguros y abundantes respecto al suelo con el que se está tratando.

Se debe tomar en cuenta la manera de cómo se extrae el material para la realización del muestreo, se debe saber que características y requerimientos debe tener el suelo, estas

características y requerimientos están impuestos a las muestras obtenidas por programas de pruebas obtenidas en laboratorio.

3.2.- CRITERIO DE SELECCIÓN DE MUESTRAS.-

El criterio primordial para el desarrollo de este proyecto, es tener claro qué tipo de muestras se seleccionará para la ejecución del análisis de los suelos arcillosos de alta, media y baja compresibilidad.

El paso preliminar esencial para el diseño y la construcción de un proyecto de Ingeniería Vial es la investigación completa y detallada del lugar seleccionado, en cuanto se refiere al estudio del suelo con el cual se va trabajar, mediante la ejecución de pruebas de laboratorio que permitan determinar sus características y propiedades; pero, para llegar en el laboratorio a unos resultados razonablemente dignos de crédito es preciso cumplir en forma adecuada una etapa previa e imprescindible: La obtención de las muestras de suelo apropiadas para la realización de las correspondientes ensayos de laboratorio.

Las muestras pueden ser de dos tipos: alteradas o inalteradas. Se dice que una muestra es: **Alterada:** Cuando no guarda las mismas condiciones que cuando se encontraban en el terreno de donde procede y se recolecta a medida que se va realizando el muestreo, e **Inalterada:** Es aquella muestra que preserva, en la medida de lo posible, la estructura y el contenido de humedad para que represente realmente las condiciones de campo.

Para la ejecución de este proyecto de Grado, las muestras con la que se trabajó son de tipo alterado y inalterada.

Las muestras para ser llevadas al laboratorio fueron extraídas según están descritas en el punto.

Obtención de Muestras.- Todas las muestras recolectadas fueron aquellas que tenían características de Suelos Arcillosos Inorgánicos. La mayoría de las muestras se las extrajo

del suelo natural a nivel de sub rasante porque en ese lugar se estaba realizando el corte para la apertura de la vía.

➤ **TOMA DE MUESTRAS.-**

El objetivo es realizar la extracción o muestreo adecuado y representativo para poder determinar de forma correcta las características y propiedades del suelo mediante ensayos de laboratorio.

➤ **Equipo utilizado para la Recolección de Muestras.-**

El material utilizado para la extracción de las muestras es el siguiente:

- Pico.
- Pala.
- Bolsas.

➤ **Descripción del Procedimiento a Realizar.-**

El procedimiento para la obtención de muestras para el caso de cortes, es el que se describe a continuación:

- & Se retira la capa de despalme superficial limpiando el lugar de extracción evitando de esta manera, que el suelo recolectado sufra alguna mezcla.
- & Se quita el material seco y o suelto para obtener una superficie limpia de donde se pueda obtener la muestra.
- & Se excava en forma de canales verticales de sección más o menos uniforme desde la parte superior hasta el fondo.
- & Se recoge todo el material excavado, se coloca en una bolsa con su etiqueta de identificación para posteriormente llevarlo a laboratorio.

Para las muestras en donde no había corte el procedimiento para la obtención de la muestra se procede.

& Se debe excavar un hueco de profundidad de 50 cm, a partir de éste nivel extraer la muestra y colocarlo en una bolsa con su etiqueta de identificación para posteriormente llevarlo al laboratorio.

➤ **Obtención de Muestras.-**

Para la realización de la presente práctica se obtuvieron muestras de 6 lugares diferentes de la ciudad de Tarija los cuales se describen a continuación:

1.- Como se describe en la Figura Nro. 23, se observa que la muestra de arcilla fue obtenida del parque las Barrancas y Av. Panamericana ex parada del Norte; se escogieron estos lugares para la extracción, debido a que estos materiales a simple vista presentaban características aptas para la práctica que requiere este proyecto.

Figura Nro. 23 Extracción de la muestra de Arcilla Barranca



2.- Como se describe en la Figura Nro. 24, se observa que la muestra de arcilla fue obtenida en el Barrio Bartolomé Attard, (de la parada del micro B a la mano derecha), y Mercado del Sur se escogieron estos lugares para la extracción, debido a que estos materiales a simple vista presentaban características aptas para la práctica que requiere este proyecto.

Figura Nro. 24 Extracción de la muestra de Arcilla Bartolomé



3.- Como se describe en la Figura Nro. 25, se observa que la muestra de arcilla fue obtenida de Torrecillas, pasando El Portillo (a mano derecha) y Miraflores, se escogieron estos lugares para la extracción, debido a que estos materiales a simple vista presentaban características aptas para la práctica que requiere este proyecto.

Figura Nro. 25 Extracción de la muestra de Arcilla Torrecillas



3.3.- ANÁLISIS DE ARCILLAS DE ALTA, MEDIA Y BAJA COMPRESIBILIDAD (RECOPIACIÓN DE DATOS).-

Al tener las 6 muestras obtenidas en campo con cierta humedad natural, se procedió a realizar los cálculos de gabinete para determinar que arcilla y cuál era su compresibilidad para comenzar a trabajar a base de estos datos.

A continuación se indicará la realización de la recopilación de información en la siguiente práctica:

1. El primer paso, una vez obtenida la muestra se procedió a dejar en el horno por 24 hr, una muestra (terrón) del material extraído para determinar su contenido de humedad. Para así proseguir con la realización de ensayo de límites de Atterberg, para así determinar la plasticidad de las arcillas. Este paso se procedió a realizar con las 6 muestras extraídas de campo así pudiendo determinar las arcillas de Alta, Mediana y Baja compresibilidad.
2. Posteriormente, se procedió a realizar todos los ensayos requeridos, donde se procedió a realizar los cálculos de gabinete y así realizar un análisis empírico donde corroboró la existencia de parámetros que relacionan entre la Compresibilidad y la Densidad In Situ, de

los suelos arcillosos con lo que se llegará a la conclusión de determinar asentamiento con materiales no aptos para la conformación de la subrasante.

3.4.- ENSAYOS REALIZADOS.-

Para el presente proyecto son necesarios los siguientes ensayos para llegar a nuestro objetivo principal:

1) Ensayo de Granulometría y Clasificación por los 2 métodos SUCS y AASTHO.-

Se procedió a la respectiva extracción de muestra, de 6 lugares diferentes de la ciudad de Tarija el primero fue obtenido del parque las Barrancas y Av. Panamericana ex parada del Norte; la segunda muestra fue obtenida en el Barrio Bartolomé Attard, de la parada del micro B (a la mano derecha) y Mercado del Sur, y la tercera muestra fue obtenida de Torrecillas pasando El Portillo a (mano derecha) y Miraflores, luego se procedió a llevarlas al laboratorio, para después proseguir con el tamizado de la muestra traída de los 6 lugares, después se procedió a realizar la granulometría, y así determinar el tipo de arcilla. El equipo utilizado fue el siguiente:





Equipo

- Juego de tamices
- Balanza de 0.1 y 0.01 gramos de aproximación

Otros accesorios, bandejas, cucharas, etc.

2) Ensayo de Límites de Atterberg .-

Después de terminar el anterior ensayo se procedió a realizar el ensayo de los límites de Atterberg, para determinar los Límites Líquido, Plástico y el Índice de Plasticidad, para así determinar las arcillas de alta, media y baja compresibilidad, para los cuales se utilizó el siguiente equipo:

Equipo común.

- Tamiz N° 40
- Horno Secador 105 a 110°C.
- Balanza de precisión de 0.01 gr.
- Platos u otros recipientes.

Limite Líquido.

- Equipo de Casagrande.
- Ranurador.
- Espátula.
- 5 taras pequeñas.

Límite plástico.

- 3 Taras pequeñas.
- Base de vidrio.

El Procedimiento utilizado para determinar los límites de Atterberg fue el siguiente:

Para el Límite Líquido.

- Se ubicó el aparato de Casagrande en una superficie plana, segura y limpia, después se calibró la altura de caída de la copa, con la espátula se colocó la muestra suavemente, tratando siempre que sea de manera horizontal, sobre la copa de Casagrande, eliminando el aire entrampado y limpiando aquella muestra que se encuentre pegada en los alrededores de la copa. Se procedió a realizar la ranura, para después seguir con los golpes, se esperó a que se produzca una unión de aproximadamente 1.27 cm, y se anotó el número de golpes. Se extrajo la porción de suelo entre los cortes y se procedió a depositarla en una de las cápsulas para el respectivo pesaje y colocación en el horno, con lo que se obtuvo el peso seco.



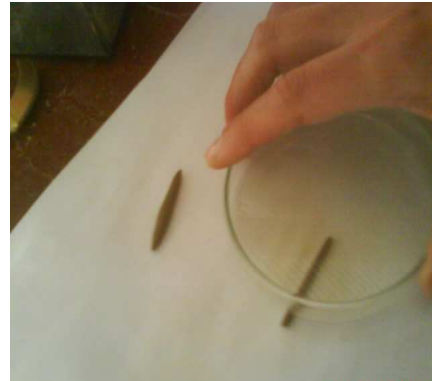
Para el Límite Plástico.

- Para la determinación de éste se mezcló homogéneamente el material; luego en una superficie plana y limpia se tomó con las manos una porción de material y se

procedió a amasarlo en forma de rollito, hasta que pueda ser manipulado plásticamente y se tuvo un diámetro aproximado de tres milímetros (3mm): presentó rajaduras por lo que con la espátula se cortaron pequeños trocitos del material y seleccionando aquellos que se encuentren con las rajaduras, para luego introducirlos al horno y obtener su peso en seco.

El Índice de plasticidad fue determinado mediante la siguiente fórmula que es igual a la diferencia del Límite Líquido y Plástico.

$$I_p = LL - LP$$



3) Ensayo del Hidrómetro.-

Se procedió a preparar 125 ml. de solución (agua con defloculante), el porcentaje del defloculante es aproximado en un 4% en peso de lo que pesa 1000 ml. de agua, se colocó la muestra en un recipiente para mezclarlo con los 125 ml de solución al 4% de defloculante, después de sedimentar durante 24 horas se lo batió durante un periodo de 1 minuto se vació a una probeta graduada (que se llamará probeta de sedimentación), y se aumentó agua común hasta llegar a los 1000 ml.

Luego de sacudir la probeta, ponerla sobre la mesa e introducirlo el hidrómetro tomando lecturas en los siguientes intervalos de tiempo 1, 2, 3, 4 minutos, realizando igualmente lecturas del termómetro, se tomó una lectura para corrección de menisco en el hidrómetro

dentro del cilindro de control. El proceso se volvió a repetir, comparando los resultados de las mediciones anteriores, si existe concordancia con el incrementando los tiempos de mediciones, de tiempo de 8, 15, 30, 60 minutos.

