

INTRODUCCION

1. ANTECEDENTES

Antes del desarrollo de la Mecánica de suelos los problemas de la ingeniería civil eran resueltos en forma intuitiva o realizando tanteos, esto daba origen a serios riesgos en las diferentes obras civiles afectando la seguridad como la economía en la ejecución de las obras.

La Mecánica de Suelos hizo posible predecir el comportamiento de los suelos basándose en la obtención de sus propiedades, la plasticidad en este sentido es una propiedad tan evidente y de mucha importancia que aporta de gran manera a entender el comportamiento ingenieril de los diferentes suelos existentes, por lo cual existe una relación específica entre la plasticidad y el comportamiento mecánico de los diferentes suelos, es por eso que la plasticidad se convierte en una propiedad de interés científico.

Por otra parte se desarrollo otra interpretación de la plasticidad fundamentándose en las característica esfuerzo-deformación de los materiales este procesó involucra la variación de volumen y disminución de vacíos en un suelo lo cual hace percibir la importancia de la compactación de los suelos en la ejecución de las diferentes obras civiles, ya que con este proceso se logra el aumento de la resistencia y la disminución de la capacidad de deformación.

En la actualidad en Tarija la técnica de la compactación se la aplica en diferentes obras civiles, como la construcción de edificaciones, terraplenes, defensivos, pavimentos, presas, etc. esto con el fin de garantizar una buena ejecución y adecuado funcionamiento de las obras.

Tomando en cuenta las características de las diferentes formaciones geológicas (estratos pertenecientes al periodo cuaternario y ordovícico) en la que se encuentra asentada la ciudad de Tarija y las propiedades mecánicas de estos materiales, el procesó de compactación para la ejecución de cualquier obra civil es de mucha

importancia ya que mediante este proceso se realiza el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas.

La importancia de la compactación de los suelos consiste en el aumento de la resistencia y la disminución de la capacidad de deformación que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes las cuales disminuyen sus vacíos y aumentan la densidad del suelo.

Para realizar el mejoramiento artificial de las propiedades mecánicas de un suelo y obtener la máxima densidad seca, es necesario realizar una serie de ensayos de laboratorio, que consisten principalmente en determinar el contenido de humedad del suelo para lograr su máxima densidad seca, por lo cual este proceso demanda tiempo y un determinado costo económico en establecer estas propiedades.

Los ensayos para determinar el contenido de humedad óptima de un suelo con lo cual se obtiene una densidad máxima son necesarios e imprescindibles para garantizar una buena ejecución de una obra, pero por diferentes factores estos no se los realizan, o se asumen contenidos de humedad erróneos. Por lo cual el presente trabajo de investigación nos proporcionará ayuda para poder estimar o aproximarnos a los valores de contenido de humedad óptimo (CHO) basándonos principalmente en la plasticidad de los suelos.

La elaboración del presente trabajo se realizará teniendo en cuenta los diferentes estudios e investigaciones realizadas en la mecánica de suelos los cuales indican la relación que existe entre la plasticidad de un suelo y su contenido de humedad óptimo el cual logra la máxima densidad seca del suelo y por ende este mejora sus propiedades mecánicas logrando un mejor uso ingenieril del suelo.

Para poder establecer una relación entre la plasticidad de un suelo y el contenido de humedad óptima es necesario contar con registro de datos de las siguientes propiedades; límite líquido, límite plástico; contenido de humedad óptimo y ensayos de granulometría los cuales nos servirán para poder realizar un análisis adecuado y demostrar la correlación que existe entre estas propiedades.

2. JUSTIFICACION

Para una mejor comprensión de la mecánica de los suelos, y las propiedades de los diferentes suelos en Tarija es necesario disponer con una serie de factores, los cuales nos puedan proveer una asistencia técnica en el desarrollo de los temas que conforman esta rama de la Ingeniería Civil.

Entre los factores mas importantes e indispensables los cuales nos coadyuven a una mejor comprensión y aplicación de lo suelos es poder disponer de un adecuado material de trabajo como ser un laboratorio debidamente equipado y una extensa bibliografía, asimismo poseer un registro o base de datos sobre la información de las características y propiedades de los suelos que conforman la ciudad de Tarija.

La insuficiencia de registros de las propiedades y características de los suelos hace necesario un estudio e investigación de las propiedades de los diferentes suelos que conforman la ciudad de Tarija.

La importancia de disponer de una base de datos de las diferentes propiedades de los suelos, es imprescindible ya que mediante esta se pueda realizar la comparación o estimación de los resultado obtenidos mediante ensayos minuciosos de laboratorio.

Una de las propiedades necesarias y que se requieren con mayor frecuencia en el campo de la ingeniería civil es la determinación del contenido óptimo de humedad del suelo con la cual se logra la máxima densidad seca, esto debido a que los suelos al compactarse a un contenido de humedad óptimo mejoran sus propiedades mecánicas y optimizan su aplicabilidad en la ingeniería civil.

En la actualidad en nuestro medio no se cuenta con un registro o una base de datos del contenido de humedad óptimo de los diferentes suelos existentes en la ciudad de Tarija, los cuales nos puedan proporcionar una ayuda para poder estimar o aproximarnos a valores mas certeros y adecuados para su utilización o también estos valores puedan ser usados de manera comparativa con los ensayos que se determinen en laboratorio.

En base a lo citado anteriormente la investigación y estudio que se plantea realizar consiste principalmente en poder establecer las máximas humedades determinadas a partir de ensayo de compactación T-180 en función de una correlación empírica con la plasticidad de los suelos(límite líquido y plástico) existentes en las diferentes zonas de la ciudad de Tarija.

Después de un análisis y estudio de los resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio se podrán determinar modelos matemáticos o ecuaciones las cuales puedan establecer o estimar el contenido óptimo de humedad de un suelo en particular a partir del conocimiento previo de las características plásticas del suelo en estudio.

Importantes razones de orden técnico justifican la realización del presente trabajo de investigación, las cuáles brevemente se dan a conocer a continuación:

- La ciudad de Tarija presenta una enorme gama de urgentes necesidades respecto al conocimiento de las propiedades de suelos existente en la zona, entre estas necesidades tenemos la determinación de contenido de humedad adecuado para lograr una compactación óptima en las diferentes obras, ya que en las mismas por diferentes factores omiten la determinación del contenido de humedad óptimo del suelo, lo que conlleva a asumir valores inadecuados.
- La realización del presente trabajo como se pudo explicar anteriormente será una gran ayuda para relacionar el comportamiento de la humedad óptima de un suelo en función a su plasticidad del mismo (límite líquido, límite plástico) utilizando como factor común la humedad óptima de los suelos.
- Se determinara y demostrara mediante una correlación el grado de interconexión que existe entre el límite líquido, límite plástico y el contenido de humedad óptima de un suelo.

- Los valores o resultados obtenidos de las ecuaciones que se obtenga del estudio y análisis del grado de interconexión entre la húmeda óptima de un suelo y sus límites nos proporcionaran una ayuda para poder estimar el valor verdadero de este o también los resultados puedan ser usados de manera comparativa con los ensayos que se determinen en laboratorio.
- Con la elaboración del trabajo se podrá disponer de un mayor enfoque de las propiedades estudiadas de los suelos de la ciudad de Tarija
- Se dispondrá con un registro o una base de datos de diferentes propiedades de los suelos de la ciudad de Tarija como ser: densidad máxima, contenido de humedad óptimo del suelo, límite líquido, límite plásticos, esto en función al tipo de suelo que se quiera examinar.
- Los resultados obtenidos de la investigación podrán ser utilizados como una base de datos en otros trabajos de investigación, o estos mismos podrán ser utilizados como un grado de interconexión con otras propiedades de los suelos.
- La falta de información técnica sobre el grado de interconexión que existe entre las diferentes propiedades de un suelo, hacen que el ingeniero o estudiante no consideren como una alternativa adecuada la correlación que existe entre las diferentes propiedades de un suelo en el análisis o estudio de la mecánica de suelos, por lo que se pretende cambiar esta situación marcando un precedente para incentivar estudios mas avanzados y aplicaciones diversas con relación a este tema.
- Debido a la carencia de este tipo de investigaciones en la región nos vemos forzados a hacer uso de registros o gráficos erróneos los cuales nos

proporcionan resultados que no reflejan el comportamiento de los suelos existentes en Tarija.

- Se debe tener en cuenta que el tema en investigación no está en el medio lo cual hace necesario la implementación de este para poder disponer de esta información y así favorecer a todos los trabajos que requiera de su utilización

Todas las razones antes mencionadas, así como también el afán personal de querer contribuir con una herramienta útil a la comunidad técnica y académica regional, han sido justificativos suficientes para el desarrollo de este tema como trabajo de tesis.

3. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

Con el desarrollo del presente estudio, se pretende alcanzar los siguientes objetivos.

3.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar una investigación y análisis del grado de interconexión o correlación empírica que existe entre la humedad óptima determinada mediante ensayo de compactación T-180 y los límites de plasticidad (límite líquido, límite plástico) de los suelos, considerando como zona de estudio la ciudad de Tarija esto con el fin de hacer conocer las bondades de las propiedades de los suelos y las mismas sean difundidas entre la comunidad técnica, académica regional y se ponga como una alternativa de solución a problemas particulares de compactación de suelos en la región.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Contar con un mayor enfoque de las propiedades estudiadas de los suelos de la ciudad de Tarija

- Obtener un gran número de datos para realizar un análisis estadístico para poder relacionar y sacar un factor común de los mismos para facilitar nuestros fines
- obtener un registro o una base de datos de diferentes propiedades de los suelos de la ciudad de Tarija como ser: densidad máxima, contenido de humedad óptimo del suelo, límite líquido, límite plásticos, los cuales podrán ser utilizados para otros fines.
- Crear un banco de datos que puedan ser utilizados como base a otros trabajos que se pretendan realizar.
- Contar con un rango de variación de las propiedades analizadas de los suelos ya que se dispondrá de numerosos datos los cuales podrán ser analizados estadísticamente.
- Realizar un análisis de probabilístico con las diferentes propiedades obtenidas en la elaboración del trabajo de tesis
- Analizar y estudiar la interconexión que pueda existir entre las diferentes propiedades de los suelos que se determinen en la elaboración del trabajo.
- Disponer con una información la cual nos indique la aplicabilidad mas adecuada de los suelos analizados en el campo de la ingeniería civil.
- Comparar los resultados obtenidos, modelos matemáticos o ecuaciones con los ya exigentes y planteadas por diferentes autores.

4. ALCANCE DEL ESTUDIO

Básicamente la elaboración del presente trabajo se realizara teniendo en cuenta los diferentes estudios e investigaciones realizadas en la mecánica de suelos los cuales indican la relación que existe entre la plasticidad de un suelo y su contenido de humedad óptimo.

Para poder realizar y establecer una correlación se determinara un número adecuado de datos de las propiedades en estudio, establecidas o calculadas apropiadamente en laboratorio y cumpliendo con todas las normas implantadas, ya que los valores

determinados nos garantizaran y certificaran que el trabajo que se pretende realizar es óptimo.

Con la elaboración de presente trabajo de tesis se realizara un estudio y análisis de correlación entre el la humedad òptima del suelo y la plasticidad de este, teniendo como zona de estudio la ciudad de Tarija,

En el presente trabajo, una de las propiedades que deberán contar los suelos para ser incluidos en la investigación es la plasticidad, ya que los suelos no plásticos no formaran parte en el análisis del estudio, esto debido a que la correlación o el grado de interconexión que se pretende demostrar esta en función a esta propiedad de gran interés científico.

Para el análisis y estudio de los suelos se realizara la clasificación de los mismos mediante el sistema de la Asociación Americana de Agencias Oficiales de carreteras y Transporte AASTHO. También de manera complementaria se realizara una clasificación por el un Sistema de Clasificación unificado.

Se tomara en cuenta como base el sistema AASTHO el cual es ampliamente usado en nuestra región

Para dar una mayor claridad y precisión análisis de los datos, se buscara una correlación o grado de interconexión entre la plasticidad y contenido óptimo de humedad del suelo, primeramente realizando la clasificación del suelo en grupo o subgrupo al que pertenezca según los sistemas de clasificación mencionados para luego recién realizar todos los análisis correspondientes.

La energía de compactación que se utilizara para realizar la compactación de los suelos, en todos los casos será la especificada para ensayo de Proctor Modificado T-180.

También es importante tener en cuenta que los suelos que se utilizaran en el trabajo de tesis, deberán ser aquellos que si se puedan compactar por el método de impacto utilizado (Proctor Modificado T-180).

Los modelos de ecuación que se determinaran en funciona al estudio realizado serán definidas con muestras obtenidas de la zona urbana y suburbana de la ciudad de

Tarija por lo cual las estimaciones o preediciones que se puedan realizar, caracterizaran las propiedades de los suelos existentes en el lugar.

1.1. ORIGEN Y FORMACIÓN DE LOS ESTRATOS DE SUELO EXISTENTES EN LA CIUDAD DE TARIJA

1.1.1 GEOMORFOLOGÍA Y GEOLOGÍA DE LA ZONA DE ESTUDIO

El estudio y análisis que se realizara en el presente trabajo reflejara específicamente la características y propiedades de los suelos de la parte urbana y suburbana de la ciudad de Tarija, donde la geomorfología y geología de la zona se identifica por pertenecer a periodo cuaternario (que tiene una edad aproximadamente de 1 millón de años) periodo que cuenta en su estructura con los sedimentos aluviales fluviales y lacustres; el periodo ordovícico esta prácticamente por debajo de los estratos pertenecientes al periodo cuaternario aflorando en algunos lugares de la ciudad siendo estos muy pocos por ejemplo podemos citar la zona de la loma.

1.1.2 ESTRATIGRAFÍA DEL SUELO

En toda el área de estudio, urbana y suburbana los sedimentos superficiales y sub-superficiales observados no presentan consolidación son de edad cuaternaria y Terciaria, los sedimentos Cuaternarios en mayor porcentaje corresponderían a sedimentos retrabajados del Terciario en un ambiente continental producto de la erosión; estos suprayacen en forma irregular y discordante, a los sedimentos de edad Terciaria, litológicamente la formación de la zona en estudio esta representado por arcillas limosas de color marrón moderado, plásticas, sin forma, con baja permeabilidad; continuando arenas medias algo limosas de color marrón naranja, friables, de permeabilidad alta; continúan arenas finas limosas, de color marrón claro con tono amarillento, friables, de permeabilidad media; gradando a limolitas algo arcillosas, de color marrón medio, semi-plásticas, sin forma, para terminar en arcillas limosas, de color marrón oscuras, plásticas sin forma, sucias no consolidadas de baja permeabilidad.

1.1.3. ORIGEN DE LOS SUELOS DE LA ZONA EN ESTUDIO

El origen de los suelos en el sector, son principalmente debido a depósitos de sedimentos aluviales y coluviales del Cuaternario que alcanzaron un buen desarrollo en algunos casos, en su generalidad los suelos son del orden Inceptisoles; suelos jóvenes poco evolucionados, frágiles y susceptibles a la erosión.

1.1.4. EL SUELO

El suelo es un agregado de partículas orgánicas e inorgánicas donde sus propiedades varían en dirección vertical como horizontal, pero generalmente sus propiedades cambian más rápido en la dirección vertical. El suelo tiene perfil y este es un hecho del que se hace abundante aplicación.

Suelo es un término del que hacen uso diferentes profesionales, la interpretación varia de acuerdo con sus respectivos intereses, para el agrónomo por ejemplo la palabra se aplica a la parte superficial de la corteza capaz de sustentar vida vegetal, siendo esta interpretación demasiado restringida para el Ingeniero Civil. Para el Geólogo es todo material intemperizado en el lugar en que ahora se encuentra, esta definición peca de parcial para el Ingeniero Civil al no tomar en cuenta los materiales transportados no intemperizados posteriormente a su transporte.

Para fines del presente trabajo la palabra suelo representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desechos hasta areniscas parcialmente cementadas, quedando fuera de la definición las rocas sanas o los depósitos o estratos altamente cementados que no se ablandan o desintegren por la acción de la intemperie. El agua contenida en el suelo juega un papel muy importante en el comportamiento mecánico de este, por esta razón debe considerarse como parte integral del mismo.

1.1.5. AGENTES GENERADORES DE SUELOS

La corteza terrestre es atacada principalmente por el aire y las aguas, siendo los medios de acción de estas sustancias sumamente variados. Sin embargo, todos los mecanismos de ataque pueden incluirse en dos grupos: desintegración mecánica y descomposición química.

El termino desintegración mecánica se refiere a la intemperización de las rocas por agentes físicos, tales como cambios periódicos de temperatura, acción de la congelación del agua en las juntas y grietas de las rocas, efectos de organismos, plantas etc. Por estos fenómenos las rocas llegan a formar arenas o cuando mucho limos y solo en casos especiales arcillas.

Por descomposición química se entiende la acción de agentes que atacan a las rocas modificando su constitución mineralógica o química. El principal agente es, desde luego el agua y los mecanismos de ataque más importantes son la oxidación, la hidratación y la carbonatación. Estos mecanismos generalmente producen arcilla como ultimo producto de descomposición, todos los efectos anteriores suelen acentuarse con los cambios de temperatura, por lo cual es frecuente encontrar formaciones arcillosas de importancia en zonas húmedas y calidas, mientras que son típicas de zonas mas frías formaciones arenosas o limosas, mas gruesas.

En los lugares calidos como el chaco la falta de agua hace que los fenómenos de descomposición no se desarrollen, por lo cual la arena predomina en esa zona; alli los ciclos de tenciones y compresiones sobre las rocas producidos por elevaciones y descensos periódicos y continuados de temperatura son los mecanismos de ataque determinantes.

No de be creerse sin embargo que las reglas anteriores sean inmutables, la naturaleza suele actuar con una complejidad que desafía cualquier regulación, por ejemplo en Bolivia en lugares secos o fríos existen formaciones arcillosas de importancia.

1.1.6. SUELOS RESIDUALES Y TRANSPORTADOS.

Los suelos residuales se originan cuando los productos de la meteorización de las rocas no son transportados como sedimentos, sino que se acumulan en el sitio en que se van formando. Si la velocidad de descomposición de la roca supera a la de arrastre de los productos de la descomposición se produce una acumulación de suelo residual. Pero esos productos pueden ser removidos del lugar de formación, por los mismos agentes geológicos y redepositados en otra zona. Así se generan suelos que sobre yacen sobre otros estratos sin relación directa con ellos; a estos suelos se les denomina *transportados*.

Existen en la naturaleza numerosos agentes de transporte, los cuales pueden citarse como principales el viento, los ríos y corrientes de agua superficial, los mares y las fuerzas de gravedad; estos factores actúan a menudo combinándose. La combinación del escurrimiento de aguas en las laderas de colinas y montes y de las fuerzas del campo gravitacional, forma los depósitos de talud, en las faldas de las elevaciones; estos depósitos suelen ser heterogéneos, sueltos y predominantemente formados por materiales gruesos.

El escurrimiento de torrentes produce arrastre de materiales de gran tamaño que se depositan en forma graduada a lo largo de su curso, correspondiendo los materiales más finos a las zonas planas de los valles.

Los ríos acarrear materiales de muy diversas graduaciones, depositándolos a lo largo de su perfil, según varíe la velocidad de su curso; al ir disminuyendo ésta, la capacidad de acarreo de la corriente se hace menor, depositándose los materiales más gruesos. De esta manera el río transporta y deposita suelos según sus tamaños decrecientes, correspondiendo las partículas más finas (limos y arcillas) a depósitos próximos a su desembocadura.