Los cálculos realizados en gabinete fueron los siguientes:

Aplicar la corrección de meniscos a las lecturas de hidrómetro para obtener el valor de L.

Si el grupo realizó el ensayo del peso específico de los suelos, entonces corresponde adoptar su valor, caso contrario adoptar el valor de $G_s = 2.70 \text{ (g/cm}^3\text{)}$.

Con G_s y la temperatura de ensayo para cualquier lectura del hidrómetro, para obtener el valor correspondiente de K.

Con los valores de L, K, y el tiempo transcurrido (t min), calcular el valor de D, con la siguiente ecuación.

$$D = K * \sqrt{\frac{L}{t}} \quad (\text{mm})$$

D = Diámetro de la partícula

L = Profundidad efectiva de caída de las partículas en un tiempo dado.

K = Constante de las características del suelo

Calcular la lectura corregida del hidrómetro a través de la siguiente formula.

$$R_c = R_{real} - \text{corrección de cero} + C_t$$

R_c = Lectura corregida del hidrómetro

R_{real} = Lectura directa del hidrómetro.

C_t = Corrección por temperatura.

La corrección de cero se presenta cuando existan lecturas negativas en el hidrómetro.

Utilizando el resultado de la ecuación (1-2), se calcula el porcentaje más fino correspondiente al diámetro de la partícula D

$$\text{porcentaje más fino} = Rc * \frac{a}{W_s} * 100$$

W_s = Peso original de suelo colocado en la suspensión, g.

a = Factor de corrección para el peso unitario de sólidos

Imágenes de la realización del ensayo del Hidrómetro



Obteniendo así todos los datos necesarios para continuar con los siguientes pasos:

4) Ensayo de Compactación.-

Para éste se utilizó material granular con humedad natural, en el primer espécimen se toma un muestra significativa de 3 kg, para luego proceder al compactado de 3 capas cada una de

25 golpes, en el molde de T-99 con un martillo de T-180 (el cual pesa 10 lbs.), (aclaramos que se utilizó este martillo para darle mayor grado de compactación ejerciendo así más energía).



Compactación Estándar y Modificada.-

A) Equipo:

- Molde de metal de 944 cm³. (Estandar T-99)
- Molde de 2124 cm³(modificada T-180)
- Collarín movable.
- Base metálica con mecanismo de ajuste.
- Martillo de 5 lb, y altura de caída de 12''
- Enrasador metálico.
- 5 bandejas con capacidad de 3.5 Kg.(T-99)
- 5 bandejas con capacidad de 6.5 Kg.(T-180)
- Probeta graduada de 1000 cc.
- Horno de temperatura 105 – 110°C.
- Balanza de 0.1 y 0.01 gr. de aproximación
- Poruñas y otras menores.

B) Objetivo:

El estudiante debe aprender a realizar la compactación con el proctor estandar y modificado, sabiendo disponer las humedades adecuadas, para que el suelo forme una curva de compactación que relacione densidades con humedades y obtener los valores máximos que serán referenciales en el control de calidad para la compactación en obra.

C) Muestra:

La muestra debe estar suelta y disgregada, preferiblemente seca, es preferible conocer la granulometría del material, por que dependerá de ella la elección del método adecuado para la realización ya sea del proctor estándar o del modificado.

Se puede recomendar también, que para suelos arcillosos siempre se debe compactar con el proctor de T – 99.

Métodos de Compactación:

Tabla 1: Especificación para la prueba Proctor estandar (basadas en las 698-91 de la ASTM).

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del Pisón	24.4 N	24.4 N	24.4 N
Altura de caída del Pisón	304.8 mm	304.8 mm	304.8 mm
Número de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas	3	3	3
Energía de compactación.	591.3 KN-m/m ³	591.3 KN-m/m ³	591.3 KN-m/m ³
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla N°4 (4.75 mm). Se usa si 20% o menos por peso de material es retenido en la malla N° 4	Porción que pasa la malla de 9.5 mm. Se usa si el suelo retenido en la malla N° 4 es más del 20%, y 20% o menos por peso es retenido en la malla de 9.5 mm.	Porción que pasa la malla de 19mm. Se usa si más de 20% por peso de material es retenido en la malla de 9.5mm, y menos de 30% por peso es retenido en la malla de 19 mm.

Tabla 2: Especificación para la prueba Proctor modificado (basadas en las 698-91 de la ASTM).

Concepto	Método A	Método B	Método C
Diámetro del molde	101.6 mm	101.6 mm	152.4 mm
Volumen del molde	943.3 cm ³	943.3 cm ³	2124 cm ³
Peso del Pisón	44.5 N	44.5 N	44.5 N
Altura de caída del Pisón	457.2 mm	457.2 mm	457.2 mm
Número de golpes del pisón por capa de suelo	25	25	56
Número de capas	5	5	5
Energía de compactación.	2696 KN-m/m ³	2696 KN-m/m ³	2696 KN-m/m ³
Suelo por usarse	Porción que pasa la malla N°4 (4.75 mm). Se usa si 20% o menos por peso de material es retenido en la malla N° 4	Porción que pasa la malla de 9.5 mm. Se usa si el suelo retenido en la malla N° 4 es mas del 20%, y 20% o menos por peso es retenido en la malla de 9.5 mm.	Porción que pasa la malla de 19 mm. Se usa si más de 20% por peso de material es retenido en la malla de 9.5 mm, y menos de 30% por peso es retenido en la malla de 19 mm.

D) Metodología:

- ⌘ Es necesario conocer la humedad inicial, para dar inicio al control de agua que se agregará al suelo.
- ⌘ Para el T-99, se debe preparar aproximadamente 15 a 20 Kg, de suelo, para el T-180 de 30 Kg como mínimo.

- ✘ Se divide el suelo en cinco fracciones iguales y homogéneas en su humedad.
- ✘ A cada fracción se le incrementará un pequeño porcentaje de agua, para ir cambiando su densidad de acuerdo a los cambios de humedad.

5) Ensayo de CBR.-

Las muestras serán en una cantidad de 5000 gramos, se procederá a la obtención de 18 CBR, son 5 capas cada una recibirá 12, 25 y 56 golpes y su preparación tiene los siguientes pasos:

- Compensación de material.

Se tiene que realizar una compensación del material en forma similar a la realizada en el ensayo de Compactación. Hacer pasar el material por el tamiz $\frac{3}{4}$ " y N°4, se descarta lo retenido en $\frac{3}{4}$ ", y se compensa por peso con el material intermedio de $\frac{3}{4}$ " y N°4.

- Humedad del suelo.

Una vez compensado el material, se calculó el contenido de humedad actual del suelo. A éste se agregó agua hasta que el material obtuvo el valor de la humedad óptima.

Se supone que el tener el suelo su humedad óptima, esté compactado obtendrá su densidad máxima.

Una vez realizado los anteriores pasos, se procedió a mezclar el material para su respectiva homogenización.

Compactación:

- a) Se ensambla el molde a la base perforada, luego se introduce el disco espaciador y ajustar el collarín al equipo.
- b) Sobre el collarín se pondrá un papel filtro, para que no se pegue el material al disco y no existan pérdidas de material fino.
- c) Se introduce el material en cinco capas, en cada capa aplicar una carga dinámica de 12, 25 y 56 golpes, para eso utilizar el martillo de 10 libras y 18 "de caída.

- d) Luego se quitó el collarín para el respectivo enrasado, de tal manera que se nivele la cara del molde.
- e) Se afloja el molde metálico de sus soportes, se separa de la base para quitar el disco espaciador, luego se volteará el mismo para volver a ajustar a su base con la cara enrasada hacia abajo, (antes de ésto poner papel filtro en la base perforada).
- f) Se pesó el molde con la muestra más la base, para así determinar su densidad y humedad ensayadas.

Expansión del Material:

- a) Luego de pesar el material, se coloca sobre este otro papel filtro, para colocar sobre este el plato perforado y vástago regulable.
- b) Sobre el plato poner pesas de plomo igual a 10 libras.
- c) Antes de someter el molde a la saturación, se debe haber medido la altura real del espécimen.
- d) Se debe introducir todo el molde dentro de un tanque o depósito con agua cuyo nivel se encuentre un centímetro por debajo del nivel superior del molde.
- e) Se montará el trípode con un extensómetro cuyo vértice inferior se conecte con la cabeza del vástago, en ese punto se debe tomar una lectura inicial.
- f) Cada 24 horas por un periodo de 96 horas (cuatro días), se toman y registran las lecturas de extensómetro.
- g) La diferencia entre lectura final y la inicial en valor absoluto en centímetros, dividida entre la altura real del molde, también en centímetros multiplicada por cien, proporcionan el valor de la expansión que sufrió el material.

Resistencia a la Penetración:

- a) Luego de los cuatro días de saturación, se drenará de manera inclinada durante 15 minutos aproximadamente, para instalar el molde en la prensa y asentar el pistón de penetración sobre el espécimen.

- b) Se hincó el pistón manteniendo una velocidad de 0.05 pulgadas por minuto y se leen las cargas totales necesarias en 0.025", 0.05", 0.075", 0.1", 0.2", 0.3", 0.4", 0.5".
- c) Una vez que se hincó el 0.5" del pistón, se suelta la carga, se retira el molde de la prensa y se quitan las pesas, para pesar el mismo y registrar el dato.
- d) Seguidamente se extraen tres muestras, para el contenido de humedad, la muestra del fondo, de la superficie y a 2" de profundidad desde la superficie.

Cálculos.

El peso unitario de la muestra es:

$$\gamma_{uh} = \frac{P_{mh}}{Vol_{molde}}$$

Donde:

γ_{uh} = Peso unitario de la muestra húmeda

P_{mh} = Peso muestra húmeda.

Peso unitario de la muestra seca

$$\gamma_{ms} = \frac{\gamma_{uh}}{100 + w\%} * 100$$

Donde:

γ_{ms} = Peso Unitario de la muestra seca.

w % = Porcentaje de humedad.

La expansión:

$$\% \text{ exp} = \frac{|L_f - L_i|}{h} * 100$$

Donde:

Lf = Lectura final del extensómetro (cm)

Li = Lectura inicial del extensómetro (cm)

h = Altura total del espécimen.

La determinación del CBR, se realizará para las penetraciones de 0.1”y 0.2”, en sus correspondientes cargas calculadas.

Para 0.1” tenemos:
$$CBR = \frac{C \text{ arg } a [Kg / cm^2]}{70.31 [Kg / cm^2]} * 100$$

Para 0.2” tenemos:
$$CBR = \frac{C \text{ arg } a [Kg / cm^2]}{105.4 [Kg / cm^2]} * 100$$

Es necesario considerar lo siguiente:

“Si los CBR para 0.1” y 0.2” tienen la similitud, se recomienda usar el valor del 0.2”.

“Si el CBR de 0.2” es muy superior al 0.1”, deberá repetirse el ensayo”.

Curva: Carga - Penetración:

- a) Se realizará una escala correspondiente considerando los valores máximos y mínimos de la carga por centímetro cuadrado.

- b) Se pintarán los puntos, haciendo que las abscisas sean los valores de penetración y las ordenadas las cargas aplicadas. Luego estos puntos se deben unir con líneas respetando su nacimiento.
- c) Si es que una curva nace desde el eje de las penetraciones, se medirá la distancia hacia el origen, luego esta distancia se mide desde los vales de 0.1” y 0.2” hacia la derecha, levantando perpendiculares de las abscisa hasta la curva, entonces dará un nuevo valor de la carga aplicada y por lo tanto un CBR, corregido.
- d) Si es que una curva presenta concavidad hacia arriba, se debe trazar una tangente por el punto de inflexión de la misma y cortar a las abscisas; este punto será el nuevo origen de la curva procediendo a los pasos del inciso c)

Curva: CBR –Peso Unitario:

- a) Se dibuja considerando escalas adecuadas, entonces como abscisas se representan los CBRs, y como ordenadas los pesos unitarios secos.
- b) En este gráfico se debe identificar la Densidad Máxima, con una línea horizontal cortar a la curva e inmediatamente con una perpendicular encontrar el valor del CBR al 100% de la Densidad Máxima.
- c) Se puede calcular otros CBR, bastando sacar el porcentaje requerido (95%, 90%, etc) a la densidad máxima e ir nuevamente a la gráfica.

Curva: Expansión – Peso Unitario:

- a) En el eje de las abscisas se grafican las expansiones y las ordenadas de los pesos unitarios de la muestra seca.
- b) De nuevo se considera la densidad máxima para sacar la expansión al 100% de la densidad máxima, cortando con una horizontal este valor a la curva y perpendicular al valor de la expansión.



Se procedió a realizar todos los ensayos arriba mencionados, con los 6 muestras de los distintos lugares donde se extrajo el material, Torrecillas, Miraflores, Bartolomé Attard, Mercado del Sur, Barrancas y Av. Panamericana

6) Ensayo de Densidad In Situ.-

Donde el procedimiento es el siguiente:

- Se limpia el sitio escogido, se instala la placa, si es posible ajustarla con clavos.
- Se procede a excavar un hoyo de profundidad de acuerdo al espesor de la capa compactada, puede variar entre 15 a 20 cm.
- El material que se extrae se guarda en un recipiente donde no pueda perder humedad, éste servirá para obtener el peso del suelo húmedo retirado del hoyo.
- Luego se ajusta la llave de paso, se vuelca el equipo y se instala sobre la placa, seguidamente se abre la llave y se deja caer la arena hasta que el hueco y cono se llenen.
- Se procede a cerrar el cono para después pesar el equipo con el saldo de arena que queda después del ensayo.
- La arena que queda en el hoyo, se tiene que recuperar en otro recipiente para realizar un lavado de la misma.

Se procedió a realizar el ensayo de Densidad In Situ de los seis lugares donde se extrajo la muestra, Torrecillas, Miraflores, Bartolomé Attard, Mercado del Sur, Barrancas y Av. Panamericana.





7) Ensayo de Consolidación..-

Donde se procedió a realizar lo descrito a continuación:

La prueba consiste en aplicar carga a un espécimen de suelo confinado lateralmente, de tal manera, que se deforme en una sola dirección, existen dos modelos de consolidómetros para la ejecución de ésta prueba:

- a) Consolidómetro de anillo fijo
- b) Consolidómetro de anillo flotante o libre.

Las características de compresibilidad de un suelo suelen determinarse a partir de pruebas de consolidación usando un aparato llamado edómetro (consolidómetro de anillo fijo), estas características dependen del tipo de suelo a ensayarse y del estado en que se encuentra.



Objetivo.-

La finalidad es determinar el grado del cambio brusco de volumen (asentamiento) de una muestra de suelo, sometiéndola a una serie de incremento de presión o carga.

Suelo a Utilizarse.-

El suelo a utilizarse es arcilloso inorgánico, remoldeado, de tal manera, que sus características sean iguales a la de una muestra alteradas o inalteradas.

Equipo y Accesorios.-

- Un Aparato de Carga que aplica la presión mediante un sistema de placa, marco y colgador de pesas de 120 Kg. de Capacidad provisto de un lector de Deformación (Micrómetro) de 0.01 mm. de precisión.



- Un consolidómetro, equipo compuesto de una caja cilíndrica fija, un anillo de 63 mm de diámetro y 24 mm. de altura con los bordes cortantes para tallar la muestra y además, posee un collarín desmontable, dos discos perforados, dos discos de papel filtro, un bloqueo de carga y un vástago o pistón con placa para la transmisión de carga.



- Un juego de masas o pesas cuya magnitud de peso está condicionada para alcanzar las presiones de ensayo.



- Balanza digital con una capacidad de 6000 grs. y una precisión de 0.01 grs.



- Horno eléctrico de secado con circulación de aire y temperatura regulable capas de mantenerse a $110 \text{ }^\circ \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$.
- Herramientas y accesorios como ser: cuchillo, espátula, recipientes, platos, escobilla, toalla y un cronómetro.

➤ **Procedimiento:**

Una vez obtenido el pastón de suelo con la densidad deseada se procede a sacar la muestra inalterada del pastón para realizar el ensayo de consolidación.

- Pesarse el anillo (W_{ta}) y medir su altura que será la altura inicial de los especímenes (H_o), para luego con ayuda de éstos aprovechando sus bordes cortantes y la ayuda del extractor, tallar la muestra y obtener el espécimen de suelo del núcleo del pastón de suelo.



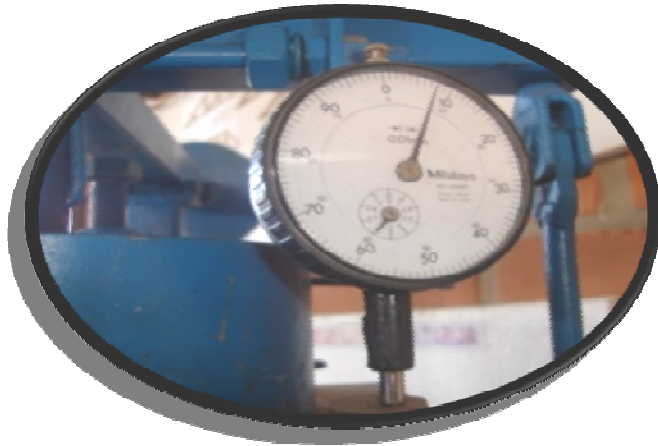
- El anillo con espécimen de suelo que va a ser ensayado, conducirlo al aparato de carga, a la caja cilíndrica fija, colocar las partes del consolidómetro en este orden: disco perforado, papel filtro, anillo con el espécimen de suelo, papel filtro y el segundo disco perforado.



- Después se coloca por encima del conjunto edométrico el vástago con placa, previniendo que sólo haga contacto y no ejerza presión aún.
- Se le aplica una carga inicialización de $0,05 \text{ kg/cm}^2$ para suelos blandos y de $0,10 \text{ kg/cm}^2$ para suelos firmes. Sin retirar esta carga se lleva a cero el micrómetro.
- Se debe de saturar el espécimen durante 24 horas antes de comenzar a realizar la lectura de deformaciones.



- La compresión de la muestra consiste en aplicar el siguiente incremento de presiones en kg/cm^2 : 0.125; 0.250; 0.50; 1.0; 2.0 en cada una de ellas se registra la lectura de deformación que marca el micrómetro en los siguientes tiempos 2, 6, 15, 30, 45 segundos; 1, 2, 4, 6, 9, 12, 16, 20, 25, 30 minutos; 1, 2, 4, 8, 16, 24 horas.
- Una vez cargado el aparato y listo para la transmisión de esfuerzo, suelto el bloqueo de carga, comienza el ensayo, las deformaciones que sufre el espécimen de suelo se registran por medio de un micrómetro, y un cronómetro permite conocer los tiempos que transcurren para alcanzar una deformación del suelo progresiva.



Para cada uno de los incrementos de esfuerzo, se lleva un registro de la forma como progresa la deformación a través del tiempo haciendo uso del micrómetro y el cronómetro.



- Después de la aplicación de la último esfuerzo de 2 kg./cm^2 se procede: A la activación del bloqueo de carga, descargar el aparato de carga, levantar el vástago con placa, sacar con cuidado el conjunto edométrico.
- Pesar el anillo con suelo saturado (W_{2t}), para esto, podemos utilizar una cápsula y ahí colocar el anillo más suelo para pesar todo el conjunto.



- Luego llevar hacia el horno todo ese conjunto para que después de 24 horas de secado, obtener peso del espécimen de suelo seco más anillo y cápsula (W_{3t}).

➤ **Procesamiento de Datos**

Cálculo de humedades y deformación volumétrica al inicio y final de la prueba.

- Calcular el área de la probeta del espécimen de suelo A (cm^2)

$$A = \pi * \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

Donde: D = Diámetro interior del anillo (cm).

- Calcular el volumen V (cm^3)

$$V = A * H_o$$

Donde: H_o = Altura inicial de la probeta (cm)

- Calcular el contenido de humedad final w_f (%) del espécimen del suelo (suponiendo $S = 100$ %)

$$w_f = \frac{W_2 - W_3}{W_3} * 100$$

Donde: W_2 = Peso del espécimen de suelo saturado

- Calcular la altura de los sólidos H_s (cm)

$$H_s = \frac{W_3}{G_s * \gamma_w * A}$$

Donde: G_s = Gravedad de los sólidos o peso específico relativo

γ_w = Peso específico del agua (valor ≈ 1 gr./cm.)