1.1.7 SUELOS SEDIMENTARIOS

En este tipo de suelo, las partículas se formaron en un lugar diferente, y fueron transportadas y se depositaron en otro emplazamiento. Para explicar la formación de los suelos sedimentarios deben considerarse las tres fases del proceso de: (i) La formación del sedimento; (ii) El transporte; y, (iii) El depósito de los sedimentos

1.1.7.1. LA FORMACIÓN DEL SEDIMENTO

El principal modo de formación de los sedimentos lo constituye la meteorización física y química de las rocas de la superficie terrestre. En general las partículas de limo, arena y grava se forman por la meteorización física de la roca, mientras que las partículas arcillosas son formadas por procesos de alteración química de las mismas. La formación de partículas arcillosas a partir de las rocas puede producirse, por combinación de elementos en disolución o por la descomposición química de otros minerales

1.1.7.2 EL TRANSPORTE

Los sedimentos pueden ser transportados por uno de los agentes siguientes: el viento, los ríos y corrientes de agua superficial, los mares y las fuerzas de gravedad. La forma de transporte afecta los sedimentos principalmente de dos formas: a) modifica la forma, el tamaño y la textura de las partículas por abrasión, desgaste, impacto y disolución; b) produce una clasificación o graduación de las partículas

1.1.7.3. EL DEPÓSITO DE LOS SEDIMENTOS

Después de que las partículas se han formado y se han transportado se depositan para formar el suelo sedimentario. Las tres causas de este depósito en el agua son: la reducción de la velocidad, la disminución de la solubilidad y el aumento de electrolitos. Cuando una corriente desemboca en un lago, océano, o un gran volumen de agua, pierde la mayor parte de su velocidad. Disminuye así la fuerza de la

corriente y se produce una sedimentación. Cualquier cambio en la temperatura del agua o en su naturaleza química puede provocar una reducción en la solubilidad de la corriente, produciéndose la precipitación de alguno de los elementos disueltos

La tabla resume algunos de los efectos de los agentes citados sobre los sedimentos.

Tabla -1
Efecto de los agentes en la desintegración de la
corteza terrestre

-	Agua	Aire	Gravedad
Tamaño	Reducción por disolución, ligera abrasión en superficie, abrasión e impacto en el arrastre.	Considerable reducción	Impacto considerable
Forma y redondez	Redondeo de arena y grava	Elevado grado de redondeo	Angulosas, no esféricas
Textura superficial	• Arena: liza pulimentada brillante • Limo: escaso efecto	El impacto produce superficies mates	Superficies estriadas
Clasificación por tamaño	Considerable	Muy considerable (progresiva)	Nula

1.1.8. AGENTES QUE GENERARON LA FORMACIÓN DE LOS SUELOS EN LA CIUDAD DE TARIJA

Por las características topográficas que presenta la zona donde se encuentra asentada la ciudad de Tarija, fácilmente se puede deducir que los diferentes estratos u horizontes son depósitos lacustre en una mayor proporción, los cuales fueron transportados mediante escurrimiento superficial hasta formar un grande lago donde luego se produce un proceso de sedimentación, estos depósitos son generalmente de granos muy fino, a causa de la pequeña velocidad con que el agua fluye en los lagos. Podemos también observar grandes formaciones de depósitos de suelos debido a escurrimientos de agua en las laderas en combinación con la fuerza de la gravedad, estos depósitos suelen ser heterogéneos y predominantemente formados por materiales gruesos.

1.1.9. ALTERACIONES DE LOS SUELOS DESPUÉS DE SU FORMACIÓN

El Ingeniero Civil, al concebir un proyecto, debe proyectar las estructuras no solamente para las propiedades del suelo al comienzo de la obra sino que también para toda la duración de la vida útil de la misma. El tamaño y la forma de un depósito determinado como las propiedades mecánicas del suelo que lo componen pueden variar de manera muy significativa. Muchas de estas variaciones se producen independientemente de la actividad andrógena, mientras que otras se deben a la presencia de la obra. El suelo no es inerte, sino que es bastante activo y muy sensible a las condiciones de su entorno.

1.1.9.1. PRESIONES

En general un aumento de la presión sobre un elemento de suelo produce un incremento de la resistencia al esfuerzo cortante, una disminución de la compresibilidad y una reducción de la permeabilidad; los efectos contrarios se producen si las presiones disminuyen. Los cambios producidos por la reducción de la presión suelen ser menores que los producidos por un incremento de presiones de igual magnitud. El suelo se comporta por lo tanto como un cuerpo no perfectamente elástico.

Durante la formación de un suelo sedimentario la presión total a una cota determinada continúa aumentando al ir creciendo la altura de la capa de suelo sobre el punto considerado. Así pues, las propiedades de un suelo sedimentario a una determinada profundidad están cambiando continuamente a medida que se va formando el depósito. La eliminación de las tierras superiores, por ejemplo por efecto de la erosión, da lugar a la reducción de las presiones. Un elemento de suelo que está en equilibrio bajo la máxima presión que ha experimentado en toda su historia se denomina "normalmente Consolidación de suelos consolidado", mientras que un suelo en equilibrio bajo una presión inferior a la que lo consolidó se denomina "sobre consolidado".

1.1.9.2. TIEMPO

El tiempo es una variable que interviene en los demás factores que contribuyen a las variaciones del comportamiento del suelo (en especial las presiones, la humedad y las condiciones del medio). Para apreciar las variaciones los efectos complejos de una variación de presiones, el agua debe ser expulsada o absorbida por el elemento del suelo. Debido a la permeabilidad relativamente baja de los suelos de grano fino, se requiere un cierto tiempo para que esta agua escape o penetre en tales suelos. Por otro lado el tiempo es un factor evidente en las reacciones químicas, como las que se producen en los procesos de meteorización.

1.1.9.3. AGUA

El agua puede tener dos efectos perjudiciales sobre el suelo. En primer lugar, la sola presencia del agua disminuye las fuerzas de atracción entre las partículas arcillosas. En segundo lugar, el agua intersticial puede, en determinadas situaciones particulares, soportar los esfuerzos aplicados, modificando así el comportamiento del suelo. Una muestra de arcilla, que puede tener una resistencia similar a la del cemento pobre cuando seca, puede convertirse en fango al sumergirse en agua. Así pues, el aumento de la humedad en un suelo reduce, por lo general, la resistencia del mismo. Las condiciones del agua intersticial pueden variar por causas naturales y por intervenciones andrógenas. Entre las causas naturales está la variación anual de precipitaciones, y por ende de la humedad en el suelo. En la estación seca, a causa de las pocas precipitaciones el nivel freático disminuye, en oposición a esto, en el período lluvioso, la abundancia de agua provoca una elevación del nivel freático. Esta variación de humedad en el suelo produce una variación significativa de las propiedades del suelo a lo largo del año. Por otro lado, muchos procesos constructivos modifican las condiciones del agua freáticas, y consecuentemente provocan variaciones importantes en las características de los suelos. El contenido de

humedad influye en las propiedades físicas de una sustancia: en el peso, la densidad, la viscosidad, el índice de refracción, la conductividad eléctrica y en muchas otras.

1.1.9.4. ENTORNO O AMBIENTE

Existen varias características del entorno de un suelo que pueden tener una influencia importante en el comportamiento mecánico de este. Entre estas características están la naturaleza del fluido intersticial y la temperatura. Por ejemplo una arcilla sedimentaria o compactada puede haberse formado con un fluido intersticial de una cierta composición química y a una determinada temperatura, pero ambos factores pueden variar a lo largo de la vida del depósito. Un ejemplo clásico es el de la arcilla marina, depositada en agua con un elevado contenido de sales: 35 g. de sal por litro de agua, en las condiciones marinas típicas. Las arcillas marinas han sufrido frecuentemente levantamientos tectónicos por lo cual se encuentran por encima del nivel del mar, y el agua que se filtra a través de las mismas tiene un contenido en sales muy inferior al agua del mar. Así a lo largo del tiempo se produce una disminución lenta y gradual de la sal contenida en los poros del sedimento arcilloso, de forma que al cabo de muchos miles de años de lavado o lixiviación, el fluido intersticial puede ser muy diferente del original que existía en el momento de la formación del sedimento. La reducción del contenido de los electrolitos del agua en torno a las partículas del suelo puede reducir la fuerza neta de atracción entre las mismas. En otras palabras el arrastre de la sal de entre los poros puede reducir la resistencia al corte del terreno.

1.2. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS

1.2.1.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS

Entre las principales características de los suelos podemos señalar las siguientes:

- Su composición química
- Tamaño de las partículas
- Forma de las partículas
- Peso específico
- Humedad
- Estructura de su masa

1.2.1.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA

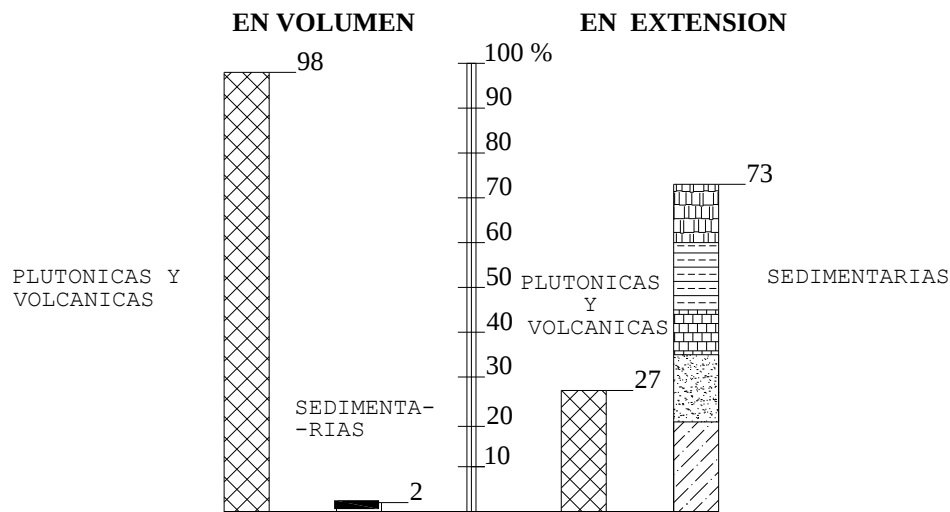
Posiblemente la principal característica de los suelos sea su composición química y mineralógica; ya que sus propiedades físico - químicas dependen directamente de su contenido de metales y metaloides y del ciclo geoquímico a que fueron sometidos durante el proceso de la tectónica de la corteza.

Se originan dos ciclos geoquímicos denominados externo e interno, en relación directa a los ciclos de los agentes geológicos, también externos e internos. El ciclo externo con los procesos de erosión, transporte y sedimentación; y el ciclo interno con los procesos de metamorfismo, orogénesis, plutonismo y volcanismo. El ciclo más importante es el del carbono y luego el del silicio, podemos afirmar que alrededor de ambos ciclos giran la bioquímica y la geoquímica externas; respecto al ciclo geoquímico interno podemos afirmar que, a una profundidad mayor a los 700 Km. se considera al globo terráqueo en un estado de equilibrio termodinámico en completa entropía, sin energía libre. La geoquímica moderna tiene como objetivos el estudio de los elementos que constituyen la materia del globo terráqueo y de los suelos. En la

figura III-1 señalamos los porcentajes correspondientes de los materiales que mas abundan en la superficie terrestre; los nueve elementos señalados ocupan el 98% de la litosfera; en volumen el oxigeno ocupa el 92 % de la corteza, de ahí que también se llama oxisfera.

Ya señalamos que la materia del universo se encuentra ordenada según el sistema jerárquico de grados de agregación; según esta escala de acuerdo a la física moderna tenemos las primeras partículas atómicas constituidas por: protones, neutrones y electrones principalmente y secundariamente, por positrones, mesones neutrinos fotones, etc. La agregación de protones y neutrones forman los diferentes elementos; y la agregación de diferentes cantidades de electrones en diferentes orbitas formas los átomos de los diferentes elementos.

FIGURA 1
PORCENTAJES



La estructura del átomo es una aproximación del sistema solar en escala submicroscópica. Los 98 elementos conocidos hasta la fecha de hoy se consideran provenientes del átomo de hidrogeno por adición sucesiva y ordenada de protones, neutrones, electrones y orbitas, constituyendo un elemento diferente cada agregación particular.

Los átomos de los elementos se combinan para formar moléculas la unión de moléculas forma los compuestos y minerales la asociación de minerales forman las rocas y el conjunto de rocas forman la corteza

1.2.1.3 TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

Desde los principios de la mecánica de suelos, según las conclusiones de las primeras investigaciones se creyó firmemente que las propiedades mecánicas del suelo dependían directamente del tamaño y distribución de los diferentes tamaños de sus partículas sólidas; tal concepto errado todavía subsiste en la mente de algunos prácticos poco experimentados.

Las propiedades físicas de un suelo grueso depende grandemente de su curva granulométrica; pero no así en los suelos finos. Las propiedades físico- mecánicas de un suelo grueso dependen íntimamente de su compacidad y de la orientación de sus partículas: características que son destruidas al realizarse el ensayo de granulometría, perdiéndose así esos conocimientos decisivos de un suelo.

Para determinar las características físico-mecánicas de los suelos finos el conocimiento de su granulometría es muy relativo, casi inútil; pues su estructura inalterada y su ciclo geológico nos dan el conocimiento cabal de sus propiedades mecánicas e hidráulicas.

Debido a la gran difusión internacional que todavía se da a la clasificación de suelos basado en su análisis granulométrico, es prudente estar familiarizado con este criterio técnico; aun que sabiendo que hace falta un nuevo sistema que nos permita conocer

la granulometría de un suelo sin destruir su estructura inalterada; tal procedimiento todavía, hasta hoy, no ha sido descubierto.

Una clasificación descriptiva, basado de límites de tamaño de las partículas fue obvio desde los principios de la mecánica de suelos. Con el desarrollo de la técnica del cribado se llegó luego al trazo de curvas granulométricas y final mente hoy, con el advenimiento de la técnica del análisis de las suspensiones hidrométricas se amplió notable mente el margen de las curvas por tamaños para suelos finos. El tamaño de las partículas de un suelo depende de tipo de minerales que la componen. Como el tamaño de las partículas es la primera característica visible y la mas fácil de obtener de un suelo; vamos a señalar dos métodos de los innumerables que existen. Antes de señalar dichos métodos indicaremos que: el tamaño y la distribución de las partículas de un suelo, determinan las propiedades de capilaridad y permeabilidad; pero son contradictorias para los límites de plasticidad

Clasificación AASHTO; esta norma describe y regula el procedimiento para la clasificación de suelos y agregados para la construcción de carreteras conocida como clasificación AASHTO. La clasificación AASHTO establece 7 grupos de suelos y agregados con base en la determinación en el laboratorio de la granulometría, el límite líquido y el límite plástico. Un octavo grupo corresponde a los suelos orgánicos. Esta clasificación puede ser utilizada cuando se requiere una clasificación geotécnica precisa especialmente para la construcción de carreteras. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se hace por medio de un índice de grupo, que es un valor calculado a partir de una fórmula empírica.

La clasificación de grupo incluyendo el índice de grupo, es útil en la determinación de la calidad relativa del suelo para su utilización en estructuras de tierra, particularmente en terraplenes, subrasantes, subbases y bases. El diseño detallado de estructuras importantes normalmente requiere datos adicionales relacionados con la

resistencia o las características de funcionamiento en las condiciones de campo, que no pueden ser inferidas de la sola clasificación del suelo. Sistema de clasificación Unificado; este sistema esta basado en el sistema de aeropuertos, hasta el grado que puede decirse que es el mismo con ligeras modificaciones. El sistema cubre lo suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado por la malla N° 200 las partículas gruesas son mayores a dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si mas del 50% de sus partículas son gruesas, fino, si mas de la mitad de sus u partículas son finas.

1.2.1.3.1. TEXTURA

Una clasificación basada en el tamaño de las partículas de suelo y sobre todo, en la sensación impartida al tacto; se conoce como identificación o clasificación por textura. La textura de un suelo, ósea, la cantidad predominante de grava, arena, limo o arcilla depende de un gran numero de factores; que puede resultar diferente, en determinados casos y circunstancias, para un mismo suelo.

La textura depende de la composición química de las rocas de origen de los meteoros que causaron su desintegración o descomposición, de los agentes de transporte, de su ciclo tectónico, clima temperatura, etc. Los términos comunes utilizados en un país son diferentes en otro, de ahí que no existe un sistema general conocido.

1.2.1.4. FORMA DE LAS PARTÍCULAS

Las propiedades físicas de los suelos de grano grueso y su comportamiento ingenieril pueden depender considerablemente de su forma, dos formas son las predominantes en las partículas sólidas de un suelo: la masiva y la laminar; existe una tercera forma que es la alargada, pero poco frecuente. Los materiales recién triturados presentan vértices sumamente angulares que van desapareciendo poco a poco con el intemperismo.

Geológicamente los granos pueden ser redondos, sub redondeados, sub angulares y angulares; cuando son isodimensionales o de forma masiva; y serán laminares o prismáticos cuando son anisodimensionales.

Un suelo es isodimensional cuando sus medidas: largo, ancho y espesor son más o menos iguales. Un suelo es anisodimensional cuando en sus partículas dominan dos de sus dimensiones mas o menos iguales y la tercera es muy diferente; como en el caso de las laminas donde el largo y el ancho son mas o menos iguales y su espesor es muy reducido; en las agujas, su espesor y ancho son reducidos y mas o menos iguales y su longitud desmesuradamente mayor.

La fórmula para el grado de esfericidad: $G.E. = b/a$; no es satisfactoria.; G.E. es el promedio aritmético de unas cien piezas escogidas al azar, para partículas de grava comprendidas entre dos tamices; (a) es el largo de las piezas y (b) es su espesor medidas un por uno, con calibrador. La determinación del índice. Cubicidad, índice laminar y el índice de alargamiento, son procedimientos que nos relacionan: en los dos primeros casos, porcentajes en peso, de partículas que pasan y de partículas que no pasan, determinados espesores patrones para material grueso comprendido entre ciertos tamices especificados y sobre un numero mínimo de piezas analizadas una por una y en el tercer caso, porcentajes en peso de piezas que logran y de piezas que no logran alcanzar determinadas longitudes patrones para material grueso comprendido entre ciertos tamices especificados, también, sobre un numero mínimo de piezas analizadas una por una.

En los suelos finos, principal mete en las arcillas las investigaciones realizadas sobre montmorilonitas, ilitas y caolinitas demuestran que la forma predominante de las partículas sólidas es laminar, con medidas anisodimensionales sorprendentes en

algunos casos. La relación de medidas entre su ancho y espesor es 1/100 en las arcillas montmorilonitas, 1/10 en las caolinitas y valores intermedios en las ilitas.

1.2.1.5. PESO ESPECÍFICO

La clase de minerales que componen un suelo, determina su peso específico. Desde el punto de vista de la mecánica de suelos: Peso Especifico es la relación, entre el peso al aire de un material y el peso del agua destilada, para un mismo volumen y a una misma temperatura. El peso unitario suele representarse con el símbolo J_s (gr/cc) gramos sobre centímetro cúbico el peso especifico se representa usualmente con el símbolo (G_s), sin unidades.

Tanto el peso especifico como el peso unitario tienen el mismo numero; solo que el segundo lleva unidades por que es también una densidad; y el primero no lleva unidades por que es una relación entre densidades:

$$J_s = W_s/V_s \text{ (gr/cc) ; } G_s = J_s/J_w.$$

A medida que un suelo tiene mayor cantidad de materia orgánica disminuye su peso específico. El peso especifico de los materiales sobre la superficie de la corteza terrestre, varia entre 2 y 3.

El peso específico del cuarzo es 2.65 y sirve como punto de comparación para el peso especifico de otros minerales o rocas. La arena de cuarzo es el material típico de comparación. El peso especifico de las arcillas sobre la corteza terrestre varia entre 2.7 y 3; y del los suelos en general varia entre 2.65 y 2.85.

El peso específico se utiliza para relacionar el peso de un material respecto de su volumen. Se utiliza para conocer el peso unitario de suelos, agregados y materiales

acopiados, compactados o en estado natural. Se utiliza para la identificación de los minerales, rocas y suelos, ya que es diferente para cada caso.