- Calcular la altura inicial de vacíos H_{vo} (cm)

$$H_{vo} = H_o - H_s$$

- Calcular la relación de vacíos inicial e_o

$$e_o = \frac{H_{vo}}{H_s}$$

- Calcular la altura final del espécimen H_f (cm)

$$H_f = H_o - \Delta H$$

Donde: ΔH = La deformación total del espécimen de suelo

- Calcular la altura final de vacíos Hv_f (cm)

$$Hv_f = H_f - H_s$$

- Calcular la relación de vacíos al finalizar el ensayo e_f

$$e_f = \frac{Hv_f}{H_s}$$

Cálculo de la deformación volumétrica para cada estado o incremento de carga de esfuerzo (i = estado de presión ensayada, $i = 1$ para $p = 0.125$ Kg./cm², $i = 2$ para $p = 0.25$ Kg./cm² y así sucesivamente)

- Lectura del micrómetro al final del estado de esfuerzo analizada ΔH_i (mm) (cm.)
- Cálculo de la altura final parcial de la muestra

$$Hf_i = H_i - \Delta H_i$$

Donde: H_i = Altura del espécimen al inicio del estado de presión analizado

- Calcular la altura promedio \bar{H}_i (cm)

$$\bar{H}_i = \frac{H_i + Hf_i}{2}$$

- Calcular la altura de vacíos Hv_i para cada incremento de carga

$$Hv_i = Hf_i - H_s$$

- Calcular la relación de vacíos e_i para cada incremento de carga

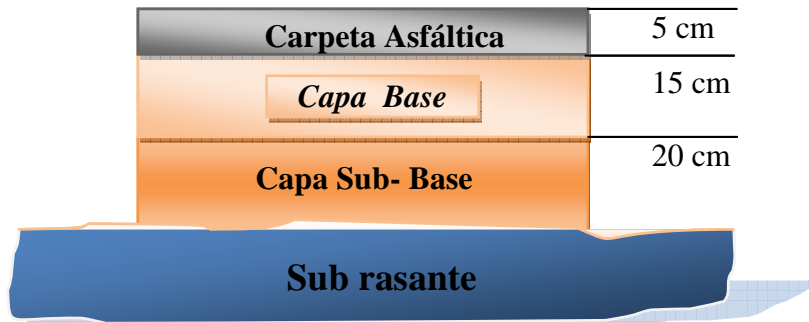
$$e_i = \frac{Hv_i}{H_s}$$

- Calcular la deformación unitaria ε para cada incremento de carga

$$\varepsilon = \frac{\Delta H_i}{H_o}$$

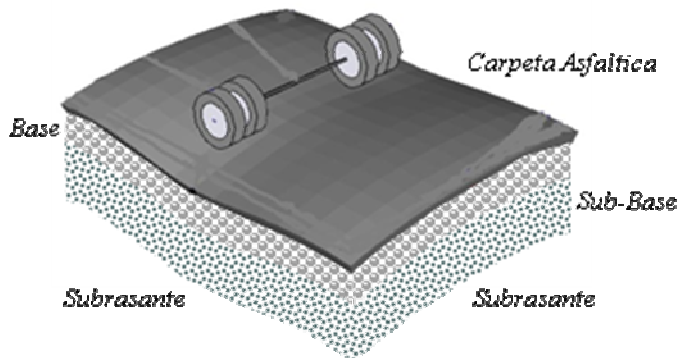
➤ **Características del Paquete Estructural:**

El paquete estructural que se tomó en cuenta para el cálculo de gabinete:



Después de la obtención de los datos requeridos se procedió a realizar los siguientes cálculos de gabinete:

CONDICIONES INICIALES DE PRESIÓN



PRESIÓN EN SITIO DEBIDO AL PAVIMENTO:

<u>Carpeta Asfáltica:</u>		
Altura de capa (m) =	0,05	Presión (Kg./cm ²)
Peso específico (Kg/m ³) =	2270	0,01135
<u>Capa Base:</u>		
Altura de capa (m) =	0,15	Presión (Kg./cm ²)
Peso específico (Kg/m ³) =	2212	0,03318
<u>Capa Sub Base:</u>		
Altura de capa (m) =	0,2	Presión (Kg./cm ²)
Peso específico (Kg/m ³) =	2150	0,043
Presión in situ :	$\sigma'_0 =$	0,0875 (Kg./cm ²)

INCREMENTO DE PRESIÓN DEBIDO A LA CARGA DE TRÁFICO:

Datos necesarios:

Capacidad de Soporte C.B.R. (%) =	1,9
Carga Equivalente (kg.) =	4313,35
Área de contacto circular (cm ²) =	176,7

Incremento de Presión:	$\Delta \sigma' =$	24,411	(Kg./cm ²)
Total Presión actuante:	$\sigma'_0 + \Delta \sigma' =$	24,498	(Kg./cm ²)

Después se procedió a realizar el cálculo de asentamiento, donde la gráfica a continuación dibujada se realizó con los siguientes datos:

Saturada		No saturada	
Presión Kg/cm ²	ei	Presión Kg./cm ²	ei
0,01	0,432	0,01	0,436
0,125	0,425	0,125	0,427
0,25	0,375	0,25	0,410
0,5	0,337	0,5	0,387
1	0,303	1	0,376
2	0,255	2	0,358

$$\sigma'_0 = P = 0,08753 \text{ (Kg./cm}^2\text{)}$$

$$\sigma'_0 + \Delta \sigma' = 24,4981129 \text{ (Kg./cm}^2\text{)}$$

$$e = 0,5$$

Estimación de $\sigma'_c = 0,111 \text{ (Kg./cm}^2\text{)}$

$$e = 0,5$$

$$\frac{\sigma'_c}{\sigma'_0} = 1,268$$

> 1.5 Preconsolidado
Preconsolidado 0.8 - 1.5 Normalmente Consolidado

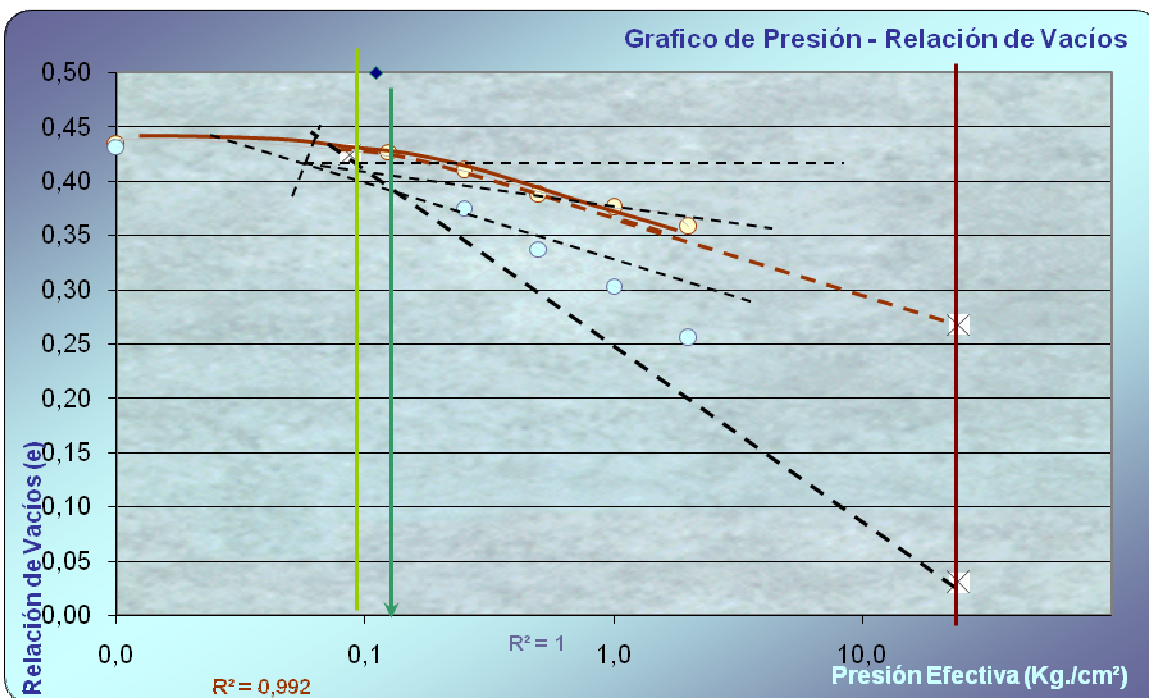
$$e'_0 = 0,425$$

Estimación de $e'_0 = 0,425$
si $X = 0,08753$

$$\Delta e_1 = 0,157$$

Estimación de $e_1 = 0,268$
si $X = 24,4981129$

Estimación de $\Delta e_2 =$
 $e_2 = 0,238$
 $0,03$
 si $X = 24,4981129$



DEL GRÁFICO SE OBTIENEN LOS SIGUIENTES DATOS:

Presión de Preconsolidación: $\sigma'_c = 0,111$
 $\sigma'_c / \sigma'_0 = 1,268$ > 1.5 Preconsolidado
 Normalmente Consolidado

$e_0' = 0.8 - 1.5$ Normalmente Consolidado
 e correspondiente a la presión in situ: $\Delta e_1 = 0,425$
 Desplazamiento del espécimen 1: $\Delta e_2 = 0,157$
 Desplazamiento del espécimen 2: $0,238$

$H = 900$ Profundidad del estrato de suelo (mm)

Aplicando las ecuaciones para el cálculo del Asentamiento:

Asentamiento del suelo sin cambio en el contenido de humedad:

$$S_1 = \frac{\Delta e_1}{1 + e'_0} (H) = 99,16 \text{ mm}$$

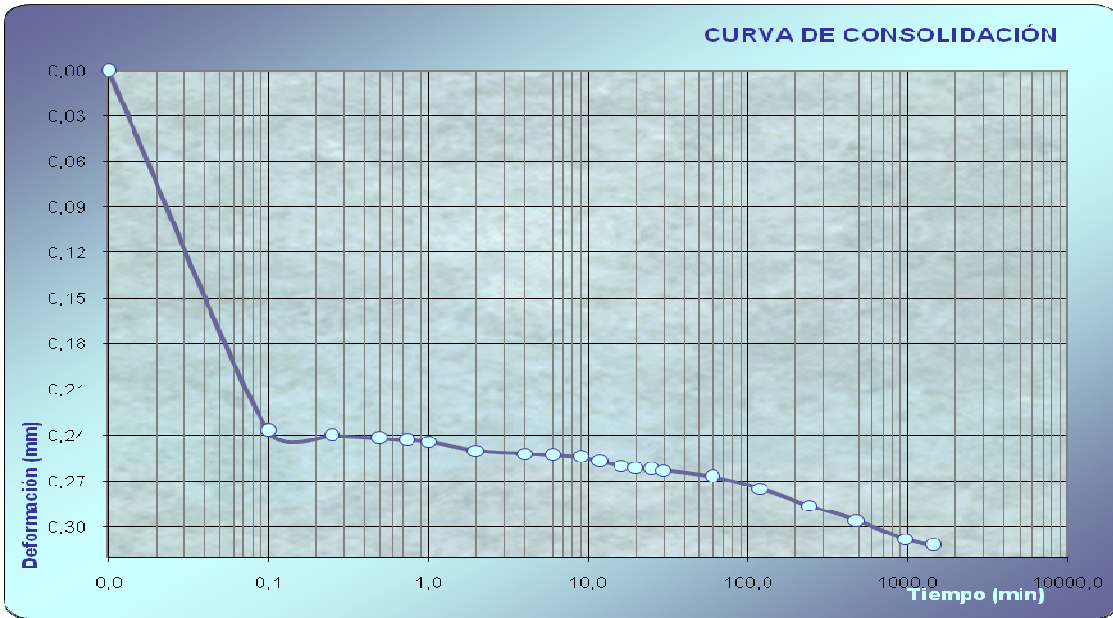
Asentamiento causado por el colapso de la estructura:

$$S_2 = \frac{\Delta e_2}{1 + e'_0} (H) = 150,32 \text{ Mm}$$

Este procedimiento se realizará para las 3 muestras obtenidas en campo.

A continuación, se procederá con la obtención de la curva edométrica (Deformación-Tiempo), tanto de la muestra saturada como no saturada:

Presión sobre el espécimen:		p =		2,000		Kg./cm ²					
Carga Aplicada:		61,360		Kg		Área de contacto:		30,68		cm ²	
Incremento de Presión:		Δp =		2,000		Kg./cm ²					
Fecha	Hora	Tiempo Transcurrido	Tiempo Transcurrido (min)	Lectura Micrometro (mm)	Deformación en (mm)	Fecha	Hora	Tiempo Transcurrido	Tiempo Transcurrido (min)	Lectura Micrometro (mm)	Deformación en (mm)
30-sep	9:20	2 seg	0,0	1,059	0	30-sep	9:32	12 min	12	1,316	0,257
		6 seg	0,1	1,296	0,237			16 min	16	1,319	0,260
		15 seg	0,25	1,299	0,240			20 min	20	1,320	0,261
		30 seg	0,5	1,301	0,242			25 min	25	1,321	0,262
		45 seg	0,75	1,302	0,243			30 min	30	1,322	0,263
		1 min	1	1,303	0,244			1 hr.	60	1,326	0,267
		2 min	2	1,309	0,250			2 hr.	120	1,334	0,275
		4 min	4	1,311	0,252			4 hr.	240	1,345	0,286
		6 min	6	1,312	0,253			8 hr.	480	1,355	0,296
		9 min	9	1,313	0,254			16 hr.	960	1,367	0,308
						01-oct	9:20	24 hr.	1440	1,371	0,312



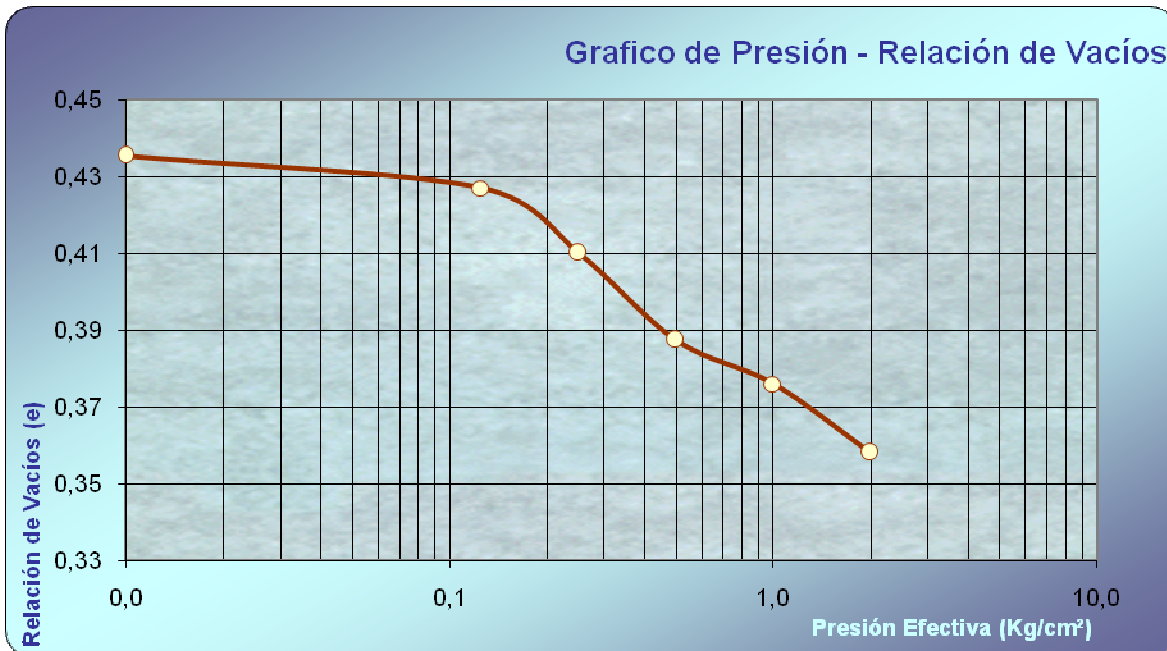
Esta obtención de la gráfica se procederá a realizar para 0,125, 0,250, 0,5, 1 y 2 kg/cm². Obteniendo así un total de 5 curvas para muestras saturadas y el mismo procedimiento para muestras no saturadas.

Lo siguiente a realizar es con la obtención de la curva Relación de Vacíos – Presión Efectiva, tanto de la muestra saturada como no saturada:

$$H_s = \begin{matrix} 1,609 & \text{cm} \\ 16,09 & \text{mm} \end{matrix}$$

Presión Kg/cm ²	Alt. Inicial mm	Deformación mm	Alt. final mm	$H_v = H - H_s$ mm	$e = H_v / H_s$	ΔH_1	Δe_1	e_1
0,0	23,100	0,000	23,100	7,008	0,436	0,000	0,000	0,436
0,125	23,100	0,136	22,964	6,872	0,427	0,136	0,008	0,427
0,250	22,964	0,271	22,693	6,601	0,410	0,271	0,017	0,410
0,500	22,693	0,367	22,326	6,234	0,387	0,367	0,023	0,387
1,000	22,326	0,184	22,142	6,050	0,376	0,184	0,011	0,376
2,000	22,142	0,286	21,856	5,764	0,358	0,286	0,018	0,358

Presión Kg/cm ²	e_1
0,0	0,436
0,125	0,427
0,250	0,410
0,500	0,387
1,000	0,376
2,000	0,358



Esta obtención de la gráfica se procederá a realizar para 0,125; 0,250; 0,5; 1 y 2 kg/cm². Obteniendo así un total de 5 curvas para muestras saturadas y el mismo procedimiento para muestras no saturadas.

A continuación se obtienen los siguientes datos y resultado de todos los procedimientos arriba mencionadas:

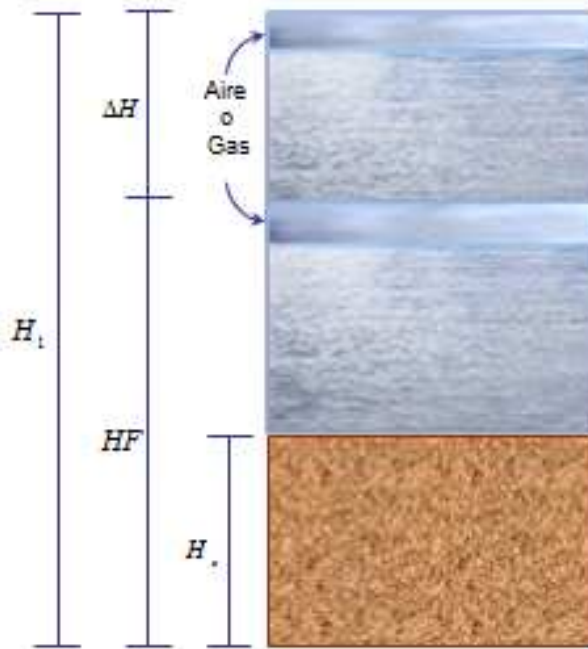
Características de la Muestra y Humedades

Anillo N° =	1	Peso del Anillo =	205,47	gr.
Diámetro Interior del Cilindro (D)	=	6,32	cm.	
Área de la Muestra (A) =	31,37	cm²		
Altura del Anillo =	Altura Inicial de la Muestra (H ₁) =	2,31	cm. =	23,1 mm
Volumen Inicial de la Muestra (V) = A x H ₁	=	72,47	cm³	
Gravedad Especifica de los Sólidos (G _s)	=	2,7		
Peso Especifico del Agua γ_w =	1	gr./cm³		
Variación en la Altura de la Muestra del principio al final de la Prueba ΔH =	0,0000	cm. =	0,000	mm

Determinación de Pesos (<i>W</i>)	Al Principio de la Muestra	
Peso Muestra Humeda + Tara (gr.)	344,7	W_{1t}
Peso Muestra Seca + Tara (gr.)	341,77	W_{3t}
Peso del agua (gr.)	2,93	-
Peso de la Tara (gr.)	205,47	W_{ta}
Peso Muestra Humeda (gr.)	139,23	W_1
Peso Muestra Seca (gr.)	136,3	W_3
Contenido de Humedad (%)	2,15	w_i

Determinación de Pesos (<i>W</i>)	Al Final de la Prueba	
Peso Muestra Humeda + Tara (gr.)	345,49	W_{2t}
Peso Muestra Seca + Tara (gr.)	341,77	W_{3t}
Peso del agua (gr.)	3,72	-
Peso de la Tara (gr.)	205,47	W_{td}
Peso Muestra Humeda (gr.)	140,02	W_2
Peso Muestra Seca (gr.)	136,3	W_3
Contenido de Humedad (%)	2,73	w_f^*

Variación de la altura de la muestra al principio y final de la prueba



Altura de los Sólidos

$$H_s = \frac{W_s}{G_s \cdot \gamma_w \cdot A} = \begin{matrix} 1,609 & \text{cm} \\ 16,09 & \text{mm} \end{matrix}$$

Altura Final de la Muestra

$$HF = H_1 - \Delta H = \begin{matrix} 2,310 & \text{cm} \\ 23,10 & \text{mm} \end{matrix}$$

Altura Inicial de Vacíos

$$H_{v0} = H_1 - H_s = \begin{matrix} 0,701 & \text{cm} \\ 7,01 & \text{mm} \end{matrix}$$

Altura de Vacíos Final

$$H_{vf} = HF - H_s = \begin{matrix} 0,701 & \text{cm} \\ 7,01 & \text{mm} \end{matrix}$$

Relación de Vacíos Inicial

$$e_0 = \frac{H_{v0}}{H_s} = 0,436$$

Relación de Vacíos Final

$$e = \frac{H_{vf}}{H_s} = 0,436$$

Con todos los datos obtenidos y utilizando la fórmula del libro “Principios de Ingeniería de Cimentaciones” (Braja M. Das) del cual se utilizará la fórmula descrita para precompresión, donde se obtendrá la precompresión del suelo minimizada el asentamiento posterior a la construcción:

$$S_p = \frac{C_c \times H}{1 + e} * \text{Log} * \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma_p}{\sigma_0}$$

De la cual obtendremos un asentamiento en centímetros.