Para conocer las propiedades de un suelo necesariamente debe conocerse también su peso específico. Para la física la densidad es: $J = m/v$, o la masa de la unidad de volumen y el peso específico la relación: $G_s = P/V$

1.2.1.6 HUMEDAD

De una manera general existen dos clases de humedades y que son: drenables y no drenables. Son drenables cuando el agua puede ser drenada por medios mecánicos conocidos sin alterar la naturaleza del suelo original; y son no drenables cuando se logra la evacuación del agua pero alterando o destruyendo la naturaleza original del suelo.

Para diferenciar el tipo de humedad de un suelo si es drenable o no drenable, se ha visto que lo más práctico es considerar al suelo como seco, cuando permanece constante su peso, después de haber sido calentado al horno a $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por cierto tiempo requerido pues, los remanentes de humedad que quedan son de ínfima magnitud que pueden considerarse igual a cero; con este criterio son drenables las humedades: libre, higroscópica e intersticial.

La húmeda libre es aquella que puede ser drenada por gravedad, cuando esta referida al exceso de agua que existe en suelo saturado, y que no puede ser retenida dentro de su estructura; también puede llamarse humedad libre, a la que esta constituida por la cantidad de agua, que va más allá de la humedad higroscópica hasta llegar a la saturación; la cual tampoco ofrece dificultad en ser evacuada por el método directo de laboratorio.

La humedad higroscópica es aquella que puede retener naturalmente un suelo. Durante el día evacua cierta humedad debido a la acción de sol y durante la noche absorberá otra cantidad de reposición. Esta humedad también es considerable drenable sin dificultad por el procedimiento del laboratorio.

La humedad inferticial esta constituida por el agua atrapada en los puntos de contacto, dentro de los canalículos o espacios libres entre las partículas sólidas del suelo. En los suelos gruesos, esta humedad puede ser drenada por gravedad casi en su totalidad; pero en los suelos finos, a la inversa, puede saturarse por capilaridad.

Las humedades **higroscópicas** y capilar, pueden alcanzar valores considerables en las arcillas; en forma natural en el primer caso y aun después de su secado en laboratorio, en el segundo. Existen arcillas diatomáceas que después de su secado al horno del laboratorio, contienen todavía cerca del 50% de su humedad. Esta humedad es estructural, en muchas arcillas, y no puede ser evacuada al horno, sino a más altas temperaturas pero calcinado y alterando sus cristales que revientan variando sus límites de plasticidad y su peso específico.

La humedad pelicular esta constituida por esa materia viscosa, no evaporable que queda del agua después de su evaporación. Y que se adhiere a las partículas sólidas de suelo con tan grandes presiones de adherencia, que llega en constituirse en parte integrante de los mismos sólidos. Esta húmeda pelicular es, no drenable por cualquiera de los métodos reconocidos hasta hoy; a un produciendo la calcinación de las partículas sólidas.

La magnitud de la presión de la absorción existente en esa humedad pelicular que rodea a la partícula de arcilla es del orden de 20.000 kg/cm^2 ; a semejante presión el

agua se hiela a 20 °C; ósea que dicha película húmeda viscosa tiene consistencia sólida natural, como el hielo, en situación corriente. Se estima también que el espesor de esta capa viscosa es de 0.005 micrones. El agua recupera sus propiedades físicas a distancia de 0.1 micrones de la superficie del cristal de arcilla.

La húmeda de los suelos aumenta con la profundidad; y se satura cuando se acerca al nivel freático desde una sobre elevación igual a la altura crítica de capilaridad.

Cuando disminuyen las sales del agua, disminuye la tensión superficial del agua y aumenta el potencial de capilaridad por tanto en los suelos con alto contenido de álcalis aumentará la capilaridad. El contenido de humedad, tamaño de los granos, ángulo de contacto y la compacidad, afecta notablemente el potencial de capilaridad.

El agua contenida alrededor del punto de contacto, entre las partículas sólidas del suelo, obedece a las leyes de la tensión superficial; y el radio de la interfase aire – agua, o lamina de tensión superficial, esta afectada directamente con el contenido de humedad; directamente con el tamaño de las partículas; directamente con el grado de compacidad e inversamente con la humedad superficial de las partículas.

1.2.1.7 ESTRUCTURA

La Estructura o armazón resistente del suelo, es decisivo para la estabilidad de las Arcillas. Esta estructura es destruida cuando se altera por la acción de fuerzas externas. Cuando la estructura es alterada cambia el porcentaje de huecos por lo tanto cambia su capacidad resistente. Toda arcilla inalterada es más resistente que otras arcillas, del mismo yacimiento, pero remoldada; en cambio esta resistencia, principalmente a la comprensión, es afectada en valores reducidos en suelos limosos; y no se alteran nada, en suelos gruesos.

Los suelos, arcillosos requieren bastantes estudios, para determinar apropiadamente sus límites de estabilidad. El conocimiento correcto de las condiciones de estabilidad exigibles, para que una arcilla sea utilizada en la construcción de terraplenes, cortes, mezclas y fundaciones, es tan importante que dichos parámetros determinan directamente la magnitud, tipo y costo de un proyecto.

Una característica importante de las arcillas es su plasticidad y los limos, por mucho que estén constituidas por partículas tan pequeñas como las arcillas, no tienen plasticidad o si la tienen, es en muy poco valor.

La clase de mineral – arcilla que forma parte de la composición química de una arcilla, es determinante para sus características finales.

La resistencia de las arcillas varía con la humedad; son tan duras como una roca cuando están secas; y son blandas, sin estabilidad alguna, cuando están saturadas.

Los cambios volumétricos de las arcillas; disminuyen considerablemente cuando secas, y aumentan notablemente cuando húmedas, es un factor decisivo para su utilización o rechazo en determinadas obras. Sus grados de contracción y expansión dependen directamente de los minerales que la componen.

Se denominan estabilidad de las arcillas a la relación que existe entre la resistencia a la comprensión simple no confinada, entre una muestra inalterada y la misma remoldeada u alterada, después de ensayada como inalterada.

Un suelo nunca resulta ser un ente desprovisto de organización; al contrario, sus partículas siempre tienen algún ordenamiento, conforme fueron sometidos a la acción de fuerzas naturales que intervinieron en su formación.

Las fuerzas de estructuración que intervinieron en la formación de los suelos arcillosos son complejos, de ahí que las estructuras resultantes tienen hipótesis teóricos de formación, todavía no bien demostradas.

Existen las siguientes estructuras: simples, panaloide, flocúlenla, compuestas, castillo de naipes y dispersa.

1.2.1.7.1 ESTRUCTURA SIMPLE.

Es aquella producida cuando las fuerzas debidas al campo gravitacional terrestre son claramente predominantes en la disposición de las partículas; es, por lo tanto, típica de suelos de grano grueso (gravas y arenas limpias) de masa comparativamente importante. Las partículas se disponen apoyándose directamente unas en otras y cada partícula posee varios puntos de apoyo.

Desde un punto de vista ingenieril, el comportamiento mecánico e hidráulico de un suelo de estructura simple, queda definido principalmente por dos características: la compacidad del manto y la orientación de sus partículas.

El término compacidad se refiere al grado de acomodo alcanzado por las partículas del suelo, dejando más o menos vacíos entre ellas. En un suelo muy compacto, las partículas sólidas que lo constituyen tienen un alto grado de acomodo y la capacidad de deformación bajo carga del conjunto será pequeña. En suelos poco compactos el grado de acomodo es menor; en ellos el volumen de vacíos y, por ende la capacidad de deformación, serán mayores. Una base de comparación para tener una idea de la compacidad alcanzable por una estructura simple, se tiene estudiando la disposición de un conjunto de esferas iguales. En la fig.III-2 se muestran en frente, perfil o planta, el estado más suelto y más compacto posible de tal conjunto. Los valores de n y e pueden calcularse fácilmente y son:

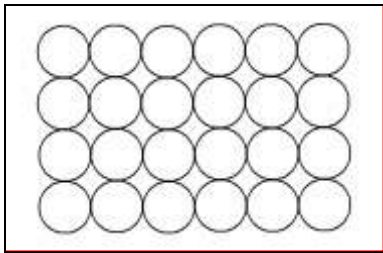
Estado más compacto $n = 26 \%$; $e = 0.35$

Estado más suelto $n = 47.6 \%$; $e = 0.91$

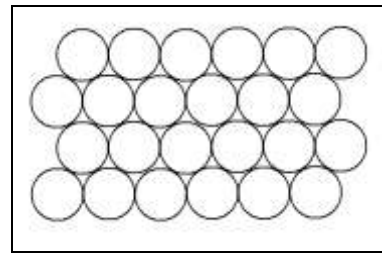
Las arenas naturales muy uniformes en tamaño poseen valores de n y e que se acercan mucho a los arriba escritos. Pero en las arenas comunes, los valores pueden disminuir apreciablemente y un pequeño porcentaje de partículas laminares aumenta notablemente el volumen de vacíos en el estado más suelto; en arenas bien graduadas, con amplia gama de tamaños, los estados más sueltos y más compactos tienen valores

de e y n mucho menores que los que corresponden a la acumulación de esferas iguales.

Figura - 2
Compacidad de un conjunto de esferas iguales



(a) Estructura simple en estado más suelto

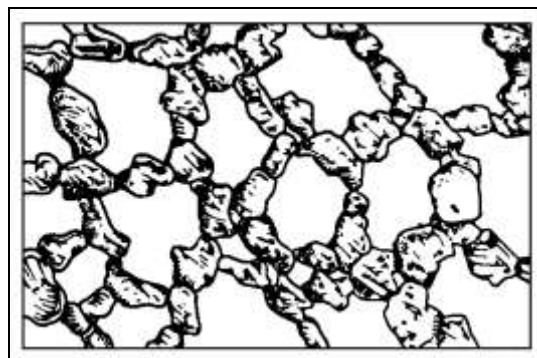


(b) Estructura simple en estado más compacto

1.2.1.7.2. ESTRUCTURA PANALOIDE.

Esta estructura se considera típica en granos de pequeño tamaño (0.002 mm de diámetro o algo menores) que se depositan en un medio continuo, normalmente agua y, en ocasiones aire.

Figura -3.
Estructura Panaloide



En estas partículas, la gravitación ejerce un efecto que hace que tiendan a sedimentarse, pero dada su pequeña masa, otras fuerzas naturales pueden hacerse de magnitud comparable; concretamente, si la partícula, antes de llegar al fondo del

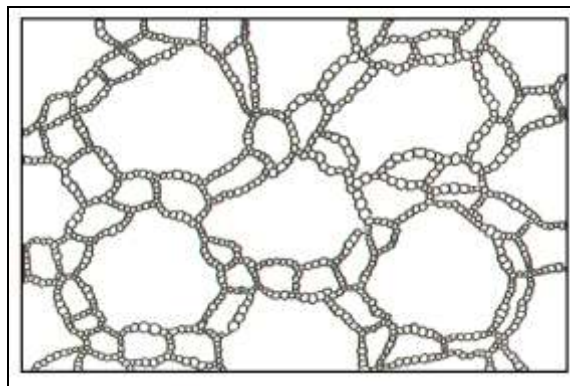
depósito, toca a otra partícula ya depositada, la fuerza de adherencia desarrollada entre ambas, puede neutralizar al peso, haciendo que la partícula quede detenida antes de completar su carrera; otra partícula puede ahora añadirse y el conjunto de ellas podrá llegar a formar una celda, con cantidad importante de vacíos, a modo de panal (Fig. III-3). Las fuerzas de adherencia, causantes de estas estructuras son fuerzas superficiales, ya mencionadas anteriormente.

1.2.1.7.3. ESTRUCTURA FLOCÚLENTA.

Es típica de granos cuyo tamaño fluctúan alrededor de 0.002 mm. La adherencia entre estas partículas, cuando se tocan, prácticamente anula a la gravedad, se unen entre ellas formando nuevos panales huecos, que se comportan como si fuera una sola partícula panaloide; por superposición, forman al final una estructura flocúlenla con un porcentaje de huecos, mayor a la estructura panaloide.

Figura -4.

Estructura Flocúlenla



Las partículas menores a 0.001 mm. Son las coloides, muchas de las cuales no decantan ya; generalmente están cargadas eléctricamente pero con cargas que se repelen, de ahí que no se unen.

Esta estructura al recién formarse, es débil e inestable; pero a medida que aumenta el peso de las nuevas capas superpuestas se densifican y adquieren finalmente una estabilidad aceptable. Ver Figura

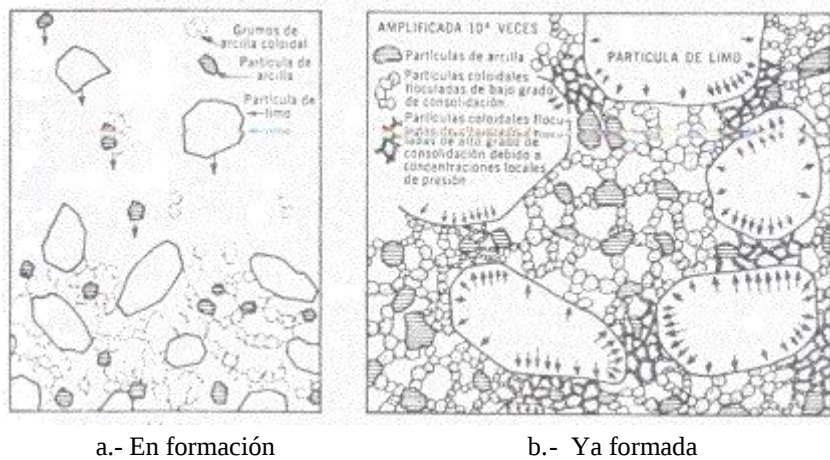
1.2.1.7.4 ESTRUCTURA COMPUESTA.

Se considera que las estructuras anteriores rara vez se presentan puras en la naturaleza, pues la sedimentación comprende partículas de todos los tamaños y tipos, para las que rigen las leyes de la naturaleza de modo diferente. Según las ideas hasta aquí expuestas sobre la estructuración, lo común sería encontrar en los suelos reales estructuras tales como las que ilustra la figura III-5. En estas formaciones se define un esqueleto constituido por granos gruesos y por masas coloidales de floculos que proporcionan nexos entre ellos.

La estructura que aparece en la figura III-5 sea formado en condiciones que permiten la sedimentación de partículas gruesas y finas simultáneamente; esto ocurre frecuentemente en agua de mar o lagos, con contenidos de sales apreciable, donde el efecto floculante de las sales coexiste con arrastre de vientos, corrientes de agua, etc.

Figura -5

Estructura compuesta



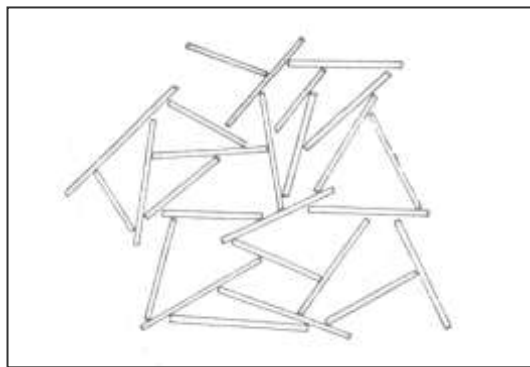
1.2.1.7.5 ESTRUCTURA DE CASTILLO DE NAIPES.

Este tipo de estructuración es una consecuencia natural de la formación laminar de las partículas sólidas de arcilla, otro factor importante es la gran superficie específica de estos materiales lo cual acrecienta el efecto de fuerzas superficiales de carácter electro – químico.

Es negativa la carga eléctrica de las partículas finas de arcilla y tiene este signo en casi toda la superficie plana de sus caras laterales principales; pero es positiva la carga eléctrica concentrada en sus aristas y vértices, lo cual hace que dichas aristas se junten con las caras planas de las partículas vecinas.

Esta estructuración es bastante floculada o sea con un alto grado de vacíos. Como las partículas de la arcilla son muy laminares y decantan en un medio acuoso, generalmente en movimiento, tienen una orientación, y sus caras planas tienden a la horizontalidad., con sus aristas contra la corriente. Ver figura III-6

Figura - 6
Estructura Castillo de Naipes



1.2.1.7.6. ESTRUCTURA DISPERSA.

Si bien la estructura de castillo de naipes supone contacto directo entre partículas; investigaciones recientes demuestran que este hecho es solo real en algunos casos;

siendo lo mas frecuente mas bien una estructura dispersa una estructura dispersa la cual resulta mas estable.

Las masas de suelo fino sometidas a esfuerzos, principalmente de compresión por peso propio, tienden a disminuir el ángulo formado entre los planos de las partículas. Al disminuir el espesor por presión, aumenta la concentración de material disuelto en suspensión en el medio acuoso que satura el material; y entran en acción las presiones osmóticas, que tienden a colocar las partículas sólidas en arcilla en posición horizontal separadas en una longitud inversamente proporcional ala magnitud de la presión por osmosis. Donde las partículas están más cercanas, la presión osmótica será mayor, por tanto un distanciamiento equilibrara la presión general y distribución de materia disuelta.

El conjunto de estructuras, anteriormente señalado, constituye un conjunto de teorías sobre estructura de los suelos finos; que son verdaderos solo en casos aislados; pero que de ninguna manera constituye, ninguno de ellos, una concepción general y verdadera para todos los casos. Son hipótesis con posibilidades reales de naturaleza, contradictorias a veces; lo que demuestra que no existe consenso al respecto. Nosotros diremos que el estudio estructural de los suelos finos es todavía un campo no bien investigado.

1.2.2. PROPIEDADES FISICO MECANICAS.

En este punto solo nos ocuparemos de hacer análisis de las principales propiedades físico mecánico del suelo.

1.2.2.1. GRANULOMETRÍA

El proceso de separación en grupos de partículas de suelo, de diferentes tamaños es lo que se llama análisis mecánico del suelo. Este análisis es de dos formas: el primero,

para los granos gruesos, basado en el tamizado y el segundo para los granos finos, basado en el ensayo de hidrometría. Los resultados de este análisis mecánico es a menudo expresado en porcentajes en peso, que pasa el material determinado tamiz. La gradación de un suelo puede ser representado gráficamente por medio de una curva tamaño- % que pasa; con escala logarítmica para los tamaños y normal para los porcentajes.

Estas características y otras más, veremos con más detalles en los posteriores pertinentes.

1.2.2.2. FRICCIÓN

Conforme a la teoría de coulomb cuando una cuña le falla resbala según plano inclinado le falla; sobre dicha cuña actúan fuerzas similares a un bloque que se desliza sobre un plano horizontal.

Se usa la analogía que existe entre la fricción interna de un suelo y la fuerza de corte que se requiere para hacer resbalar sobre una superficie un bloque cualquiera, sobre el que actúan pesos verticales debido a la gravedad. También se señala la tensión de corte requerida, para mover el bloque para diferentes presiones verticales.

Como en los suelos arenosos: $c = 0$ (sin cohesión), la recata inclinada da un ángulo $\emptyset$ respecto de la horizontal; siendo $S = V \tan \emptyset$; nos da la fricción interna del material, siendo $U = \tan \emptyset$ el coeficiente de fricción interna del suelo y $\emptyset$ el ángulo de fricción interna. El suelo arenoso ofrece resistencia al corte debido a la fricción que se desarrolla, a lo largo del alineamiento o curva de falla, debido al entrecruzamiento de vértices y oquedades de las partículas solidificadas que traban todo el deslizamiento. La fricción es característica de las arenas.

1.2.2.3. COHESIÓN.

La cohesión del terreno es la cualidad por la cual las partículas del terreno se mantienen unidas en virtud de fuerzas internas, que dependen, entre otras cosas del

número de puntos de contacto que cada partícula tiene con sus vecinas. En consecuencia, la cohesión es mayor cuanto más finas son las partículas del terreno.