3.5.- ANÁLISIS Y OBSERVACIONES DE LOS SUELOS Y SUS ENSAYOS.-

Al realizar un análisis de las gráficas obtenidas en el gabinete con los ensayos arriba mencionados, los cuales fueron realizados para las muestras de arcilla de Alta, Media y Baja compresibilidad, se llega a la conclusión que sí existen parámetros que relacionan la compresibilidad con la Densidad In Situ, el cual es la relación de vacíos que se vuelve en el parámetro más importante para determinar la disminución del asentamiento en la plataforma ya conformada o construida. Con este parámetro y este procedimiento descrito anteriormente se podrá determinar, disminuir y prever las fallas, asentamientos y deformaciones en la conformación de los paquetes estructurales, donde exista gran cantidad de agregado arcilloso.

3.6.- Tabla de Resumen de Ensayos

PROVENIENCIA	Clasificación		Granulometría												LÍMITES			COMPACT			CBR	PU	EXPAN	DEN SITU
			SUCS:	AASHTO:	2 1/2"	2	1 1/2"	1	3/4	1/2	3/8	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	LL	LP	IP	D. MAX	CHO				
Turresillas	CL	A - 7 - 6 (20)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	99,778	99,338	98,158	52,00	38,00	14,00	1,94	16,65	1,85	1,79	1,69	1,87	
Miraflores	CL	A - 7 - 6 (21)	100	100	100	100	100	100	100	100	99,876	99,404	98,494	52,49	36,95	15,55	1,95	19,74	1,86	1,48	1,75	1,89		
Bartolome Alarh	CL	A - 7 - 6 (13)	100	100	100	100	100	100	100	100	99,775	99,126	98,216	32,00	27,00	5,00	1,86	17,25	1,94	1,62	0,11	1,53		
Merced del Sur	CL	A - 7 - 6 (13)	100	100	100	100	100	100	100	100	99,756	99,026	97,776	43,88	36,57	7,31	1,87	20,28	2,03	1,69	0,51	1,54		
Barrancas	CL	A - 7 - 6 (8)	100	100	100	100	100	100	100	100	99,6	99,05	97,894	28,07	19,26	8,81	1,73	18,73	1,87	1,52	5,77	1,58		
Panamericano	CL	A - 7 - 6 (7)	100	100	100	100	100	100	100	100	99,616	99,046	98,002	25,60	16,65	8,94	1,84	16,27	1,86	1,72	2,43	1,51		
																			1,87	1,84	2,39			
																			1,89	1,88	1,27			

Fuente elaboración propia

3.7.- ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN OBTENIDA. –

Al clasificar las 6 muestras mediante la determinación del límite líquido se pudo determinar las arcillas de alta, media y baja compresibilidad.

En la arcilla de alta compresibilidad donde el porcentaje de límite líquido es igual a 52.44 %, el límite plástico promedio igual a 37.51 % y el índice de plasticidad promedio igual a 14.93 %.

Según la norma AASHTO, el suelo ensayado es arcilla por tener límite líquido mayor a 50 %, un índice de plasticidad mayor a 7, al suelo se lo clasifica como un A-7-6(20) Arcillas y limos más plásticos.

Según la norma SUCS, el suelo ensayado, por tener límite líquido mayor a 50 %, por encontrarse arriba de la línea A, al suelo se lo clasifica como un CL (arcillas inorgánicas de media a baja plasticidad, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas pobres, arcillas magras).

En la arcilla de media compresibilidad donde el porcentaje de límite líquido es igual a 38.02%, el límite plástico promedio igual a 31.8 % y el índice de plasticidad promedio igual a 6.22 %.

Según la norma AASHTO, el suelo ensayado es arcilla por tener límite líquido entre 30 a 50 %, al suelo se lo clasifica como un A-7-6(13) Arcillas y limos más plásticos.

Según la norma SUCS, el suelo ensayado, por tener límite líquido entre 30 a 50 %, por encontrarse arriba de la línea A, al suelo se clasifica como un CL (arcillas inorgánicas de media a baja plasticidad, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas pobres, arcillas magras).

En la arcilla de baja compresibilidad donde el porcentaje de límite líquido es igual a 26.8%, el límite plástico promedio igual a 17.9 % y el índice de plasticidad promedio igual a 8.9%.

Según la norma AASHTO, el suelo ensayado es arcilla por tener límite líquido menor a 30 %, al suelo se clasifica como un A-7-6(7) Arcillas y limos plásticos.

Según la norma SUCS, el suelo ensayado, por tener límite líquido menor a 30 %, por encontrarse arriba de la línea A, al suelo se clasifica como un CL (arcillas inorgánicas de media a baja plasticidad, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas pobres, arcillas magras).

De acuerdo a la información recopilada, realizando el análisis mencionados en los puntos arriba mencionados y por consiguiente someter todos los especímenes al ensayo de compresibilidad y de consolidación con el cual se obtendrá datos después de un trabajo de gabinete, la relación de vacíos, esfuerzos y asentamiento el que resultará en un resumen y gráfica, que se compara con la gráfica que se realizó con los datos de densidad comparando así las 2 gráficas con la cual es posible analizar la conformación y el comportamiento de las arcillas en la capa subrasante , tomando en cuenta los conceptos básicos, normas, para así hallar parámetros que rigen la buena conformación de la capa subrasante.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS Y PROCEDIMIENTOS

4.1.- ANÁLISIS Y OBSERVACIONES DE LOS SUELOS Y SUS ENSAYOS.-

Al realizar un análisis de los gráficos obtenidos en el gabinete con los ensayos arriba mencionados, los que fueron realizados para las muestras de arcillas de Alta, Media y Baja Compresibilidad, se llega a la conclusión que sí existen parámetros que relacionen la Compresibilidad con la Densidad In Situ, que es la relación de vacíos que se vuelve el parámetro más importante para determinar la disminución del asentamiento en la plataforma ya conformada o construida. Con este parámetro y este procedimiento descrito anteriormente se podrá determinar, disminuir y prever las fallas, asentamientos y deformaciones en la conformación de los paquetes estructurales, donde exista gran cantidad de agregado arcilloso.

4.2.- ELABORACIÓN DE PLANILLAS Y GRÁFICOS RELACIONANDO VARIABLES.-

4.2.1.- Análisis Granulométrico.

➤ Arcilla de Alta Compresibilidad

Análisis Granulométrico Límites y Clasificación

Muestra	GRANULOMETRÍA				LÍMITES			CLASIFICACIÓN	
	Nº4	Nº10	Nº 40	Nº 200	LL	LP	IP	S.U.C.S.	AASHTO
Torrecillas	100	99,78	99,34	98,16	52,39	38,06	14,32	CL	A-7-6(20)
Miraflores	100	99,88	99,40	98,49	52,49	36,95	15,55	CL	A-7-6(21)

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

Se realizaron dos ensayos granulométricos, obteniendo semejanza en los resultados por lo que donde se determina que del 100% del total de la muestra ensayada el 98.32% pasa el

tamiz N° 200, el 1.68 % de material retenido en el tamiz N° 200 está compuesto por arenas finas.

Según los resultados de la granulometría, el suelo analizado es arcilla y con menor probabilidad limo. Para poder clasificar el suelo con el que se va a trabajar durante el proyecto se tiene que determinar los límites de Atterberg, obteniendo como resultado el límite líquido promedio para la arcillas de alta compresibilidad es igual a 52.44 %, el límite plástico promedio igual a 37.51 % y el índice de plasticidad promedio igual a 14.93 %.

Según la norma AASHTO, el suelo ensayado es arcilla por tener límite líquido mayor a 50 %, un índice de plasticidad mayor a 7, al suelo se lo clasifica como un A-7-6(20) Arcillas y limos más plásticos.

Según la norma SUCS, el suelo ensayado, por tener límite líquido mayor a 50 %, por encontrarse arriba de la línea A, al suelo se lo clasifica como un CL (arcillas inorgánicas de media a baja plasticidad, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas pobres, arcillas magras).

➤ **Arcilla de Media Compresibilidad**

Análisis Granulométrico Límites y Clasificación

Muestra	GRANULOMETRÍA				LÍMITES			CLASIFICACIÓN	
	N°4	N°10	N°40	N°200	LL	LP	IP	S.U.C.S.	AASHTO
Batolomé Attard	100	99,75	99,13	98,22	32,16	27,03	5,13	CL	A-7-6(13)
Mercado de Sur	100	99,76	99,03	97,78	43,88	36,57	7,31	CL	A-7-6(13)

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

Se realizaron dos ensayos de granulometrías, obteniendo semejanza en los resultados por lo que se determina que del 100% del total de la muestra ensayada el 98.00% pasa el tamiz N° 200, el 2.00 % de material retenido en el tamiz N° 200 está compuesto por arenas finas.

Según los resultados de la granulometría el suelo analizado es arcilla y con menor probabilidad limo. Para poder clasificar el suelo con el que se va a trabajar durante el proyecto se tiene que determinar los límites de Atterberg, obteniendo como resultado el límite líquido promedio para la arcillas de Media compresibilidad es igual a 38.02%, el límite plástico promedio igual a 31.8 % y el índice de plasticidad promedio igual a 6.22 %. Según la norma AASHTO, el suelo ensayado es arcilla por tener límite líquido entre 30 a 50 %, al suelo se lo clasifica como un A-7-6(13) Arcillas y limos más plásticos.

Según la norma SUCS, el suelo ensayado, por tener límite líquido entre 30 a 50 %, por encontrarse arriba de la línea A, al suelo se lo clasifica como un CL (arcillas inorgánicas de media a baja plasticidad, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas pobres, arcillas magras).

➤ **Arcilla de Baja Compresibilidad**

Análisis Granulométrico Límites y Clasificación

Muestra	GRANULOMETRÍA				LÍMITES			CLASIFICACIÓN	
	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	LL	LP	IP	S.U.C.S.	AASHTO
Barrancas	100	99,60	99,05	97,89	28,07	19,26	8,81	CL	A-7-6(8)
Panamericana	100	99,62	99,05	98,00	25,60	16,65	8,94	CL	A-7-6(7)

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

Se realizaron dos ensayos de granulometrías, obteniendo semejanza en los resultados por lo que donde se determina que del 100% del total de la muestra ensayada el 97.94% pasa el tamiz Nº 200, el 2.06 % de material retenido en el tamiz Nº 200 está compuesto por arenas finas.