En el análisis de las causas determinantes de la plasticidad es indispensable establecer la diferencia entre **cohesión** y **adhesión**. La adhesión es causada por la atracción de la fase líquida sobre la superficie sólida. La cohesión en un terreno húmedo es provocada por las moléculas de la fase líquida que actúa como puente o membrana entre las partículas vecinas. Tanto la cohesión como la adhesión son influenciadas por el contenido de coloides inorgánico, resultando de esta forma correlacionada con la plasticidad.

1.2.2.4. LÍMITES

Los suelos finos pueden tener infinidad de estados, según la cantidad de agua que hayan absorbido, que varían desde un estado prácticamente solidó a otro extremo prácticamente líquido. La cantidad de humedad determina su consistencia, ósea la mayor o menor cohesión entre sus partículas; la cual determina su estado de consistencia. Se define su consistencia como el grado de cohesión en las partículas de un suelo; y su resistencia a la acción de fuerzas externas que tienden a destruir su estructura; por tanto los diferentes estados de consistencia podrán ser definidos por ciertos límites de consistencia, o ciertos límites de humedad, propios de cada suelos. Los estados que se quiere diferenciar son: solidó, semisólido, plástico y líquido.

Cunado a un suelo solidó se le añade agua, cada partícula solidad de suelo se cubre por una delgada lamina de agua, cuyo espesor dependerá de la cantidad de agua que se baya añadiendo al suelo seco. A medida que el espesor de esta delgada lamina de agua crezca, aumentara la lubricación para el deslizamiento entre partículas húmedas; es decir disminuirá la fricción.

En la década de los años treinta del anterior siglo A. Atterberg, estableció procedimientos empíricos para diferenciar los límites de los diferentes estados de un

suelo cualquiera; llamó límite líquido al porcentaje de humedad que diferencia a un suelo de sus estados líquidos y plástico; llamó límite plástico al porcentaje de humedad que diferencia a un suelo de sus estados plástico y semisólido; llamó límite de contracción al porcentaje de humedad que diferencia a un suelo de sus estados semisólido y sólido.

Los límites de consistencia o los límites de Atterberg, como quiera llamárselos son propios de cada suelo y varían en márgenes considerables ya que dependen de su composición química y mineralógica, dependen de la forma y tamaño de sus partículas; de su capacidad de absorción de agua y de la película de agua que cubre a sus partículas sólidas.

1.2.2.5. PERMEABILIDAD

Hace aproximadamente unos 155 años atrás, Darcy observó experimentalmente que; la razón entre el gasto (Q), o cantidad de agua que pasa en una unidad de tiempo a través de un sección transversal (A) de suelo, era proporcional al gradiente hidráulico (i), el coeficiente de proporcionalidad (k) a si do llamado: “coeficiente de permeabilidad”; las ecuaciones que este investigador determinó fueron: $Q = k \cdot i \cdot A$; $i = h/l$.

Se define la permeabilidad diciendo que es la mayor o menor capacidad de un suelo, para permitir el paso de los fluidos a través de sus poros o vacíos intersticiales.

La permeabilidad depende del tamaño de sus partículas, de la viscosidad del agua de poro, de la relación de vacíos del suelo, de la estructura del suelo, del grado de saturación, de la orientación de las partículas, de las líneas de flujo o canalículos ya formados, etc. Las dimensiones de (k) corresponden a una velocidad.

Existen dos clases de suelo permeable e impermeables. Se denomina suelos impermeables, generalmente a las arcillas, que dejan pasar agua a través de su masa, en forma demasiado lenta, y en pequeñas cantidades.

El conocimiento de la permeabilidad es básico, para resolver problemas ingenieriles respecto al paso del agua por la estructura de ciertas obras civiles; así por ejemplo; el escurrimiento del agua debajo de los diques o presas, el flujo del agua través de una presa de tierra, el drenaje o expulsión del agua de poro en la consolidación de estratos de fundación; construcción de subdrenes; drenaje de rellenos en muros de contención; drenaje combinado en un sistema de estratos; etc.

1.2.2.6. CAPILARIDAD

Es evidente que la superficie exterior de un líquido, resiste tensiones de tracción debido a la atracción entre moléculas adyacentes a la superficie. Esta atracción es llamada tensión superficial.

La tensión superficial depende de la naturaleza del líquido y de su temperatura. Por el fenómeno de capilaridad el agua haciendo venciendo a la gravedad, por los canalículos intersticiales de los huecos entre las partículas sólidas del suelo hasta una altura sobre el nivel freático, que esta inversamente proporcional al diámetro efectivo de dichos huecos tomando en cuenta la curva de interfase aire – agua. Como el suelo tiene infinito numero de diámetros, en los canalículos por donde haciendo el agua, es necesario determinar el diámetro efectivo representativo de cada suelo; y su radio hidráulico (R_h).

Por capilaridad pueden descargarse presas de tierra, con perdidas superiores a la normal, pueden saturarse taludes taludes con el nivel freático en sus cunetas y fallar por deslizamiento, pueden producirse asentamientos en fundaciones, cuya cota de fundación se encuentra muy por encima del nivel freático en suelos finos, etc.

1.2.2.7. DENSIDAD

Se define como la relación: del peso, al aire, de una determinada cantidad de suelos con respecto al volumen que ocupa. Existen diferentes tipos de densidad según que el

suelo este: seco, húmedo o saturado; según su grado de compactación; según que este en el aire o sumergido. Esta definición es desde el punto de vista de la mecánica de suelos.

La densidad del suelo varía con la profundidad mientras mas profundo más denso, por que la profundidad creése la presión y aumenta su densificación. La densidad del aire disminuye con la altura así el agua hierve en la costa a 100 °C y en el altiplano boliviano a 87 °C. La densidad del agua disminuye a medida que aumenta la temperatura. La densidad se especifica en g/cc; kg/m³; ton/m³. Entre las densidades mas importantes de un suelo podemos señalas las siguientes: (Js) densidad seca; (Jh) densidad húmeda; (Jsat,) densidad de saturación; (Jd) densidad sumergida. Las cuatro densidades anteriores pueden denominarse también peso unitario: seco, húmedo, saturado o sumergido, respectivamente y más apropiadamente, se llama (Js) peso específico de los sólidos a la densidad natural de las rocas o partículas sólidas de los suelos. Se llama densidad del agua (Jw), al peso específico natural que tiene para cierta temperatura. La densidad del agua varía poco con la presión; pues prácticamente es incompresible. Todas las nominaciones anteriores son las más corrientes en mecánica de suelos; aunque no están de acuerdo con la física.

1.2.2.8 COMPACTACIÓN

Toda masa de suelo suelto ocupa mayor volumen; y a la inversa, todo suelo densificado ocupa menor volumen. Para una misma energía de compactación puede lograrse una mayor densificación conforme la lubricación entre partículas sea favorable y no exista exceso de humedad que fluidifique su consistencia desgastando la energía de compactación en cambios de formas plásticas, y no en densificación.

El porcentaje de húmeda que logra mayor densificación para una misma cantidad de energía de compactación, recibe el nombre de humedad óptima.

La densidad mayor que se logra para diferentes porcentajes de humedad, utilizando una misma cantidad de energía de compactación, se llama densidad máxima. Todo lo anterior es correcto para magnitudes unitarias.

La compactación de un suelo es deseable por tres razones: a) disminuye los asentamientos b) aumenta la tensión de corte remitante y c) disminuye la permeabilidad.

La teoría de la compactación y la relación humedad óptima – densidad máxima, para diferente energía de compactación unitaria; son actualmente de vital importancia en obras civiles donde el material de construcción es el suelo, tales como: presas de tierra, muros de retención; plataformas de carreteras, aéreo pistas, calles, etc.

La densidad del suelo, su control en obras de campo, determinación del hinchamiento, encogimiento, curva de saturación, curva de estabilidad, curva de compactación, numero de pasadas en obra, densidad en sitio, etc. Son algunos de los aspectos necesarios para un buen control estadístico de calidad en obra.

1.2.3 OTRAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS

Entre otras propiedades menos importantes podemos señalar las siguientes:

1.2.3.1 TENACIDAD

Para conocer la tenacidad de un suelo se preparan rollitos similares al ensayo de plasticidad, a partir de una masilla que se prepara previa mente. Cuando la muestra de suelo tiene alta tenacidad, su rigidez va creciendo a medida que se acerca la límite plástico; y una vez sobre pasado este límite, los rollitos son tiesos y flexan sino que se rompen cundo se los somete a flexión con pequeñas vigas empotradas entre los dedos. La tenacidad límite se la obtiene, cuando después de romperlas por flexión, los restos de los rollitos se desmenuzan y no pueden volverse arrollar.

Un suelo tendrá menor tenacidad, cunado los rollitos, al ser sometidos a flexión entre los dedos, flexan algo antes de romperse mostrando curvatura. Los suelos de poca tenacidad, flexan bastante antes de romperse y se desmenuzan en fracciones menores.

1.2.3.2. COLOR

Los colores oscuros son indicativos de presencia de materia orgánica. Los colores claros y brillantes, acusan presencia de suelos inorgánicos. Los colores ayudan a diferenciar los estratos, y a identificar el tipo de suelo.

Los colores café rojo y amarillo, en rocas y suelos, delata la presencia de óxidos de hierro e hidróxidos. Un pequeño porcentaje de óxidos de hierro, es suficiente para dar color a un suelo; así, la hemalita le da un color rojizo, la peolita amarillo, la lepidocrocita, café.

1.2.3.3. DILATANCIA

Es la propiedad que tienen algunos suelos especial mente los arenosos, que cuando se prepara con ellos un pasta saturada; esta brilla cuando la pasta se la golpea lanzándola de una mano a otra y se opaca cuando se la remoldea con los dedos.

Al golpearla, lanzándola entre la palma de la mano, se compacta y disminuye su relación de vacíos siendo expulsada al exterior el exceso de agua lo que le da el brillo de hígado; al remoldearla con los dedos se descompacta, aumenta la relación de vacíos y el agua exterior de nuevo se introduce y desaparece el brillo exterior.

1.2.3.4. ELASTICIDAD.

Muchos problemas de deformación parcial, pueden ser resueltos aplicando la teoría de la elasticidad; pero en base a simplificaciones; pues, la aplicación de esta teoría, a suelos, es muy discutible. Los suelos son, en realidad, heterogéneos y anisótropos y por tanto la teoría de Boussinesq es de hecho inaplicable a suelos; sin embargo una aplicación real es la determinación de asentamientos instantáneos debido a cargas. Otra aplicación es la viga Benkelman. En ambos casos se trata de asentamientos elásticos. El suelo es realmente elástico en reducido margen de límites de carga; dentro de esos límites es aplicable la ley de Hooke y el modulo de Poisson adaptados. La deformación elástica es reversible.

1.2.3.5. COMPRESIBILIDAD.

Es una propiedad íntimamente relacionada con la consolidación. Cuando una masa de suelo es sometida a presión; la carga incrementada inicialmente es absorbida por el agua de saturación; pero como el agua es incompresible, la sobre presión ocasionada en el agua recibe el nombre de “sobre presión hidrostática”. Esta sobre presión hace que el agua drene por los poros causando un asentamiento paulatino y también una transmisión paulatina de la sobre carga que soporta el agua, al suelo. La sobre presión en el agua es transmitida a toda el agua contenida en el suelo afectado por la carga, transmitiendo a través de los canalículos intersticiales de los vacíos de suelo, llenos de agua de saturación.

La consolidación se opera introduciendo varias suposiciones simplificadoras como ser: suelo homogéneo, suelo saturado, compresión en un solo sentido, propiedades hidráulicas del suelo constante durante la prueba, variación lineal de la presión con respecto a la relación de vacíos y otros.

La compresibilidad es plástica e irreversible, a corto plazo; pero puede operarse a largo plazo y en magnitud reducida.

1.2.3.6. REOLOGÍA

Es una parte de la física que estudia la viscosidad; la plasticidad; la elasticidad y el flujo o movimiento de la materia en general. En puntos anteriores ya hemos echo algunas indicaciones básicas de la plasticidad y elasticidad; añadiremos diciendo que la plasticidad existe cambio de forma pero no de volumen; mientras que en la elasticidad hay cambio temporal de forma y volumen; pero que retornan a su estado inicial, una vez desaparecidas las fuerzas exteriores que ocasionan su transformación.

La viscosidad es la propiedad que tienen algunos cuerpos fluidos, de resistir a un movimiento interno de su masa, por frotamiento de sus partículas entre si. A mayor

temperatura, menor viscosidad por mayor fluidez; es lo que ocurre con el hielo, el asfalto, la rocas, etc. en cuanto a su calentamiento sobre pase su punto de fusión.

En la terminología geológica referida a los deslizamientos, a las masas del lodo que se deslizan con rapidez se los denomina flujos de tierra o flujos de lodo; cuando ocurren lentamente se los denomina soliflucción.

1.3. PLASTICIDAD DE LOS SUELOS

1.3.1 GENERALIDADES Y DEFINICIONES

En algunos tipos de suelos añadiéndoles agua y remoldeandolos, adoptan una consistencia característica, que se ha denominado *Plástica*. Estos suelos han sido llamados arcillas. La plasticidad es, en este sentido, una propiedad tan evidente que ha servido hace mucho tiempo atrás para clasificar suelos en forma puramente descriptiva. Pronto se reconoció que existía una relación específica entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas. En ese momento la plasticidad se convirtió en una propiedad ingenieril de interés científico, dejando de ser una cualidad puramente descriptiva o de trabajabilidad en cerámica; las investigaciones posteriores han probado que la plasticidad de un suelo es debida a su contenido de partículas más finas de forma laminar. Como se pudo hacer notar en los anteriores capítulos del presente trabajo de tesis. La forma laminar ejerce una influencia importante en la compresibilidad del suelo, mientras que el pequeño tamaño propio de esas partículas hace que la permeabilidad del conjunto sea muy baja; existe, así, una relación entre la plasticidad y éstas y otras propiedades físicas de importancia.

Por otra parte, en épocas recientes, otras ramas de la ingeniería han desarrollado otra interpretación del concepto plasticidad, fundándose en las características esfuerzo-deformación de los materiales. Cuando un material se sujeta a esfuerzos de tensión uniaxial, por ejemplo, su comportamiento mecánico está descrito por su relación esfuerzos-deformaciones, una hipótesis referente a su compresibilidad y un criterio de fluencia. Resulta muy útil, en nuestros días, seguir manejando en Mecánica de Suelos un concepto simple de plasticidad, basado en ideas con un sentido físico inmediato, incorporando las conclusiones aplicables de la Teoría de la Plasticidad en forma gradual, en etapas más avanzadas del estudio y siempre con un criterio que permita adoptar puntos de vista teóricos claramente confirmados por la experimentación y el laboratorio.

Al tratar de definir en términos simples la plasticidad de un suelo, no resulta suficiente decir que un suelo plástico puede deformarse y remodelarse sin agrietamiento, pues una arena fina y húmeda tiene esas características cuando la deformación se produce lentamente, sin embargo, no es plástica; hay entre el comportamiento de la arcilla y el de la arena una importante diferencia: el volumen de la arcilla permanece constante durante la deformación mientras que el de la arena varía; además la arena se desmorona en deformación rápida.

En Mecánica de Suelos puede definirse la plasticidad como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse. Con esta definición se logra circunscribir la propiedad a las arcillas en ciertas circunstancias, según se verá más adelante.

Los experimentos realizados por diferentes científicos e investigadores han revelado que la plasticidad de los suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas laminares, que generan campos, que actúan como condensadores e influyen en las moléculas bipolares del agua; en los suelos plásticos, el espesor de estas capas de agua sólida y viscosa influidas es grande, y su efecto en la interacción de las partículas de suelo determinan su plasticidad. Si esta hipótesis fuera correcta, otros líquidos bipolares mezclados con polvo de arcilla deberían de producir suelos plásticos, mientras que los líquidos monopoles generarían suelos exentos de tal propiedad; es si se demostró que tales hechos se revelaban claramente en el laboratorio. También se vio que las partículas equidimensionales, de pequeña relación área a volumen y, por lo tanto, la escasa actividad eléctrica superficial, nunca constituyen suelos plásticos.

1.3.2. ESTADOS DE CONSISTENCIA. LÍMITES DE PLASTICIDAD

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios, de los cuales uno solo, el debido a Atterberg, se mencionará en lo que sigue. Atterberg hizo ver que, en primer lugar, la plasticidad no era una propiedad permanente de las

arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente.

Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg.

1. Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.
2. Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
3. Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.
4. Estado semisólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
5. Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Los anteriores estados son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando y no existen criterios estrictos para distinguir sus fronteras. El establecimiento de éstas ha de hacerse en forma puramente convencional. Atterberg estableció las primeras convenciones para ello, bajo el nombre general de límites de consistencia. La frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamada límite líquido, nombre que hoy se conserva. Se definió en términos de una cierta técnica de laboratorio que consistía en colocar el suelo remoldeado en un cápsula, formando en él una ranura y en hacer cerrar la ranura golpeando secamente la cápsula contra una superficie dura; el suelo tenía el contenido de agua correspondiente al límite líquido, cuando los bordes inferiores de la ranura se tocaban, sin mezclarse, al cabo de un cierto número de golpes.

La frontera convencional entre los estados plástico y semisólido fue llamada *límite plástico* y definido también en términos de una manipulación de laboratorio. En este caso se rolaba un fragmento de suelo hasta convertirlo en un cilindro de espesor no especificado; el agrietamiento y desmoronamiento del rollito, en un cierto momento, indicaba que se había alcanzado el límite plástico y el contenido de agua en tal momento era la frontera deseada

A las fronteras anteriores, que definen el intervalo plástico del suelo se les ha llamado límites de plasticidad.

Además de los límites de plasticidad (líquido y plástico) ya señalados, Atterberg definió otros límites de consistencia, que se mencionan a continuación:

1. El límite de adhesión, definido como el contenido de agua con el que la arcilla pierde sus propiedades de adherencia con una hoja metálica, por ejemplo, una espátula. Es de importancia en agricultura.
2. El límite de cohesión, definido como el contenido de agua con el que los grumos de arcilla ya no se adhieren entre sí.
3. El límite de contracción, frontera entre los estados de consistencia semisólido y sólido, definido con el contenido de agua con el que el suelo ya no disminuye su volumen al seguirse secando.

De estos límites, sólo el de contracción presenta un interés definido en algunas importantes aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Este límite se manifiesta visualmente por un característico cambio de tono oscuro a más claro que el suelo presenta en su proximidad, al irse secando gradualmente. Atterberg lo determinaba efectuando mediciones durante el proceso de contracción.

1.3.2.1. DETERMINACIÓN ACTUAL DEL LÍMITE LÍQUIDO

Cuando la plasticidad se convirtió en una propiedad índice fundamental, a partir de la utilización que Terzaghi y Casagrande hicieron de ella, la determinación de los límites de plasticidad se transformó en prueba de rutina en todos los laboratorios; en este caso, los métodos de Atterberg se revelaron ambiguos, dado que la influencia del operador es grande y que muchos detalles, al no estar especificados, quedaban a su elección. En vista de lo cual, Terzaghi sugirió a Casagrande la tarea de elaborar un método de prueba para la determinación del límite líquido estandarizando todas sus etapas, de modo que operadores diferentes en laboratorios distintos obtuviesen los mismos valores.

Como resultado de tal investigación nació la técnica basada en el uso de la Copa de Casagrande que es un recipiente de bronce o latón con un tacón solidario del mismo material; el tacón y la copa giran en torno a un eje fijo unido a la base. Una excéntrica hace que la copa caiga periódicamente, golpeándose contra la base del dispositivo, que es de hule duro o micarta. La altura de caída de la copa es, por especificación, de 1 cm. medido verticalmente desde el punto de la copa que toca la base al caer, hasta la base misma, estando la copa en su punto más alto. Es importante que este ajuste se haga con todo cuidado, usando un prisma metálico de 1 cm de lado, para hacer la calibración; este prisma se introduce entre base y copa, cuidando que su arista superior quede en contacto con el punto de la copa que golpee la base. (En las copas usadas este punto se delata por la brillantez causada por el desgaste.)

La copa es esférica, con radio interior de 54 mm. espesor 2 mm. y peso 200 ± 20 g. Sobre la copa se coloca el suelo y se procede a hacerle una ranura trapecial con dimensiones estandarizadas.

Para hacer la ranura debe usarse el ranurador laminar ya con las medidas establecidas; la copa se sostiene con la mano izquierda, con el tacón hacia arriba y el ranurador se pasa a través de la muestra, manteniéndolo normal a su superficie, a lo largo del meridiano que pasa por el centro del tacón, con un movimiento de arriba hacia abajo.

En poco tiempo se adquiere la soltura necesaria para hacer una ranura apropiada, con una sola pasada suave del ranurador, en una arcilla bien mezclada, sin partículas gruesas. En mezclas no uniformes o con partículas gruesas, los bordes de la ranura tienden a rasgarse; cuando esto suceda el suelo ha de volver a remoldearse con la espátula, colocándolo de nuevo y formando otra vez la ranura. En los suelos con arena o con materia orgánica no se puede formar la ranura con el ranurador, debiendo usarse entonces la espátula, utilizando el ranurador sólo para verificar las dimensiones.

En ocasiones se ha usado otro tipo de ranurador, curvo con sección trapezoidal, que no rebana el suelo al ser introducido en él, sino que forma la ranura desplazándolo, lo cual hace que se rompa la adherencia entre el suelo y la copa, especialmente en suelos arenosos; en tal caso los golpes hacen que el suelo deslice, cerrándose más pronto la ranura por la falta de aquella adherencia; por tal causa este ranurador no es aconsejable.

A partir de extensas investigaciones sobre los resultados obtenidos por Atterberg con su método original ya descrito y usando determinaciones efectuadas por diferentes operadores en varios laboratorios, se estableció que el límite líquido obtenido por medio de la copa de Casagrande corresponde al de Atterberg, si se define como el contenido de agua del suelo para el que la ranura se cierra a lo largo de 1.27 cm., con 25 golpes en la copa. Esta correlación permitió incorporar a la experiencia actual toda la adquirida previamente al uso de la copa.

De hecho, el límite líquido se determina conociendo 2 ó 3 contenidos de agua diferentes en su vecindad, con los correspondientes números de golpes y trazando la curva Contenido de agua y número de golpes. La ordenada de esa curva correspondiente a la abscisa de 25 golpes es el contenido de agua correspondiente al límite líquido. Para mejor determinación y apreciación se usa papel semilogarítmico (con los contenidos de agua en escala aritmética y el número de golpes en escala

logarítmica), la curva anterior, llamada de fluidez, es una recta cerca del límite líquido. El modo de determinar el límite líquido es mediante la ecuación de la curva de flujo que es:

$$W = F_w * \log N + C$$

Donde:

W = Contenido de agua, como porcentaje del peso seco.

F_w = índice de fluidez, pendiente de la curva de fluidez, igual a la variación del contenido de agua correspondiente a un ciclo de la escala logarítmica.

N = Número de golpes.

C = Constante que representa la ordenada en la abscisa de 1 golpe; se calcula prolongando el trazo de la curva de fluidez.

Para construir la curva de fluidez sin salirse del intervalo en que puede considerarse recta, se recomienda registrar valores entre los 6 y los 35 golpes, determinando 4 a 6 puntos, tres entre 6 y 15 golpes y tres entre 23 y 32. Para consistencias correspondientes a menos de 6 golpes se hace ya muy difícil discernir el momento del cierre de la ranura y si ésta se cierra con más de 35 golpes, la gran duración de la prueba causa excesiva evaporación. En pruebas de rutina basta con determinar 4 puntos de la curva de fluidez.

La fuerza que se opone a la fluencia de los lados de la ranura proviene de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, por lo que el número de golpes requerido para cerrar la ranura es una medida de esa resistencia, al correspondiente contenido de agua. De lo anterior puede deducirse que la resistencia de todos los suelos en el

límite líquido debe ser la misma, siempre y cuando el impacto sirva solamente para deformar al suelo, como es el caso de los suelos plásticos; pero en el caso de los suelos no plásticos (arenosos), de mayor permeabilidad que las arcillas, las fuerzas de impacto producen un flujo del agua hacia la ranura, con la consecuencia de que el suelo se reblandece en las proximidades de aquélla, disminuyendo su resistencia al esfuerzo cortante; por ello en esos suelos, el límite líquido ya no representa un contenido de agua para el cual el suelo presente una resistencia al corte definida.

Por medio de pruebas de laboratorio se determinó que el límite líquido de un suelo plástico corresponde a una resistencia al corte de 25 g/cm^2 . La hipótesis de que el número de golpes es una medida de la resistencia al corte del suelo, fue enunciada por A. Casagrande y se confirma por el hecho de que una gráfica semilogarítmica de la resistencia contra el contenido de agua es recta y no sólo en la vecindad del límite líquido, sino en consistencias bastante distintas.

1.3.2.2 DETERMINACIÓN ACTUAL DEL LÍMITE PLÁSTICO

Para la determinación del límite plástico, se debe realizar la formación de rollitos con la condición de que el diámetro sea de 3 mm. La formación de los rollitos se hace usualmente sobre una hoja de papel totalmente seca, para acelerar la pérdida de humedad del material; también es frecuente efectuar el rolado sobre una placa de vidrio. Cuando los rollitos llegan a los 3 mm, se doblan y presionan, formando una pastilla que vuelve a rolarse, hasta que en los 3 mm justos ocurra el desmoronamiento y agrietamiento; en tal momento se determinará rápidamente su contenido de agua, que es el límite plástico.

Se han hecho varios intentos para sustituir el rolado manual por la acción mecánica de algún aparato, pero sin resultados satisfactorios, debido, en primer lugar, a que la experiencia ha demostrado que en esta prueba la influencia del operador no es importante y, en segundo, a que, hasta la fecha, no ha podido desarrollarse ningún

aparato en que la presión ejercida se ajuste a la tenacidad de los diferentes suelos; en el rolado manual, el operador, guiado por el tacto, hace el ajuste automáticamente.

1.3.2.3 CONSIDERACIONES SOBRE LOS LÍMITES DE PLASTICIDAD E ÍNDICE DE TENACIDAD

La plasticidad de una arcilla puede describirse en términos de dos parámetros: el límite líquido y el índice plástico, éste numéricamente igual a la diferencia del límite líquido y el plástico.

El límite líquido, según se dijo, indica el contenido de agua para el cual el suelo tiene una cierta consistencia, con una resistencia al corte de 25 g/cm^2 . Por el contrario, la resistencia de diferentes suelos arcillosos en el límite plástico no es constante, sino que pueden variar ampliamente. En las arcillas muy plásticas, la tenacidad en el límite plástico es alta, debiéndose aplicar con las manos considerable presión para formar rollitos: por lo contrario, las arcillas de baja plasticidad son poco tenaces en el límite plástico.

Algunos suelos finos y arenosos pueden, en apariencia, ser similares a las arcillas, pero al tratar de determinar su límite plástico se nota la imposibilidad de formar los rollitos, revelándose así la falta de plasticidad del material; en estos suelos el límite líquido resulta prácticamente igual al plástico y aún menor, resultando entonces un índice plástico negativo; las determinaciones de plasticidad no conducen a ningún resultado de interés y los límites líquido y plástico carecen de sentido físico.

Cuando dos suelos plásticos tienen los mismos límites de plasticidad o el mismo índice plástico, pero diferentes curvas de flujo, el suelo cuya curva sea más tendida, es decir, el de menor índice de fluidez, tendrá mayor resistencia en el límite plástico; la resistencia al esfuerzo cortante de una arcilla en el límite plástico es una medida de

su tenacidad, por lo cual puede decirse que la tenacidad de las arcillas de igual índice plástico crece a menor índice de fluidez. Por lo cual de lo mencionado anteriormente se puede deducir la siguiente relación:

$$Tw = \frac{Ip}{Fw}$$

Donde:

Tw = Índice de Tenacidad

Ip = Índice Plástico

Fw = índice de fluidez,

Para tener una medida relativa de la tenacidad basta definir a Tw como índice de tenacidad. El índice de tenacidad conjuntamente con el de fluidez, es útil para establecer una diferenciación adicional en lo que se refiere a las características de plasticidad de las arcillas. El índice de tenacidad generalmente varía entre 1 y 3 y rara vez alcanza valores de 5 o menores que 1; un alto valor de Tw , no implica que los límites de plasticidad sean altos. Entre los diversos métodos posibles para representar y comparar las propiedades de plasticidad de los suelos, es recomendable uno en el que se dibujan como abscisas los límites líquidos y como ordenadas los índices plásticos.

En la realización de este tipo de gráfica resaltan ciertas características generales. Por ejemplo, se encontró que cuanto más altos están los puntos de la gráfica, tanto más tenaces son las arcillas. En las arcillas inorgánicas que no sean de origen volcánico, es poco frecuente un límite líquido mayor de 100; sin embargo, en arcillas volcánicas u orgánicas son relativamente frecuentes valores sobre ese número; las bentonitas, por ejemplo, alcanzan valores hasta de 600, siendo significativo que su contenido de partículas laminares coloidales sea de 70% aproximadamente, mientras que el de las arcillas ordinarias de alta plasticidad es de alrededor de 30%

1.3.2.4. INDICE DE PLASTICIDAD

El índice de plasticidad (IP) numéricamente es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), es decir:

$$Ip = LL - LP$$

El índice de plasticidad nos indica la magnitud del campo plástico del material analizado. Esto significa que un índice plástico elevado indicará mayor plasticidad del suelo.

Tabla -2
Plasticidad de diversos suelos arcillosos/limosos

Categoría	Suelo	IP	Grado de plasticidad
I	Arena o limo • trazas de arcilla • poca arcilla	0-1	No plástico
		1-5	Ligera plasticidad
		5-10	Baja plasticidad
II	Franco arcilloso	10-20	Mediana plasticidad
III	Arcilloso limoso Arcilla	20-35	Alta plasticidad
		>35	Muy alta plasticidad

Podemos decir también que el índice de plasticidad se expresa con el porcentaje del peso en seco de la muestra de suelo e indica el tamaño del intervalo de variación del contenido de humedad con el cual el suelo se mantiene plástico. En general, el índice de plasticidad depende sólo de la cantidad de arcilla existente e indica la finura del suelo y su capacidad para cambiar de configuración sin alterar su volumen. Un IP

elevado indica un exceso de arcilla o de coloides en el suelo. Siempre que el LP sea superior o igual al LL, su valor será cero.

El índice de plasticidad también da una buena indicación de la compresibilidad. Mientras mayor sea el IP, mayor será la compresibilidad del suelo.

1.4 DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS SUELOS

1.4.1. GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS

1.4.1.1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

En la mecánica de suelos, se creyó en los comienzos de la investigación de 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. Aún hoy, tal parece que todo técnico interesados en los suelos debe pasar a modo de etapa de iniciación, por una época que se siente obligado a creer que, con suficiente experiencia, es posible deducir las propiedades mecánicas de los suelos a partir de su distribución granulométrica o descripción por tamaños; es común, sin embargo, que una no muy delicada experiencia haga que tal sueño se desvanezca.

Solamente en suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de lo referente a las propiedades físicas del material; en efecto, la experiencia indica que los suelos gruesos bien graduados, o sea con amplia gama de tamaños, tienen comportamiento ingenieril más favorable.

En suelos gruesos el comportamiento mecánico e hidráulico está principalmente definido por la compactación de los granos y su orientación, características que se destruye, por la misma manera de realizarse, la prueba de granulometría de modo que en sus resultados finales se ha tenido que perder toda huella de aquellas propiedades tan decisivas. De esto se desprende lo muy deseable que sería poder hacer una investigación granulométrica con un método tal que respetara la estructuración inalterada del material; este método, sin embargo, hasta hoy no se ha encontrado y todo parece indicar que no se podrá desarrollar jamás.

En suelos finos en estado inalterado, las propiedades mecánicas e hidráulicas dependen en tal grado de su estructuración e historia geológica, que el conocimiento de su granulometría, resulta totalmente inútil.

Sin embargo el ingeniero interesado en los suelos debe estar suficientemente familiarizado con los criterios técnicos basados en la distribución granulométrica y con los métodos mas importantes para su determinación pues estos temas ocupan aún un espacio apreciable dentro de la literatura técnica y se hace necesario al ingeniero moderno estar más informado sobre esta materia que aquellos que, sin conveniente meditación de sus ideas, aplican normas simplistas, conducentes a conclusiones inaceptables.

1.4.1.2 SISTEMAS DE CALIFICACIÓN DE SUELOS BASADOS EN CRITERIOS DE GRANULOMETRÍA

Los límites de tamaños de las partículas que constituyen un suelo ofrecen un criterio obvio para una calificación descriptiva del mismo.

Tal criterio fue usado en Mecánica de suelos desde un principio e incluso antes de la etapa moderna de esta ciencia. Originalmente, el suelo se dividía únicamente en tres o cuatro fracciones debido a lo engorroso de los procedimientos disponibles de separación por tamaños. Posteriormente, con el advenimiento de la técnica del cribado, fue posible efectuar el trazo de curvas granulométricas, contando con agrupaciones de las partículas de suelo en mayor número de tamaños diferentes.

Actualmente se pueden aplicar notablemente las curvas en los tamaños finos, gracias a la aplicación de técnicas de análisis de suspensiones.

1.4.1.3 LIMITES DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DEL SUELO

Varias organizaciones han intentado desarrollar límites de tamaño para gravas, limos y arcillas, en base a los tamaños de las partículas de los suelos. En las tablas que se muestran a continuación presentan los límites de tamaños recomendados en los diferentes sistemas como ser: Sistema de la American State Highway and Transportation Officials (AASHTO); sistema Unifiet Soil Classification; Clasificación internacional; Clasificación M.I.T, y otras.

En las tablas muestran que las partículas de suelo mas pequeñas que 0.002 mm. Son clasificadas como arcillas, sin embargo las arcillas por naturaleza son cohesivas y pueden convertirse en un filamento cuando están húmedas. Esta propiedad es causada por la presencia de minerales de arcilla tales como la caolinita, la ilita y la montmorilonita. En contraste algunos minerales como el cuarzo y el feldespato pueden estar presentes en un suelo en partículas de tamaño tan pequeño como los minerales de arcilla, por tanto se denominan partículas de tamaño de arcilla y no partículas arcillosas.

Algunas clasificaciones granulométricas de los suelos según sus tamaños son las siguientes:

Sistema de Clasificación Unificado

Tabla -3

Tamaño en mm.

75 mm

4.75 mm

0.075 mm.

GRAVA	ARENA	LIMO Y ARCILLA
-------	-------	----------------

Sistema Clasificación Aashto

Tabla -4

Tamaño en mm.

75 mm.

2 mm.

0.05 mm.

0.002 mm.

GRAVA	ARENA	LIMO	ARCILLA
-------	-------	------	---------

Sistema de Clasificación ASTM

Tabla -5

Tamaño en mm.

75 mm. 2 mm. 0.05 mm. 0.002 mm.

GRAVA	ARENA	LIMO	ARCILLA
-------	-------	------	---------

Sistema de Clasificación Británico

Tabla - 6

Tamaño en mm.

60 mm. 2 mm. 0.06 mm. 0.002 mm.

GRAVA	ARENA	LIMO	ARCILLA
-------	-------	------	---------

Sistema de Clasificación Internacional

Tabla - 7

Tamaño en mm.

2 0.2 0.02 0.002 0.0002

Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	Ultra arcilla (coloides)
--------------	------------	------	---------	--------------------------

Sistema de clasificación Instituto Tecnológico de Massachusetts M. I. T.

Tabla - 8

Tamaño en mm.

2 0.6 0.2 0.06 0.02 0.006 0.002 0.0006 0.0002

Gruesa	Media	Fina	Grueso	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina
ARENA			LIMO			ARCILLA		

Sistema de Clasificación Alemana

Tabla - 9
Tamaño en mm.

MATERIAL	CARACTERISTICAS	TAMAÑO mm.
Piedra	_____	Mayor de 70 mm.
Grava	Gruesa	30 - 40
	Media	5 - 30
	Fina	2 - 5
Arena	Gruesa	1 - 2
	Media	0.2 - 1
	Fina	0.1 - 0.2
Polvo	Grueso	0.05 - 0.1
	Fino	0.02 - 0.05
Limo	Grueso	0.006 - 0.02
	Fino	0.002 - 0.006
Arcilla	Gruesa	0.0006 - 0.002
	Fina	0.0002 - 0.0006
Ultra arcilla	_____	0.00002 - 0.0002

Debajo de 0.00002 mm. las partículas constituyen disoluciones verdaderas y ya no se depositan. Con frecuencia se han usado otros tipos de clasificación, pero se considera que las clasificaciones señaladas son suficientes para dar idea del mecanismo utilizado en su elaboración.

Puede notarse que las clasificaciones anteriores y otras existentes se contradicen en ocasiones, nombrando un intervalo de tamaño de partículas de suelo de una manera y en otro sistema le corresponde otra clasificación. Pero sin duda, la objeción mas importante que se puede hacer a estos sistemas es el uso de las palabras limo y arcilla para designar fracciones de suelo definidas exclusiva mente por tamaños. Estos términos se han usado en ingeniería como nombres para designar tipos de suelo con propiedades físicas definidas; la razón por lo que estos nombres se introdujeron para

ciertas fracciones de tamaños fue la idea errónea de que tales tamaños eran las causas de aquellas características típicas. Sin embargo hoy se sabe que las características de una arcilla típica se deben en forma muy preponderante a las propiedades de su fracción más fina. Un suelo formado por partículas de cuarzo del tamaño de las arcillas o de un depósito natural de harina de roca de la misma graduación, tendría que clasificarse como 100% de la arcilla a pesar de que el conjunto no presenta ninguna de las propiedades que definen el comportamiento de ese material.

Por otra parte, un suelo de comportamiento típicamente arcilloso, dentro de límites apropiados de humedad, posiblemente no contenga más de un 20% de arcilla, según el criterio granulométrico. En lo sucesivo, los términos limo y arcilla se emplearán únicamente para designar tipos de suelo, recurriendo a la mención específica de un tamaño de partícula cuando se requiera designar cierta fracción granulométrica.

1.4.1.4 CLASIFICACIONES LITERALES

Los términos principales para describir un suelo, utilizados por el ingeniero civil son grava, arena, limo, y arcilla como se mencionó anteriormente. La mayoría de los materiales en su estado natural son una mezcla de uno o más de estos constituyentes y muchos contienen materia orgánica en un estado parcial o totalmente descompuesto. A la mezcla se le dará el nombre del elemento constituyente que tenga la mayor influencia sobre su comportamiento y los restantes se indicarán como adjetivos. Así, una arcilla limosa tiene predominantemente las propiedades de la arcilla, pero contiene una cantidad de limo, entonces se citan los elementos separados por la conjunción "y" sin que importe el orden de aparición. Suele ocurrir que en algunos materiales aparecen constituyentes en muy poca cantidad, casos en los cuales se utiliza el término "trazas". Un limo arcilloso con trazas de grava señalará que la cantidad de grava es despreciable.

1.4.1.5 REPRESENTACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA

Se denomina distribución granulométrica de un suelo a la división del mismo en diferentes fracciones, seleccionadas por el tamaño de sus partículas componentes; las partículas de cada fracción se caracterizan porque su tamaño se encuentra comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo, en forma colectiva para las distintas fracciones, de tal modo que el máximo de una fracción es el mínimo de la que la sigue correlativamente. La separación en fracciones se hace sencillamente por mallas, cuando es posible el cribado; pero en suelos de grano muy pequeño, que forman grumos, deben adaptarse procedimientos bastante mas complicados para separar las partículas individuales y ello da lugar a resultados mucho mas confusos, en lo que, como se verá, para lograr las fracciones constituyentes ha de recurrirse a hipótesis no muy satisfactorias, llegándose a resultados finales bastante dudosos.