Según los resultados de la granulometría, el suelo analizado es arcilla y con menor probabilidad limo. Para poder clasificar el suelo con el que se va a trabajar durante el proyecto se tiene que determinar los límites de Atterberg, obteniendo como resultado el

límite líquido promedio para la arcillas de Baja compresibilidad es igual a 26.8%, el límite plástico promedio igual a 17.9 % y el índice de plasticidad promedio igual a 8.9%.

Según la norma AASHTO, el suelo ensayado es arcilla por tener límite líquido menor a 30 %, al suelo se lo clasifica como un A-7-6(7) Arcillas y limos plásticos.

Según la norma SUCS, el suelo ensayado, por tener límite líquido menor a 30 %, por encontrarse arriba de la línea A, al suelo se lo clasifica como un CL (arcillas inorgánicas de media a baja plasticidad, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas pobres, arcillas magras).

4.2.2.- Análisis Hidrométrico.

➤ Arcilla de Alta Compresibilidad

Observaciones:

Se realizaron seis ensayos obteniendo semejanza en los resultados. El ensayo del Hidrómetro está basado en la Ley de Stokes, cuyos resultados son los que se muestran a continuación:

➤ Arcilla de Alta Compresibilidad

Análisis del Hidrómetro Alta Compresibilidad

Muestra	HIDRÓMETRO	
	Arcilla	Limo
	%	%
Torrecillas	14.17	85.83
Miraflores	15.89	84.11

Fuente de elaboración propia

➤ **Arcilla de Media Compresibilidad**

Análisis del Hidrómetro Media Compresibilidad

Muestra	HIDRÓMETRO	
	Arcilla	Limo
	%	%
Batolomé Attard	13.87	86.13
Mercado de Sur	19.99	80.01

Fuente de elaboración propia

➤ **Arcilla de Baja Compresibilidad**

Análisis del Hidrómetro Baja Compresibilidad

Muestra	HIDRÓMETRO	
	Arcilla	Limo
	%	%
Barrancas	18.54	81.46
Panamericana	17.12	82.88

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

Se realizaron seis ensayos de los cuales existe una similitud en los resultados obtenidos.

4.2.3.- Análisis Compactación Proctor Modificado T – 180.

➤ **Arcilla de Alta Compresibilidad**

Análisis de compactación T –180 de Alta compresibilidad

MUESTRA	Densidad Máxima gr/cm ³	Humedad óptima %
Torrecillas	1.94	16.7
Miraflores	1.95	19.7

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

$$\rho_{MAX} \text{ (Promedio)} = 1.95 \text{ gr. /cm}^3$$

$$H_{OP} \text{ (Promedio)} = 18.20 \%$$

➤ **Arcilla de Media Compresibilidad**

Análisis de compactación T – 180 de Media compresibilidad

MUESTRA	Densidad Máxima gr/cm3	Humedad óptima %
Batolomé Attard	1.86	17.3
Mercado de Sur	1.87	20.3

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

$$\rho_{MAX} \text{ (Promedio)} = 1.86 \text{ gr. / cm}^3$$

$$H_{OP} \text{ (Promedio)} = 18.8 \%$$

➤ **Arcilla de Baja Compresibilidad**

Análisis de compactación T – 180 de Baja compresibilidad

MUESTRA	Densidad Máxima gr/cm3	Humedad óptima %
Barrancas	1.73	18.7
Panamericana	1.84	16.3

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

$$\rho_{MAX} \text{ (Promedio)} = 1.78 \text{ gr. / cm}^3$$

$$H_{OP} \text{ (Promedio)} = 17.5 \%$$

Los resultados obtenidos están dentro del rango de los suelos arcillosos de alta, media y baja plasticidad. Mientras más fino es el suelo, menor densidad y mayor cantidad de agua. El análisis de la práctica es mayor el contenido de humedad óptima en la arcilla.

4.2.4.- Relación Soporte de California (C.B.R.).

➤ Arcilla de Alta Compresibilidad

Observaciones:

Análisis del C.B.R Alta Compresibilidad

C.B.R. Dmax			
MUESTRA	100%	95%	90%
Torrecillas	1.79	1.76	1.73
Miraflores	1.44	1.46	1.48

Fuente de elaboración propia

➤ Arcilla de Media Compresibilidad

Observaciones:

Análisis del C.B.R Media Compresibilidad

C.B.R. Dmax			
MUESTRA	100%	95%	90%
Batolomé Attard	1.00	1.07	1.14
Mercado de Sur	2.75	2.67	2.60

Fuente de elaboración propia

➤ Arcilla de Baja Compresibilidad

Observaciones:

Análisis del C.B.R Baja Compresibilidad

C.B.R. Dmax			
MUESTRA	100%	95%	90%
Barrancas	1.87	1.88	1.89
Panamericana	1.85	1.86	1.88

Fuente de elaboración propia

Para mayor control de la expansión se realiza la primera lectura de la expansión a las 12 horas después de saturar y así diariamente se realiza la lectura con el extensómetro, durante cuatro (96 horas), según recomienda la norma AASHTO, todos los suelos se deben saturar durante cuatro días antes de realizar el ensayo del CBR (Relación Soporte de California). Los resultados obtenidos muestran una similitud en cuanto a su resistencia en la diferente arcilla

4.2.5.-Ensayo de Densidad In Situ

➤ Arcilla de Alta Compresibilidad

Observaciones:

Análisis de Densidad In Situ Alta Compresibilidad

MUESTRA	Densidad In Situ gr/cm ³	Humedad Natural %
Torrecillas	1.87	3.73
Miraflores	1.89	3.52

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

$$\rho_{In Situ} \text{ (Promedio)} = 1.88 \text{ gr. / cm}^3$$

$$H_{Nat} \text{ (Promedio)} = 3.62 \%$$

➤ Arcilla de Media Compresibilidad

Observaciones:

Análisis de Densidad In Situ Media Compresibilidad

MUESTRA	Densidad In Situ gr/cm ³	Humedad Natural %
Batolomé Attard	1.53	5.41
Mercado de Sur	1.54	3.81

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

$$\rho_{In Situ} \text{ (Promedio)} = 1.54 \text{ gr. / cm}^3$$

$$H_{Nat} \text{ (Promedio)} = 4.61\%$$

➤ **Arcilla de Baja Compresibilidad**

Observaciones:

Análisis de Densidad In Situ Baja Compresibilidad

MUESTRA	Densidad In Situ gr/cm ³	Humedad Natural %
Barrancas	1.58	3.51
Panamericana	1.51	3.74

Fuente de elaboración propia

Observaciones:

$$\rho_{In\ Situ} \text{ (Promedio)} = 1.55 \text{ gr. / cm}^3$$

$$H_{Nat} \text{ (Promedio)} = 3.63\%$$

4.3.- ANÁLISIS DE LOS ENSAYOS PROPUESTOS.-

4.3.1.- Ensayo de Consolidación.-

	DENSIDAD IN SITU	RELACIÓN DE VACIOS		Cc 0,009*(LL-10)	Cc 0,007*(LL-10)	H (Altura de Subrasante) (cm)	PRESIÓN EFECTIVA (Kg/cm ²)		INCREMENTO DE PRESIÓN (Kg.)	PRECOM PRESIÓN INAL.	PRECOMP RESIÓN ALT.
		INALTERADO	ALTERADO	INALTERADO	ALTERADO		INALTERADO	ALTERADO			
MUESTRA DE TORRESILLAS	1,87	0,358	0,255	0,381	0,297	50	61,36	61,36	2	0,196	0,165
MUESTRA DE MIRAFLORES	1,89			0,382		50			2		
MUESTRA DE BARTOLOME ATARTH	1,53	0,353	0,276	0,199	0,155	50	61,36	61,36	2	0,103	0,085
MUESTRA DEL MERCADO DEL SUR	1,54			0,305		50			2		
MUESTRA DE LAS BARRANCAS	1,58	0,309	0,255	0,163	0,126	50	61,36	61,36	2	0,087	0,070
MUESTRA DE AV. PANAMERICANA	1,51			0,140		50			2		

Fuente de elaboración propia

Determinaciones:

La relación entre Compresibilidad (Precompresión) y la densidad In Situ se realiza de acuerdo al siguiente análisis.

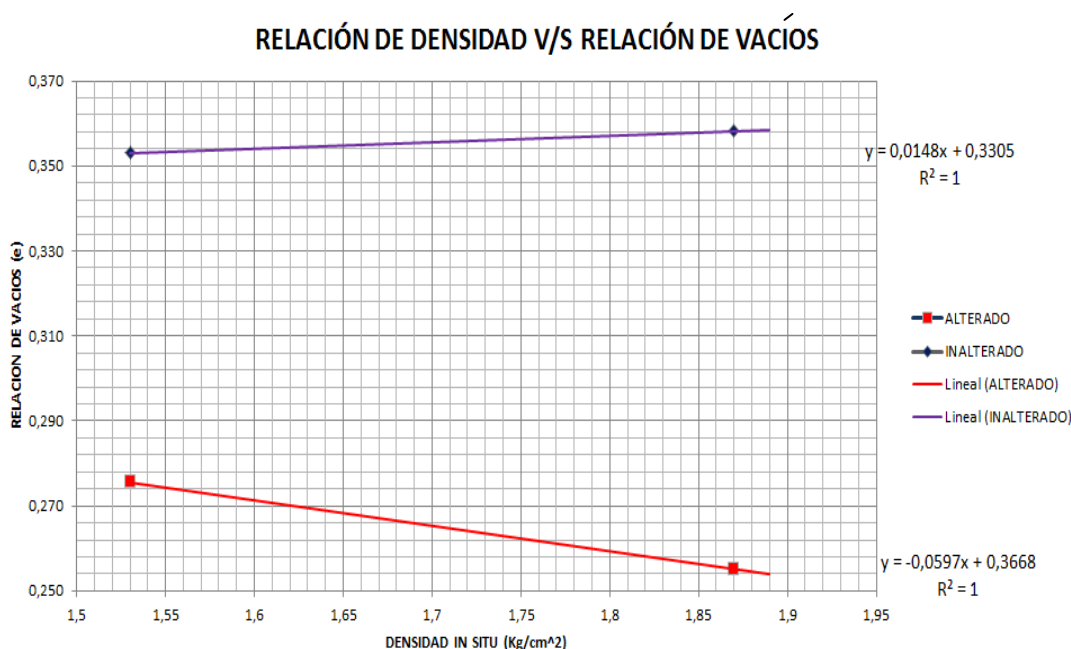
1.- De acuerdo al resultado de la densidad In Situ es posible reemplazar este dato en la ecuación obtenida en los cálculos realizados ya sean con muestras alteradas o inalteradas, para así obtener la relación de vacíos que es necesario para poder obtener la relación de compresibilidad.