En suelos gruesos (gravas, arenas y limos no plásticos), de estructura simple, la característica mas importante para definir su resistencia es la compacidad; angulosidad de los granos y la orientación de las partículas juegan también un papel importante, aunque menor. Evidentemente, cualquier análisis por malla no da ninguna información sobre estos aspectos. La compresibilidad de estos suelos, por otra parte, aunque también dependen fundamentalmente de su estructuración y compacidad, se ve influida en bastante mayor grado por la granulometría, según ha puesto de manifiesto las investigaciones realizadas.

Como se sabe los suelos gruesos con amplia gama de tamaños (bien graduados) se compactan mejor, para una misma energía de compactación, que los suelos muy uniformes (mal graduados). Esto sin duda es cierto, pues, sobre todo con vibrado, las partículas mas chicas pueden acomodarse en los huecos entre las partículas mas grandes, adquiriendo el conjunto una mayor compacidad, sin embargo, la relación entre granulometría y facilidad de compactación no ha podido pasar de una correlación cualitativa tan vaga como la que queda enunciada, por lo cual en estudios para compactación de suelos poco o ningún provecho puede obtenerse de la curva granulométrica de los suelos gruesos. Mucho mas difícil es de establecer son las propiedades mecánicas de interés ingenieril de los suelos finos tradicionalmente

llamados cohesivos (arcillas y limos plásticos). Dependen de un número mucho mayor de conceptos que las que los suelos gruesos. Basta decir que ninguna de las circunstancias que definen las propiedades mecánicas de un suelo fino está descrita por la distribución granulométrica de dicho suelo. En mucho mayor medida de lo que sucede en suelos gruesos, el conocimiento de la distribución granulométrica resulta estéril en el caso de los suelos finos.

Todavía es común en la actualidad que muchas especificaciones referentes al uso o rechazo de los materiales para la construcción de obras civiles contengan preceptos granulométricos en mayor o menor grado. Esta situación a de verse como indeseable pues, debe insistirse, no es casi nunca el tamaño de las partículas de suelo fino el que define su comportamiento mecánico, y una norma de aceptación o rechazo basada en tal criterio corre el riesgo de aceptar lo malo y rechazar lo que seria mejor. Por ejemplo, una arcilla caolinítica, relativamente inerte ante el agua y que para muchos usos resultaría perfectamente aprovechable, puede tener una distribución granulométrica análoga a una arcilla montonorilonitica, quizá con materia orgánica, sumamente activa, que constituye en casi todos los casos un suelo que debe rechazarse para su uso en la construcción de diferentes obras.

Una de las razones que han contribuido a la difusión de las técnicas granulométricas es que, en cierto sentido, la distribución granulométrica proporciona un criterio de clasificación. Los conocidos términos arcilla, limo, arena y grava tienen tal origen y un suelo se clasificaba como arcilla o como arena según tuviera tal o cual tamaño máximo. La necesidad de un sistema de Clasificación de suelos no es discutible, pero el ingeniero ha de buscar uno en que el criterio de clasificación le sea útil, es decir, en el que se clasifique a los suelos de acuerdo con sus propiedades ingenieriles fundamentales y no según el tamaño de sus partículas, que poco significa.

De todos modos como en muchas cuestiones de aplicación de sus técnicas, el ingeniero actual en vías terrestres hace un uso todavía relativamente frecuente de las

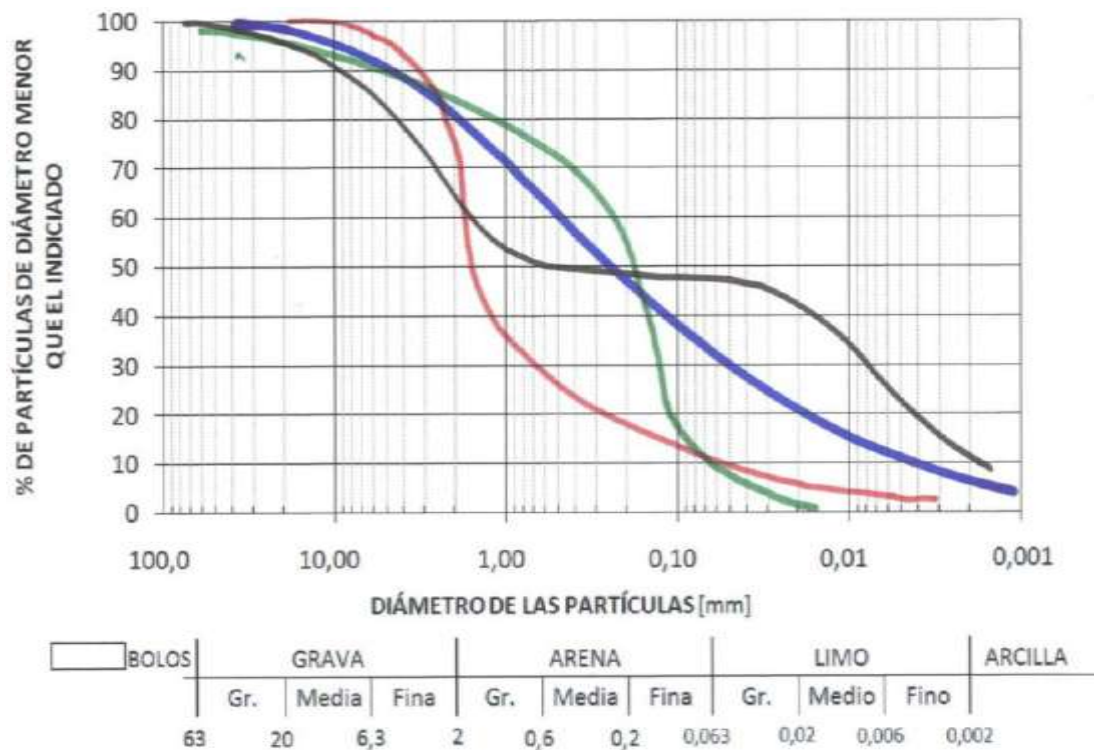
curvas granulométricas, se expone a continuación algunos detalles sobre tales métodos.

Siempre que se cuente con suficiente número de puntos, la representación gráfica de la distribución granulométrica debe estimarse preferible a la numérica de tablas.

La gráfica de la distribución granulométrica suele dibujarse con porcentajes como ordenadas y tamaños de las partículas como ábsidas. Las ordenadas se refieren a porcentaje, en peso, de las partículas menores que el tamaño correspondiente. La representación en escala semilogarítmica (eje de las ábsidas en escala logarítmica) resulta preferible a la simple representación natural, pues en la primera se dispone de mayor amplitud en los tamaños finos y muy finos, que en escala natural muy comprimidos, usando un módulo práctico de escala.

La forma de la curva da idea inmediata de la distribución granulométrica del suelo; un suelo constituido por partículas de un solo tamaño estará representado por una línea vertical (pues el 100% de sus partículas, en peso es de menor tamaño que cualquiera mayor que el suelo posea): una curva muy tendida indica gran variedad en tamaños (suelo bien graduado)

Figura - 7

Representación grafica de la distribución granulométrica

Esta clasificación es necesaria en mecánica de suelos, pero no suficiente. Se complementa siempre la granulometría con el ensayo de Límites de Atterberg, que caracterizan la plasticidad y consistencia de los finos en función del contenido de humedad y los ensayos que se requieran según su necesidad.

La curva azul es un suelo bien graduado, la roja especifica una uniformidad en las arenas gruesas, curva verde uniformidad en arenas finas y la curva color negro con falta de tamaños intermedios casi sin arena

1.4.1.5.1 DESCRIPCIÓN DE LA GRADACIÓN

En función a la figura V-1 La forma de la curva de distribución de tamaños de partículas, indica si los tamaños varían en un rango amplio (curva C) o estrecho

(curva B); si el rango tiende a los tamaños mayores del suelo grueso (A) o a los menores del suelo fino (C). Si todos los tamaños tienen proporciones en peso relativamente iguales, el rango es amplio y la curva suave, el suelo así será bien gradado (A y C). La mala gradación puede ser por falta de extensión (B) o por discontinuidad. En suelos granulares la gradación, expresada numéricamente, le da el coeficiente de uniformidad C_u con el coeficiente de curvatura C_c .

Cuanto más alto sea C_u , mayor será el rango de tamaños del suelo. Los D_i ; $i = 10, 30, 60$ son los tamaños ϕ de las partículas, para el cual el $i\%$ del material es más fino que ese tamaño

1.4.1.5.2 DIÁMETROS EFECTIVOS, COEFICIENTES DE UNIFORMIDAD Y CURVATURA

Un análisis cuantitativo del gráfico granulométrico semilogaritmico acumulativo exige el uso de parámetros, tales como:

D10: tamaño máximo de las partículas que constituyen la porción 10% más fina del suelo. Recibe el nombre particular de diámetro efectivo.

D30: tamaño máximo de las partículas que constituyen la porción 30% más fina del suelo.

D60: tamaño máximo de las partículas que constituyen la porción 60% más fina del suelo.

Estos dos últimos parámetros no tienen nombres literales y el de diámetro efectivo fue ideado por Allen Hazen.

Su obtención es muy sencilla: consiste en trazar abscisas por los porcentajes 10,30 y 60 de material pasante hasta intersectar la curva granulométrica semilogarítmica acumulativa. Los diámetros correspondientes a los puntos de intersección serán, respectivamente, D10, D30 y D60. Estos parámetros servirán para la obtención de los coeficientes de uniformidad y curvatura que definen cuantitativamente la graduación de los materiales granulares.

El coeficiente de uniformidad (C_u) es la razón por cociente entre D_{60} y D_{10} . No tiene valores límites.

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

Esta idea fue producto de Allen Hazen para clasificar arenas de filtro rápido de acueductos.

A medida que D_{60} se aleja más de D_{10} , aumenta el coeficiente de uniformidad, lo que significa que mejora la graduación del material. Si, por el contrario, son muy parecidas, tenemos un material mal graduado cuya gráfica tiende a una línea vertical. De modo que C_u mide la mejor representación de tamaños. En arenas graduadas: $C_u > 6$, mientras que las gravas bien graduadas son aquellas en las que $C_u > 4$.

Podría ser que entre los puntos D_{60} y D_{10} el gráfico tuviera algunas sinuosidades, por lo que conviene tener una medida intermedia que es lo que persigue el coeficiente de curvatura (C_c), denominado así porque se está controlando la curvatura o rectitud del gráfico en ese intervalo.

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

La experiencia indica que materiales bien graduados poseen un coeficiente de curvatura fluctuante entre 1 y 3.

1.4.1.6. ANÁLISIS MECÁNICO DE SEPARACIÓN DE SUELOS

Bajo ese título general se comprenden todos los métodos para la separación de un suelo en diferentes fracciones, según sus tamaños. De tales métodos existen dos que merecen atención especial: el cribado por mallas y el análisis de una suspensión del suelo con hidrómetro (densímetro).

El primero se usa para obtener las fracciones correspondientes a los tamaños mayores del suelo; generalmente se llega así hasta el tamaño correspondiente a la malla N° 200 (0.074 mm). La muestra de suelo se hace pasar sucesivamente a través de un juego de tamices de aberturas descendentes, hasta la malla N° 200, los retenidos en cada malla se pesan y el porcentaje que representan respecto al peso de la muestra total se suma a los porcentajes retenidos en todas las mallas de mayor tamaño; el complemento a 100% de esa cantidad da el porcentaje de suelo que es menor que el tamaño representado por la malla en cuestión. Así puede tenerse un punto de la curva acumulativa correspondiendo a cada abertura. El método se dificulta cuando estas aberturas son pequeñas y por ejemplo, el cribado a través de las mallas N° 100 (0.149 mm) y N° 200 (0.074 mm) suele requerir agua para ayudar el paso de la muestra (procedimiento de lavado).

Los tamaños menores del suelo exigen una investigación fundada en otros principios. El método del hidrómetro (densímetro) es hoy, quizá, el de uso más extendido. Como todos los de este grupo, el método se basa en el hecho de que la velocidad de sedimentación de partículas en un líquido es función de su tamaño.

La ley fundamental de que se hace uso en el procedimiento del hidrómetro es debida a Stokes y proporciona, una relación entre la velocidad de sedimentación de las partículas del suelo en un fluido y el tamaño de esas partículas. Esta relación puede establecerse empíricamente, haciendo observaciones con microscopio o bien por procedimientos teóricos.

1.4.1.7. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA DE ANÁLISIS MECÁNICO.

Dentro del análisis de los suelos, se encuentra el de la granulometría, que no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforma un suelo. Esto se realiza con ayuda de un juego de mallas, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, en donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculos y la curva granulométrica.

Si bien se realiza una distribución de tamaños, esto no incide en la forma que puedan tener los granos de suelo, ya que al retener material en una malla se observa diferentes tamaños y el porcentaje que se calcula esta basado estrictamente en los pesos que se retiene en la malla, referido al peso total que se utiliza en el ensayo.

El factor fundamental del ensayo es la curva granulométrica, que se dibuja en una escala logarítmica, ya que de no ser así, la representación gráfica tendría que usar una escala demasiado grande.

El objetivo es obtener el porcentaje de material que pasa en cada tamiz, para luego graficar una curva granulométrica y así tener una visión de la distribución del tamaño de los granos presentes en una masa de suelo.

1.4.1.7.1. PROCEDIMIENTO.

En primer lugar la muestra debe ser representativa, por lo que se tiene que usar el cuarteador mecánico, este proceso se repite hasta obtener la cantidad necesaria para la realización del ensayo.

Las cantidades ensayadas, dependerán del tipo de suelo que tienen, así por ejemplo: para suelos granulares se estima aproximadamente unos 5000 gramos, para suelos arcillosos sin presencia de piedras puede variar entre 300 a 500 gramos.

1.4.1.7.2 MÉTODO GENERAL.

- Se procede a secar el material, hasta que los granos no se encuentren pegados o formando grumos, en caso de existir grumos hay que buscar la forma de desintegrarlos, pero sin triturar las partículas verdaderas del suelo, para ello se pueden ayudar con rodillos de madera, u otro objeto parecido.

- Los tamices para disponer para la parte gruesa del material son: 2 ½", 2", 1 ½", 1", ¾", 3/8", N°4, N°10.
- Los tamices para la parte fina del suelo son: N°40 y N° 200.
- El método consiste en hacer pasar el material por los tamices de acuerdo a la disposición mencionada, para ello se tiene que realizar un agitado de los tamices por el tiempo de 15 minutos.
- El tamizado puede ser manual o mecánico utilizando el Rop-Tap, aunque luego hay que realizar una revisión para observar si es que ya no pasa material por cada malla.
- Si el tamizado es manual, es muy práctico utilizar bandejas en donde se depositará cada material que pasa, luego estos identificarlos de acuerdo a la malla que se haya utilizado.
- Proceder a realizar el pesaje del material retenido en cada malla y lo que pasa en el tamiz N°200.

Partiendo por el tamiz N°10.

- Una vez realizada la granulometría del grueso, se tiene un saldo de muestra que pasa el tamiz N° 10. Este, a veces, puede ser en una cantidad considerablemente grande, por lo que resulta moroso tamizar tanto material fino a lo que cual se realiza la siguiente propuesta.
- Del material que pasa el tamiz N° 10, se considera pesar solamente 300 gramos, siempre referido al peso total utilizado en el ensayo.
- Luego este material se hace pasar por el tamiz N°40 y N°200 respectivamente.
- Pesar los materiales retenidos en las mallas, además del material retenido en la base o pasante del N° 200.
- Esta trabajo se tiene que corregir en la planilla, columna del porcentaje que pasa, con la siguiente regla de tres.

$$\%Tci = \frac{Ti * T_{10}}{100}$$

Donde:

$\%Tci$ = Porcentaje que pasa corregido en cada malla del fino.

Ti = Porcentaje que pasa calculado para cada tamiz en el fino.

T_{10} = Porcentaje que pasa en el Tamiz N° 10 (Dato nexa al peso total)

- Si la parte fina del material contiene todavía grumos pequeños, entonces se debe realizar el ensayo por el método del lavado.

1.4.7.1.3. MÉTODO DEL LAVADO.

- Este método, se usa para el material que pasa el Tamiz N°10, donde también se puede realizar con una representación menor del peso total. Esto quiere decir que se puede usar un peso de 300 gramos aproximadamente.
- La muestra hay que dejar reposar en agua hasta que esta sature completamente, haciendo que el suelo tenga características de barro o lodo. Generalmente se usa un tiempo cómodo de 24 horas o más, si es que se quiere un tiempo más corto utilizar 5 horas.
- Sin perder material se introduce la muestra en la malla N°200, Luego con ayuda del agua se puede lavar el suelo, hasta que el agua pasante tome aspectos más claros sin sedimentación.
- Luego el material que se retiene en la malla N° 200, disponer dentro de un recipiente para realizar un secado del suelo y proceder a retamizar por las mallas N°40 y N°200.
- Pesarse el material retenido en cada malla dispuesta para el fino.
- De la misma manera se tiene que corregir los porcentajes que pasan de acuerdo a la fórmula mencionada en el párrafo anterior.

1.4.7.1.4. PROCESAMIENTO DE DATOS.

Una vez que se obtienen los pesos retenidos en cada malla disponer los datos en una planilla, de tal forma que se puedan realizar los respectivos cálculos.

- Toda Granulometría debe tener un calculo de la humedad higroscópica, en donde se obtendrá el peso seco que servirá de base para los cálculos.
- Calcular el peso acumulado de los pesos retenidos.
- Calcular el porcentaje acumulado tomando como referencia el peso total de la muestra usada multiplicada por su peso acumulado dividido por 100.
- Luego invertir los porcentajes retenidos y transformarlos en porcentajes pasantes, para esto se debe restar al 100% cada porcentaje retenido acumulado, anotar en su respectiva columna.
- Para el material que pasa el tamiz N°10, se realizan los mismos cálculos.
- Si es que se tomo un peso menor del material que pasa el tamiz N° 10, se debe realizar un ajuste al peso total introduciendo en la planilla una columna del % que pasa del Total, para ello utilizar la fórmula citada anteriormente.
- Al dibujar la Curva Granulométrica, tiene que ser a escala logarítmica donde las abscisas corresponden al tamaño de las partículas y las ordenadas a los porcentajes que pasan.
- Determinar los coeficientes de uniformidad y el coeficiente de curvatura.

1.5. CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS

1.5.1. CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LOS SUELOS

En la naturaleza los suelos se presentan en una la infinita variedad, cualquiera intento de sistematización científica, debe ir precedido por otro de clasificación completa.

Innegablemente la Mecánica de Suelos desarrolló estos sistemas de clasificación desde un principio. Primeramente, dado el escaso conocimiento que sobre los suelos se tenía, fundándose en criterios puramente descriptivos; nacieron así varios sistemas, de los cuales, los basados en características granulométricas, ganaron popularidad rápidamente; y los mismos son los más utilizados en la actualidad.

Es evidente que un sistema de clasificación que pretenda cubrir hoy las necesidades correspondientes, debe estar basado en las propiedades mecánicas de los suelos, por ser éstas lo fundamental para aplicaciones ingenieriles.

Además un sistema útil de clasificación debe de servir para normar el criterio del técnico respecto al suelo de que se trate, previamente a un conocimiento más profundo y extenso de las propiedades del mismo; de hecho una de las más importantes funciones de un sistema sería proporcionar la máxima información normativa, a partir de la cual el técnico sepa en qué dirección profundizar su investigación. Entre los diversos estudios tendientes a encontrar un sistema clasificación que satisfaga los distintos campos de aplicación a Mecánica de Suelos, destacan los efectuados por el doctor A. Casagrande. Los cuales concretaron en el conocido Sistema de Clasificación de Aeropuertos, así originalmente llamado, debido a que estaba orientado para uso en aquel tipo de obras.

Este sistema reconoce que las propiedades mecánicas e hidráulicas de los suelos constituidos por partículas menores que la malla N^o 200, pueden deducirse cualitativamente a partir de sus características de plasticidad. En cuanto a los suelos formados por partículas mayores que la malla mencionada, el criterio básico de

clasificación es aún el granulométrico que, aunque no es lo determinante para el comportamiento de un material, sí puede usarse como base de clasificación en los materiales granulares.

1.5.2. SISTEMA DE CLASIFICACIÓN DE AEROPUERTOS

1.5.2.1 FUNDAMENTOS

A pesar de que este sistema ha sido ligeramente modificado para constituir el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, ampliamente usado en la actualidad en el mundo, conviene mencionar las bases en que A. Casagrande fundamentó su criterio para proponer el Sistema de Clasificación de Aeropuertos, punto de partida para todos los esfuerzos de valor que hasta hoy se han efectuado en este campo.

El sistema divide a los suelos en 2 grandes fracciones: la gruesa, formada por partículas mayores que la malla N° 200 (0.074 mm) y menores que la malla de 3" (7.62 cm) y la fina, formada por las partículas que pasan la malla N° 200.

La fracción gruesa se subdivide en gravas y arenas, teniendo como frontera la malla N° 4 (4.76 mm.). Subdivisiones subsecuentes de esta fracción toman en cuenta el contenido y naturaleza de los finos, así como características de graduación. El conjunto presenta un aspecto muy similar al que posteriormente se discutirá con más detalle al analizar el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

La fracción fina se subdivide en grupos, tomando en cuenta sus características de plasticidad, las cuales están relacionadas con las propiedades mecánicas e hidráulicas, que interesan al ingeniero civil. Las propiedades mecánicas e hidráulicas más importantes de las que el ingeniero precisa tener datos, primero cualitativa y después cuantitativamente son: características de esfuerzo - deformación y resistencia, compresibilidad, permeabilidad, velocidad de variación volumétrica, etc.

Una de las propiedades que más influyen para la formación de estos grupos fue la compresibilidad, la cual está íntimamente ligada con las características de plasticidad, específicamente con el valor del límite líquido. La compresibilidad aumenta con el valor del límite líquido, permaneciendo todos los demás factores constantes.

Debemos tener conocimiento de la relación que existe entre la compresibilidad y la forma de las partículas de un suelo, donde la forma y no el tamaño lo que determina, principalmente, la compresibilidad de los suelos finos. Asimismo, que la plasticidad de un material se debe a la forma laminar de las partículas coloidales que lo constituyen. Esto indica que las características de plasticidad son una medida indirecta del contenido de partículas coloidales laminares en un suelo y, por lo tanto, también de la compresibilidad del mismo. De aquí se comprende la importancia que desde este punto de vista tienen las características de plasticidad de los suelos.

Se indicó que la mayoría de los suelos formados por partículas finas, cuyo origen no sea volcánico tienen, por lo general, valores del límite líquido menores que 100, esto fue utilizado para subdividir estos materiales en 2 grupos principales: los de baja a media compresibilidad con límite líquido menor de 50% y los de alta compresibilidad con límite líquido mayor de 50%.

El hecho fundamental que reveló la investigación de A. Casagrande es que, en la representación de los suelos en una carta de coordenadas LL — IP, los suelos finos no adoptan una distribución caprichosa, obra del azar, sino que se agrupan de un modo específico, de manera que en cada zona de la carta se sitúan suelos con características de plasticidad y propiedades mecánicas e hidráulicas cualitativamente definidas. Los suelos cuyas partículas finas exhiben mayores características de plasticidad son aquellos situados en líneas inclinadas en la parte superior de la gráfica; los suelos con alto contenido de materia orgánica, así como aquellos que contienen finos de baja plasticidad se sitúan en las zonas bajas.

Esto dio origen a que se fijara una línea que sirviera de frontera entre los grupos de suelos mencionados. Esta línea, así empíricamente obtenida, pasa por los puntos de coordenadas (0,20) y (50,22) y es comúnmente conocida como Línea A. Esta línea y la vertical trazada por el punto (0,50), según el criterio anteriormente citado, dividen a la gráfica en 4 zonas que son las que fundamentalmente se consideran hoy día en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Fig. VI-1). Posteriormente se tratarán unas ligeras modificaciones a esta carta, conocida como Carta de Plasticidad

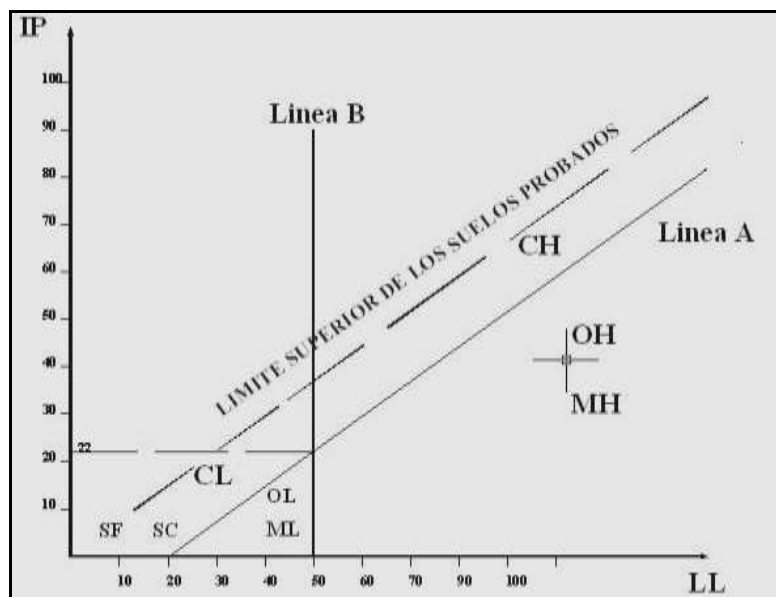
En las zonas que, quedan sobre la Línea A de la Fig. VI-1, se sitúan las arcillas inorgánicas; estas arcillas se simbolizan genéricamente con la letra C (del inglés clay). Bajo la Línea A quedan colocados suelos inorgánicos que se consideran limos, con símbolo genérico M (del sueco mo y mjala, términos usados en ese idioma para suelos de partículas finas poco o nada plásticas) también caen bajo la Línea A los suelos finos con apreciable contenido de materia orgánica; para estos suelos se usa el símbolo O.

En todos estos grupos se distinguen los suelos de alta compresibilidad de los de media o baja; para los primeros se añade al símbolo genérico la letra H (del inglés high compressibility), en los segundos, la L {low compressibility}. Así resultan los 6 grupos que aparecen situados en sus respectivas zonas en la Fig. VI-1.

Originalmente se añadió a los anteriores grupos dos más; el SC y el SF significando el primero arena con excelente cementante arcilloso o de otra categoría, en tal proporción que el material prácticamente carece de contracción y expansión; el segundo se refiere a arenas con finos que no califican como SC. (En la simbología anterior, S proviene del inglés sand, C de clay y cementación, y F de fines). La ubicación de estos dos grupos se muestra en la Fig. VI-1, siendo de notar que ya no se usa ninguno de ellos en el Sistema Unificado derivado del de Aeropuertos.

Figura - 8

Carta de plasticidad, como se usó en el Sistema de Aeropuertos



El principal uso de la Carta de Plasticidad está en situar en ella un suelo desconocido, por medio del cálculo de los dos parámetros que definen su plasticidad; la colocación del suelo en uno de los grupos definidos indicará que participa del conjunto de propiedades mecánicas e. hidráulicas características de ese grupo; así, y más si se cuenta con una, cierta dosis de experiencia, se tiene un modo simple, rápido y económico de adquirir valiosa información básica sobre el suelo en cuestión.

1.5.3. SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS

Como se menciono anteriormente el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos está basado en el Sistema de clasificación de Aeropuertos, hasta el nivel que puede decirse que es el mismo con ligeras modificaciones.

El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera *grueso* si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas.

Se describirán en primer lugar los diferentes grupos referentes a suelos gruesos.

1.5.3.1 SUELOS GRUESOS

El símbolo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de ese grupo. El significado se especifica abajo.

- a) Gravas y suelos en que predominen éstas. Símbolo genérico G (gravel)
- b) Arenas y suelos arenosos. Símbolo genérico S (sand).

Las gravas y las arenas se separan con la malla N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en la malla 200) no pasa la malla N° 4, y es del grupo genérico S, en caso contrario.

Las gravas y las arenas se subdividen en cuatro tipos:

1. Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo W {well graded}. En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.
2. Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo P {poorly graded}. En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP y SP.

3. Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Símbolo M (del sueco mo y mjala}. En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GM y SM.
4. Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo C {clay}. En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GC y SC.

A continuación se describen los grupos anteriores a fin de proporcionar criterios más detallados de identificación, tanto en el , campo como en el laboratorio.

Grupos GW y SW

Según se dijo, estos suelos son bien graduados y con pocos finos o limpios por completo. La presencia de los finos que puedan contener estos grupos no debe producir cambios apreciables en las características de resistencia de la fracción gruesa, ni interferir con su capacidad de drenaje. Los anteriores requisitos se garantizan en la práctica, especificando que en estos grupos el contenido de partículas finas no sea mayor de un 5%, en peso. La graduación se juzga, en el laboratorio, por medio de los coeficientes de uniformidad y curvatura.

Para considerar una grava bien graduada se exige que su coeficiente de uniformidad sea mayor que 4, mientras el de curvatura debe estar comprendido entre 1 y 3. En el caso de las arenas bien graduadas, el coeficiente de uniformidad será mayor que 6, en tanto el de curvatura debe estar entre los mismos límites anteriores.

Grupos GP y SP

Estos suelos son mal graduados; es decir, son de apariencia uniforme o presentan predominio de un tamaño o de un margen de tamaños, faltando algunos intermedios; en laboratorio, deben satisfacer los requisitos señalados para los dos grupos

anteriores, en lo referente a su contenido de partículas finas, pero no cumplen los requisitos de graduación indicados para su consideración como bien graduados. Dentro de esos grupos están comprendidas las gravas uniformes, tales como las que se depositan en los lechos de los ríos, las arenas uniformes, de médanos y playas y las mezclas de gravas y arenas finas, provenientes de estratos diferentes obtenidas durante un proceso de excavación.

Grupos GM y SM

En estos grupos el contenido de finos afecta las características de resistencia y esfuerzo-deformación y la capacidad de drenaje libre de la fracción gruesa; en la práctica se ha visto que esto ocurre para porcentajes de finos superiores a 12%, en peso, por lo que esa cantidad se toma como frontera inferior de dicho contenido de partículas finas. La plasticidad de los finos en estos grupos varía entre "nula" y "media"; es decir, es requisito que los límites de plasticidad localicen a la fracción que pase la malla N° 40 abajo de la Línea A o bien que su índice de plasticidad sea menor que 4.

Grupos GC y SC

Como antes, el contenido de finos de estos grupos de suelos debe ser mayor que 12%, en peso, y por las mismas razones expuestas para los grupos GM y SM. Sin embargo, en estos casos, los finos son de media a alta plasticidad; es ahora requisito que los límites de plasticidad sitúen a la fracción que pase la malla N° 40 sobre la Línea A, teniéndose, además, la condición de que el índice plástico sea mayor que 7.

A los suelos gruesos con contenido de finos comprendido entre 5% y 12%, en peso, el Sistema Unificado los considera casos de frontera, adjudicándoles un símbolo doble. Por ejemplo, un símbolo GP-GC indica una grava mal graduada, con un contenido entre 5% y 12% de finos plásticos (arcillosos).

Cuando un material no cae claramente dentro de un grupo, deberán usarse también símbolos dobles, correspondientes a casos de frontera. Por ejemplo, el símbolo GW-SW se usará para un material bien graduado, con menos de 5% de finos y formada su fracción gruesa por iguales proporciones de grava y arena.

1.5.3.2. SUELOS FINOS

También en este caso el sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para los suelos gruesos, y dando lugar a las siguientes divisiones:

- a) Limos inorgánicos, de símbolo genérico M (del sueco mo y mjala}.
- b) Arcillas inorgánicas, de símbolo genérico C (clay).
- c) Limos y arcillas orgánicas, de símbolo genérico O (organic)

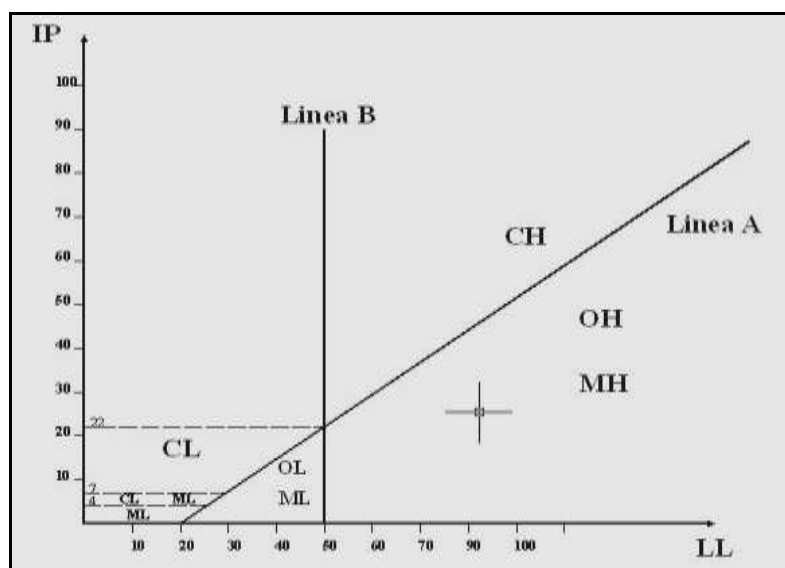
Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdividen, según su límite líquido, en dos grupos. Si éste es menor de 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (low compressibility), obteniéndose por esta combinación los grupos ML, CL y OL. Los suelos finos con límite líquido mayor de 50%, o sea de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico la letra H {high compressibility}, teniéndose así los grupos MH, CH y OH.

Ha de notarse que las letras L y H no se refieren a baja o alta plasticidad, pues esta propiedad del suelo, como se ha dicho, ha de expresarse en función de dos parámetros (LL e Ip), mientras que en el caso actual sólo el valor del límite líquido interviene. Por otra parte, ya se hizo notar que la compresibilidad de un suelo es una función directa del límite líquido, de modo que un suelo es más compresible a mayor límite líquido.

También es preciso tener en cuenta que el término compresibilidad tal como aquí se trata, se refiere a la pendiente del tramo virgen de la curva de compresibilidad y no a la condición actual del suelo inalterado, pues éste puede estar seco parcialmente o preconsolidado.

Los suelos altamente orgánicos, usualmente fibrosos, tales como turbas y suelos pantanosos, extremadamente compresibles, forman un grupo independiente de símbolo Pt (del inglés pea; turba).

Figura - 9
Carta de plasticidad de sistema de calcificación unificado



El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos introdujo una modificación en la Carta de Plasticidad, tal como se mostró en la Fig. VI I-1. La modificación se refiere a los suelos arriba de la Línea A con índice plástico comprendido entre 4 y 7, y cambia la clasificación de los suelos que caen en la zona punteada de la Fig. VII-1. Al margen se muestra la modificación en la Fig. VII-2, que es la Carta de Plasticidad, tal

como hoy suele usarse. Además en el estudio que sigue de los grupos de suelos finos se mencionará también la citada modificación.

Los distintos grupos de suelos finos ya mencionados se describen a continuación en forma más detallada.

Grupos CL y CH

Según ya se dijo, en estos grupos se encasillan las arcillas inorgánicas. El grupo CL comprende a la zona sobre la Línea A, definida por $LL < 50\%$ e $Z_p > 7\%$.

El grupo CH corresponde a la zona arriba de la Línea A, definida por $LL > 50\%$. Las arcillas formadas por descomposición química de cenizas volcánicas, tales como la bentonita, se encasillan en el grupo CH.

Grupos ML y MH

El grupo ML comprende la zona bajo la Línea A, definida por $LL < 50\%$ y la porción sobre la línea A con $IP < 4$. El grupo MH corresponde a la zona abajo de la línea A, definida por $LL > 50\%$.

En estos grupos quedan comprendidos los limos típicos inorgánicos y limos arcillosos. Los tipos comunes de limos inorgánicos y polvo de roca, con $LL < 30\%$, se localizan en el grupo ML. Los depósitos eólicos, del tipo del Loess, con $25\% < LL < 35\%$ usualmente, caen también en este grupo.

Un tipo interesante de suelos finos que caen en esta zona son las arcillas del tipo caolín, derivados de los feldespatos de rocas graníticas; a pesar de que el nombre de arcillas está muy difundido para estos suelos, algunas de sus características corresponden a limos inorgánicos; por ejemplo, su resistencia en estado seco es relativamente baja y en estado húmedo muestran cierta reacción a la prueba de dilatancia; sin embargo, son suelos finos y suaves con un alto porcentaje de partículas tamaño de arcilla, comparable con el de otras arcillas típicas, localizadas arriba de la

línea A. En algunas ocasiones estas arcillas caen en casos de frontera ML-CL y MH-CH, dada su proximidad con dicha línea.

Las tierras diatomáceas prácticamente puras suelen no ser plásticas, por más que su límite líquido pueda ser mayor que 100% {MH}. Sus mezclas con otros suelos de partículas finas son también de los grupos ML o MH.

Los suelos finos que caen sobre la línea A y con $4\% < IP < 7\%$, consideran como casos de frontera, asignándoles el símbolo doble CL – ML.

Grupos OL y OH

Las zonas correspondientes a estos dos grupos son las mismas que la de los grupos ML y MH, respectivamente, sí bien los orgánicos están siempre en lugares próximos a la línea A.

Una pequeña adición de materia orgánica coloidal hace que el límite líquido de una arcilla inorgánica crezca, sin apreciable cambio de su índice plástico; esto hace que el suelo se desplace hacia la derecha en la Carta de Plasticidad, pasando a ocupar una posición más alejada de la línea A.

Grupos Pt

Las pruebas de límites pueden ejecutarse en la mayoría de los suelos turbosos, después de un completo remoldeo. El límite líquido de estos suelos suele estar entre 300% y 500%, quedando su posición en la Carta de Plasticidad netamente abajo de la línea A; el índice plástico normalmente varía entre 100% y 200%.

Similarmente al caso de los suelos gruesos, cuando un material fino no cae claramente en uno de los grupos, se usarán para él símbolos dobles de frontera. Por ejemplo, MH-CH representará un suelo fino con $LL > 50\%$ e índice plástico tal que el material quede situado prácticamente sobre la línea A.

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos no se concreta a ubicar al material dentro de uno de los grupos enumerados, sino que abarca, además, una descripción del mismo, tanto alterado como inalterado. Esta descripción puede jugar un papel importante en la formación de un sano criterio técnico y, en ocasiones, puede resultar de fundamental importancia para poner de manifiesto características que escapan a la mecánica de las pruebas que se realizan. Un ejemplo típico de ello es la compacidad.

En los suelos gruesos, en general, deben proporcionarse los siguientes datos: nombre típico, porcentajes aproximados de grava y arena, tamaño máximo de las partículas, angulosidad y dureza de las mismas, Características de su superficie, nombre local y geológico y cualquier Otra información pertinente, de acuerdo con la aplicación ingenieril que va a hacer del material.

En suelos gruesos en estado inalterado, se añadirán datos sobre estratificación, compacidad, cementación, condiciones de humedad y características de drenaje.

En los suelos finos, se proporcionarán, en general, los siguientes datos: nombre típico, grado y carácter de su plasticidad, cantidad y .no máximo de las partículas gruesas, color del suelo húmedo, olor, nombre local y geológico y cualquier otra información descriptiva pertinente, de acuerdo con la aplicación que se vaya a hacer del material.

Respecto del suelo en estado inalterado, deberá agregarse información relativa a su estructura, estratificación, consistencia en los estados inalterado y remoldeado, condiciones de humedad y características de drenaje.