2.- Con la relación de vacíos que obtenemos anteriormente (paso 1) nos vamos a la gráfica de relación de vacíos v/s presión efectiva, con este dato de relación de vacíos podemos obtener la presión efectiva rápidamente donde podemos apreciar que a mayor carga menor es la relación de vacíos.

3.- Este dato de la presión efectiva es importante en la ecuación de precompresión, así llegando a obtener las variables restantes que nos pide esta ecuación.

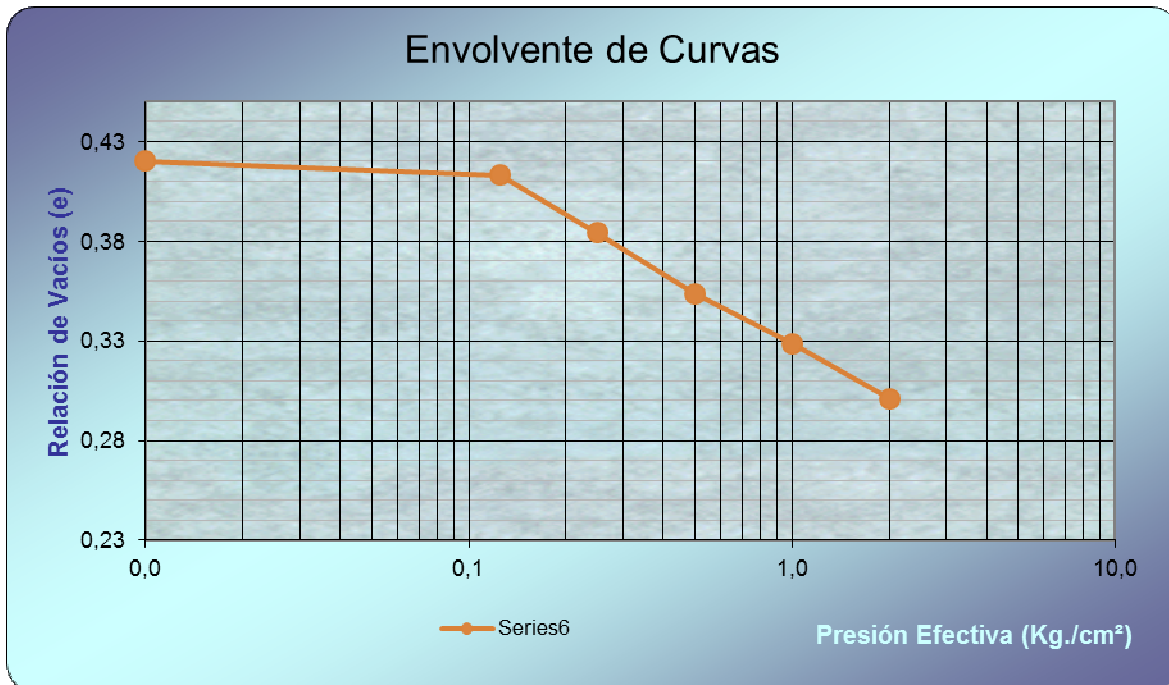
De esta manera, analizamos la relación entre compresibilidad y la densidad In Situ aplicada a subrasantes arcillosas.

4.3.2.- GRÁFICA DENSIDAD Y RELACIÓN DE VACÍOS



En el primer gráfico intervienen densidades vs relación de vacíos. A distintos tipos de Densidades reemplazamos en la ecuación lineal y obtenemos la Relación de Vacíos (Y) que es importante, ya que este dato es necesario para poder pasar al segundo paso.

4.3.3.- GRÁFICA RELACIÓN DE VACÍOS VS PRESIÓN EFECTIVA



Fuente elaboración propia

En nuestro segundo gráfico intervienen la Relación de Vacíos vs Presión Efectiva, la gráfica tiende a bajar, porque está a distintos tipos de estratos y diferentes secuencias.

También es posible afirmar que a mayor carga menor es la relación de vacíos para las muestras saturadas y no saturadas ya que la presión efectiva es un proceso geológico y en consecuencia debe ser inferido de las pruebas de laboratorio.

Llegando así a reemplazar estos datos en la ecuación de Compresibilidad (pre compresión) y así se analiza la relación entre compresibilidad y la densidad in situ aplicada a subrasantes arcillosas.

(Braja M. Das, Principios de Ingeniería de Cimentaciones)

$$S_p = \frac{C_c \times H}{1 + e} * \text{Log} * \frac{\sigma_0 + \Delta \sigma_p}{\sigma_0}$$

DONDE:

- Sp=** Pre compresión
Cc= Coeficiente de compresión
H= Espesor de la subrasante a considerar
e= Relación de vacíos
σ₀= Presión efectiva
Δσ_p= Incremento de Presión

4.4.- FORMAS DE APLICACIÓN.-

La ciudad de Tarija tiene un alto índice de asentamientos muchas veces este fenómeno no es perceptible debido a que las subrasantes están bajo estructuras más estables como ser la capa sub base y la capa base, por lo que el ingeniero no considera las propiedades especiales que tienen las arcillas, la consolidación es más en arcillas, debido a que en estado de saturación tienden a expandirse y en estado seco tienden a contraerse.

El estudio del presente Proyecto de Grado es muy amplio debido a la gran masa de suelo que tienen las arcillas, estos agregados de partículas microscópicas y submicroscópicas derivadas de la descomposición química que sufren los constituyentes de las rocas. Son suelos plásticos y tienen además una permeabilidad extremadamente baja.

Este trabajo nos ha permitido disponer de las herramientas necesarias para determinar los parámetros que relacionen la Compresibilidad y la Densidad In Situ con un suelo arcilloso, ayudando a anticipar las fallas y deformaciones que alteran los paquetes estructurales.

Los parámetros entre la Compresibilidad y la Densidad In Situ de los suelos arcillosos de alta, media y baja compresibilidad permiten tomar decisiones para la conformación de la subrasante.

El aporte ingenieril de dicho proyecto es de encontrar asentamientos en las subrasantes; este problema se encuentra directamente relacionado con nuestro entorno social, ya que al solucionarlo surgen beneficios para la comunidad y el departamento, aumentando la calidad de vida de los beneficiarios y prolongando la vida útil de nuestras carreteras.

CAPÍTULO V

5.1.- CONCLUSIONES.-

- Se determinó parámetros de la compresibilidad, basados en la densidad in situ de los suelos arcillosos que nos ayudan a establecer deformaciones en nuestras sub rasantes.
- Se realizó la clasificación de las arcillas de alta, media y baja compresibilidad.
- Se realizaron todos los ensayos necesarios, para este proyecto que son estandarizados por laboratorio
- Los agregados fueron respectivamente clasificados mediante los 2 sistemas según la siguientes tabla :

	OBSERVACIONES	DESCRIPCIÓN:
Alta >50	Torrecillas: Clasificación según AASTHO A - 7 - 6 (20) Clasificación según SUCS: CL Miraflores: Clasificación según AASTHO A - 7 - 6 (21) Clasificación según SUCS: CL	Arcilla Inorgánica de baja plasticidad, de compresibilidad baja a media.
Media 50 - 30	B.Attard: Clasificación según AASTHO A - 7 - 6 (13) Clasificación según SUCS: CL M. del Sur: Clasificación según AASTHO A - 7 - 6 (13) Clasificación según SUCS: CL	
Baja < 30	Barrancas. Clasificación según AASTHO A - 7 - 6 (8) Clasificación según SUCS: CL Av. Panamericana: Clasificación según AASTHO A - 7 - 6 (7) Clasificación según SUCS: CL	

Fuente elaboración propia

- De acuerdo al cuadro, se puede observar que sus límites líquidos se clasifican en arcillas de alta, media y baja compresibilidad.

- Se realizó un estudio mediante ensayos de laboratorio estandarizados, encontrando el parámetro que relacione la Compresibilidad y la Densidad In Situ con un suelo arcilloso de alta, media y baja compresibilidad, el cual ayudará a tomar decisiones para la conformación de la subrasante, para así prever las fallas y deformaciones en la conformación de los paquetes estructurales, debido a posibles asentamientos por la sobrecarga actuante.
- El estudio ha permitido disponer de las herramientas necesarias, como para poder realizar un análisis y determinar un mejoramiento para la conformación de la subrasante.
- Según los ensayos realizados que a mayor grado de compactación (Presión), menor es la relación de vacíos, por lo que la consolidación es más efectiva, esto quiere decir que se consolida más el suelo.
- Se pudo observar que en la muestra saturada o alterada la relación de vacíos aumenta. Mientras que en la muestra no saturada o inalterada la relación de vacíos es menor.
- Al realizar el ensayo de compresibilidad se tiene que la muestra de arcilla alterada tiene una compresión baja, esto quiere decir que no llega a un grado de consolidación efectiva, caso contrario pasa con la muestra de arcilla inalterada, donde la consolidación llegará a ser efectiva.
- Con el ensayo de la densidad In Situ se puede relacionar el ensayo de compresibilidad, por medio de la relación que existe entre Densidad in Situ y Relación de vacíos; éstas a la vez se relacionan con el incremento de presión mediante la gráfica, donde este dato, se podrá obtener mediante la fórmula de pre compresión donde se logrará la disminución de asentamiento o deformación que sufrirá el paquete estructural.
- A la compresibilidad la utilizamos para obtener una disminución de vacíos en el transcurso del tiempo bajo una determinada presión.
- La relación que se realizó fue empírica, gráfica y no estadística ya que se realizó el estudio de arcillas de distintos lugares de la ciudad, como alta, media, y baja compresibilidad.

5.2.- RECOMENDACIONES.-

- Realizar un estudio más a fondo sobre los parámetros que afectan directamente a la capa más importante del paquete estructural que es la sub rasante, para así prever los asentamientos en suelo arcillosos, para determinar el mejoramiento al cual se deberá someter las mencionadas capas para alargar la vida útil de la carpeta asfáltica.
- A base a los resultados obtenidos, se sugiere tomar en cuenta este parámetro encontrado, y analizar mediante este, la mejor conformación de la capa sub rasante, para evitar asentamientos y deformaciones.
- La recomendación más importante en esta práctica, es que al ser este un estudio de investigación y al observar estos parámetros, se puede afirmar que existen ensayos de laboratorio específicos para las capas sub rasantes donde se podría determinar y prever las fallas que se pudieran presentar debido a las cargas, motivo por el cual se recomienda seguir con este análisis, tomando en cuenta los parámetros encontrados.