1.5.3.3 IDENTIFICACIÓN DE SUELOS EN EL CAMPO

El problema de la identificación de suelos es de importancia fundamental en la ingeniería; identificar un suelo es, en rigor, encasillarlo dentro de un sistema previo de clasificación. En el caso concreto de este trabajo, es colocarlo en alguno de los grupos mencionados dentro del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos; obviamente en el grupo que le corresponde según sus características. La identificación permite conocer, en forma cualitativa, las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, atribuyéndole las del grupo en que se sitúe; naturalmente, según ya se dijo, la experiencia juega un papel importante en la utilidad que se pueda sacar de la clasificación.

En el Sistema Unificado hay criterios para clasificación de suelos en el laboratorio; estos criterios de tipo granulométrico y de investigación de características de plasticidad, ya han sido descritos. Además, y ésta es una de las ventajas del Sistema, se ofrecen criterios para identificación en el campo, es decir, en aquellos casos en que no se disponga de equipo de laboratorio para efectuar las pruebas necesarias para una identificación estricta. Estos criterios, simples se detallan a continuación.

1.5.3.3.1 IDENTIFICACIÓN DE CAMPO DE SUELOS GRUESOS

Los materiales constituidos por partículas gruesas se identifican en el campo sobre una base prácticamente visual. Extendiendo una muestra seca del suelo sobre una superficie plana puede juzgarse, en forma aproximada, de su graduación, tamaño de partículas, forma y composición mineralógica. Para distinguir las gravas de las arenas puede usarse el tamaño $\frac{1}{2}$ cm. como equivalente a la malla N° 4, y para la estimación del contenido de finos basta considerar que las partículas de tamaño correspondiente a la malla N° 200 son aproximadamente las más pequeñas que pueden distinguirse a simple vista.

En lo referente a la graduación del material, se requiere bastante experiencia para diferenciar, en examen visual, los suelos bien graduados de los mal graduados. Esta

experiencia se obtiene comparando graduaciones estimadas, con las obtenidas en laboratorio, en todos los casos; en que se tenga oportunidad. Para examinar la fracción fina contenida en el suelo, deberán ejecutarse las pruebas de identificación de campo de suelos finos que se detallarán adelante, sobre la parte que pase la malla N° 40; si no se dispone de esta malla, el cribado puede sustituirse por una separación manual equivalente.

En ocasiones puede ser importante juzgar de la integridad de las partículas constituyentes de los suelos, en cuyo caso será preciso un examen especialmente cuidadoso. Las partículas procedentes de rocas ígneas sanas se identifican fácilmente; las partículas intemperizadas se reconocen por las decoloraciones y la relativa facilidad con que se desintegran.

1.5.3.2.2 IDENTIFICACIÓN DE CAMPO DE SUELOS FINOS

Una de las grandes ventajas del Sistema Unificado es, como se dijo, el criterio para identificar en el campo los suelos finos, contando con algo de experiencia. El mejor modo de adquirir esa experiencia sigue siendo el aprendizaje al lado de quien ya la posea; en falta de tal apoyo, es aconsejable el comparar sistemáticamente los resultados de la identificación de campo realizada, con los del laboratorio, en cada caso en que exista la oportunidad.

Las principales bases de criterio para identificar suelos finos en el campo son la investigación de las características de dilatancia, de tenacidad y de resistencia en estado seco. El color y el olor del suelo pueden ayudar, especialmente en suelos orgánicos.

El conjunto de pruebas citadas se efectúa en una muestra de suelo previamente cribado por la malla N° 40 o, en ausencia de ella, previamente sometido a un proceso manual equivalente.

Dilatancia

En esta prueba, se forma una pastilla con el contenido de agua necesario para que el suelo adquiriera una consistencia suave, pero no pegajosa, se agita alternativamente en la palma de la mano, golpeándola secamente contra la otra mano, manteniéndola apretada entre los dedos. Un suelo fino, no plástico, adquiere con el anterior tratamiento, una apariencia de hígado, mostrando agua libre en su superficie, mientras se le agita, en tanto que al ser apretado entre los dedos, el agua superficial desaparece y la muestra se endurece, hasta que, finalmente, empieza a desmoronarse como un material frágil, al aumentar la presión. Si el contenido de agua de la pastilla es el adecuado, un nuevo agitado hará que los fragmentos producto del desmoronamiento vuelvan a constituirse.

La velocidad con la que la pastilla cambia su consistencia y con la que el agua aparece y desaparece define la intensidad de la reacción e indica el carácter de los finos del suelo.

Una reacción rápida es típica en arenas finas uniformes, no plásticas {SP y SM) y en algunos limos inorgánicos (ML), particularmente del tipo polvo de roca; también en tierras diatomáceas [MH). Al disminuir la uniformidad del suelo, la reacción se hace menos rápida. Contenidos ligeros de arcilla coloidal imparten algo de plasticidad al suelo, por lo que la reacción en estos materiales se vuelve más lenta; esto sucede en los limos inorgánicos y orgánicos ligeramente plásticos {ML, OL), en arcillas muy limosas {CL-ML) y en muchas arcillas del tipo caolín {ML, ML-CL, MH y MH-CH). Una reacción extremadamente lenta o nula es típica de arcillas situadas sobre la línea A {CL, CH) y de arcillas orgánicas de alta plasticidad {OH}.

El fenómeno de aparición de agua en la superficie de la muestra es debido a la compactación de los suelos limosos y, aún en mayor grado, de los arenosos, bajo la

acción dinámica de los impactos contra la mano, esto reduce la relación de vacíos del material, expulsando al agua de ellos. El amasado posterior aumenta de nuevo la relación de vacíos y el agua se restituye a esos vacíos. Los suelos arcillosos no sufren esos efectos bajo cargas dinámicas, por lo cual no producen reacción.

Tenacidad

La prueba se realiza sobre un espécimen de consistencia suave, similar a la masilla. Este espécimen se rola hasta formar un rollito de unos 3 mm. de diámetro aproximado, que se amasa y vuelve a rolar varias veces. Se observa cómo aumenta la rigidez del rollito a medida que el suelo se acerca al límite plástico. Sobrepasado el límite plástico, los fragmentos en que se parta el rollito se juntan de nuevo y amasan ligeramente entre los dedos, hasta el desmoronamiento final.

Cuanto más alta sea la posición del suelo respecto a la línea A {CL, CH}, es más rígido y tenaz el rollito cerca del límite plástico y más rígida también se nota la muestra al romperse entre los dedos, abajo del límite plástico. En suelos ligeramente sobre la línea A, tales como arcillas glaciales {CL, CH) los rollitos son de media tenacidad cerca de su límite plástico y la muestra comienza pronto a desmoronarse en el amasado, al bajar su contenido de agua. Los suelos que caen bajo la línea A {ML, MH, OL y OH) producen rollitos poco tenaces cerca del límite plástico, casi sin excepción; en el caso de suelos orgánicos y micáceos, que caigan muy abajo de la línea A, los rollitos se muestran muy débiles y esponjosos. También en todos los suelos bajo la línea A, excepto los OH próximos a ella, la masa producto de la manipulación entre los dedos posterior al rolado, se muestra suelta y se desmorona fácilmente, cuando el contenido de agua es menor que el correspondiente al límite plástico.

Cuando se trabaje en lugares en que la humedad ambiente sea casi constante, el tiempo que transcurra hasta que se alcance el límite plástico, es una medida

relativamente tosca del índice plástico del suelo. Por ejemplo, una arcilla CH con $LL = 70\%$ e $IP = 50\%$ o una OH con $LL = 100\%$ e $IP = 50\%$, precisan mucho más tiempo de manipulación para llegar al límite plástico que una arcilla glacial del tipo CL. En limos poco plásticos, del grupo ML, el límite plástico se alcanza muy rápidamente. Claro es que para que las observaciones anteriores tengan sentido, será preciso comenzar todas las pruebas con los suelos en la misma consistencia muy aproximadamente, de preferencia cerca del límite líquido.

Resistencia en estado seco

La resistencia de una muestra de suelo, previamente secado, al romperse bajo presiones ejercidas por los dedos, es un índice del carácter de su fracción coloidal.

Los limos ML o MH exentos de plasticidad no presentan prácticamente ninguna resistencia en estado seco y sus muestras se desmoronan con muy poca presión digital; el polvo de roca y la tierra diatomácea son ejemplos típicos. Una resistencia en estado seco baja es representativa de todos los suelos de baja plasticidad, localizados bajo la línea A y aun de algunas arcillas inorgánicas muy limosas, ligeramente sobre la línea A {CL}. Resistencias medias definen generalmente arcillas del grupo CL o, en ocasiones, otras de los grupos CH, MH (arcillas tipo caolín) u OH, que se localicen muy cerca de la línea A. La mayoría de las arcillas CH tienen resistencias altas, así como las CL localizadas muy arriba de la línea A. Materiales OH con altos límites líquidos y próximos a la línea A también exhiben grandes resistencias. Por último, resistencias muy altas son típicas de arcillas inorgánicas del grupo CH, localizadas en posiciones muy elevadas respecto a la línea A.

Color

En exploraciones de campo el color del suelo suele ser un dato útil para diferenciar los diferentes estratos y para identificar tipos de suelo, cuando se posea experiencia

local. En general, existen también algunos criterios relativos al color; por ejemplo, el color negro y otros de tonos oscuros suelen ser indicativos de la presencia de materia orgánica coloidal. Los colores claros y brillantes son propios, más bien, de suelos inorgánicos.

Olor

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

1.5.3.4 LA CARTA DE PLASTICIDAD Y LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

Ya se ha mencionado que las propiedades físicas de un suelo fino quedan cualitativamente definidas en forma aproximada a partir de la aleación de ese suelo en la Carta de Plasticidad; sin embargo, dada la importancia del tema, resulta conveniente puntualizar algo más algunas relaciones que la experiencia ha confirmado de un modo bastante digno de confianza.

La práctica de laboratorio ha indicado que la compresibilidad de los suelos, a igual carga de preconsolidación, es aproximadamente proporcional al límite líquido, de manera que dos suelos con el mismo límite líquido son similarmente compresibles. Al comparar las propiedades físicas de suelos que tengan el mismo límite líquido, se encuentra que, creciendo el índice plástico, aumentan las características de tenacidad y resistencia en estado seco, en tanto que disminuye la permeabilidad. El comportamiento de los suelos, al variar sus características de plasticidad puede resumirse en la tabla siguiente:

Tabla - 10

Comportamiento de los suelos en función a la Variación de plasticidad

Característica	Límite líquido constante, pero índice plástico creciente	Índice plástico constante, pero límite líquido creciente
Compresibilidad	Prácticamente la misma	Crece
Permeabilidad	Decrece	Crece
Razón de variación volumétrica	Decrece	-----
Tenacidad	Crece	Decrece
Resistencia en estado seco	Crece	Decrece

Figura - 10

Dirección de variación de algunas propiedades físicas en los suelos en la carta de plasticidad

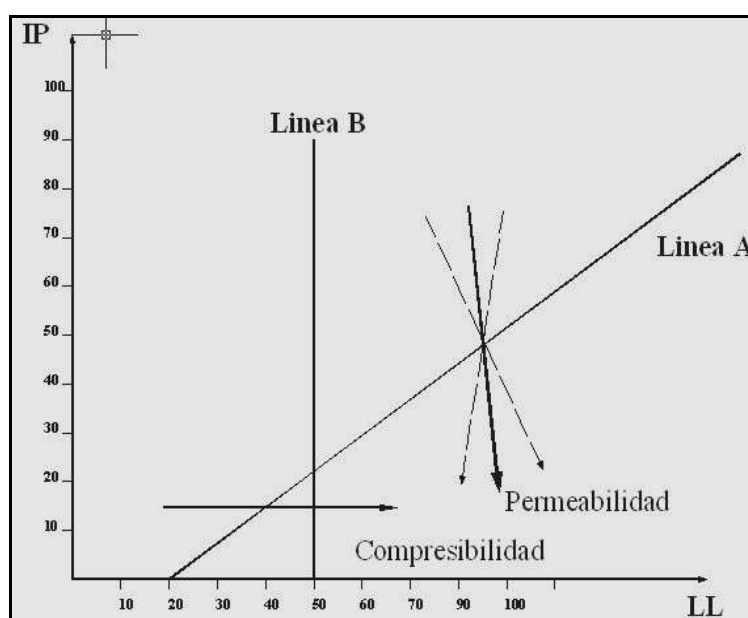


Figura - 10(a)

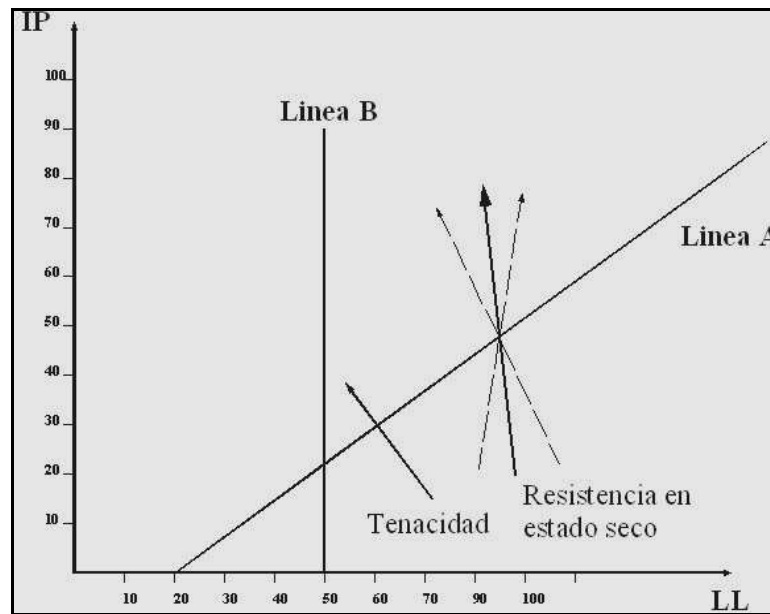


Figura -10(b)

Así, al comparar las características de plasticidad de dos suelos, puede tenerse una estimación relativa de algunas de sus propiedades físicas.

En la tabla anterior se menciona la razón de variación volumétrica, que es la rapidez con la que los suelos cambian su volumen cuando varían las condiciones de esfuerzo a que están sometidos.

Una representación gráfica de los datos contenidos en la tabla VI-1 así como de los enumerados en párrafos precedentes, se muestra en las Figs. VI-3.a y VI-3.b. En ellas se ve en forma clara la dirección de variación de algunas propiedades de interés, tomando en cuenta tanto los cambios de límite líquido, como de índice plástico de los suelos.

1.5.4 CLASIFICACIÓN DE SUELOS MEDIANTE EL SISTEMA DE CLASIFICACIÓN AASHTO

1.5.4.1. ALCANCE

Esta norma describe y regula el procedimiento para la clasificación de suelos y agregados para la construcción de diferentes obras civiles, pero generalmente esta fue creada para el uso en carreteras. La clasificación AASHTO establece 7 grupos de suelos y agregados con base en la determinación en el laboratorio de la granulometría, el límite líquido y el límite plástico. Un octavo grupo corresponde a los suelos orgánicos. Esta clasificación puede ser utilizada cuando se requiere una clasificación geotécnica precisa; especialmente para la construcción de carreteras. La evaluación de Los suelos dentro de cada grupo se hace por medio de un índice de grupo; que es un valor calculado a partir de una fórmula empírica.

La clasificación de grupo incluyendo el índice de grupo es útil en la determinación de la calidad relativa del suelo para su utilización en estructuras de tierra: particularmente en terraplenes, subrasantes, subbases y bases.

El diseño detallado de estructuras importantes normalmente requiere datos adicionales relacionados con la resistencia o las características de funcionamiento en las condiciones de campo: que no pueden ser inferidas de la sola clasificación del suelo.

1.5.4.2. TERMINOLOGÍA

1.5.4.2.1 DESCRIPCIONES DE TÉRMINOS PROPIOS DE ESTA NORMA

Los siguientes términos son utilizados frecuentemente en esta norma. Estos difieren ligeramente de los que se dan en la terminología de la norma ASTM D653, pero se utilizan aquí para mantener la consistencia con el uso corriente en la construcción de carreteras.

Arena fina: partículas de roca y suelo que pasan el tamiz #40 (0.425 mm.) y son retenidos en un tamiz de #200 (0.075 mm.)

Arena gruesa: partículas de roca o de suelo que pasan por el tamiz de 2 mm. (#10) y son retenidos en un tamiz de 0.425 mm. (#40).

Cantos: fragmentos de roca, usualmente redondeados por abrasión, que son retenidos en un tamiz de 7.5 cm.

Grava: partículas de roca que pasan por un tamiz de 7.5 cm. y son retenidos en un tamiz de 2 mm. (#10).

Material limo arcillosos (limos y arcillas combinados): partículas finas de suelo y roca que pasan el tamiz de 0.075 mm. (#200).

Limoso: material finogranular que tiene un índice de plasticidad igual o menor que 10.

Arcilloso: material finogranular que tiene un índice de plasticidad igual o mayor que 11.

1.5.4.3. SIGNIFICADO Y USO

Esta norma clasifica los suelos de cualquier localidad geográfica en grupos (incluyendo los índices de grupo) basados en los resultados de los ensayos de laboratorio prescritos para determinar las características granulométricas, el índice plástico IP y el límite líquido LL.

La asignación de un símbolo y de un índice de grupo pueden ser utilizados para ayudar en la evaluación de propiedades importantes del suelo en el diseño y clasificación de obras civiles

Las diferentes categorías de este sistema de clasificación se correlacionan en una forma general con el comportamiento ingenieril de los suelos. El comportamiento geotécnico de un suelo varía, en una forma general, inversamente con su índice de grupo. En consecuencia, esta norma proporciona un criterio útil que puede ser utilizado en cualquier investigación geotécnica de campo o de laboratorio.

1.5.4.4 EQUIPO PARA PREPARACION DE MUESTRAS

Equipo para la preparación de las muestras: de acuerdo con las normas ASTM D422 y DI 140.

Equipo para el análisis granulométrico: de acuerdo con las normas ASTM D422 y D114(L

Equipo para la determinación del LL y el LP: de acuerdo con la norma ASTM D4318,

1.5.4.5 MUESTREO

Lleve a cabo las investigaciones de campo, el muestreo, de acuerdo con los procedimientos prescritos en las siguientes normas: ASTM D420. ASTM D1452, ASTM D1586ASTMD1587.

1.5.4.6 ESPÉCIMEN PARA EL ENSAYO

Las muestras para el ensayo deben representar la porción de la muestra de campo que pasa por el tamiz de 7.5 cm. y debe prepararse de la siguiente manera:

1. Seque la muestra de campo al aire.
2. Pese la muestra de campo.
3. Separe la muestra de campo en dos fracciones sobre un tamiz de 7.5 cm.
4. Pese la fracción retenida sobre el tamiz de 7.5 cm. Calcule el porcentaje de material mayor de 7.5 cm en la muestra de campo y anote este porcentaje como una información auxiliar. Si a partir de un examen visual no se identifican cantos en la muestra, omita los dos pasos descritos en los numerales 3 y 4.
5. Mezcle completamente la fracción que pasa el tamiz de 7,5 cm y tome las muestras para el ensayo.

Prepare la muestra para el ensayo de acuerdo con las normas D421 o D2217.

Determine el porcentaje de material que pasa el tamiz de 2 mm (#10). Se recomienda el uso del método de preparación de muestras húmedas para los suelos que contengan materia orgánica o coloides minerales que experimenten cambios irreversibles al secarse.

Determine el porcentaje de la muestra que pasa el tamiz de 0.075mm. (#200); 0.425 mm. (#40) de acuerdo con las normas ASTM D422 y ASTM D 1140.

Determine el límite líquido LL y el índice plástico IP de una porción de la muestra que pase por el tamiz de 0.425 mm. (#40) de acuerdo con el método de ensayo D4318.

1.5.4.7. PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN

Clasifique el suelo en un grupo o subgrupo apropiado, o en ambos, de acuerdo con las tablas VI-2 y VI-3, y a partir de los datos de los resultados de los ensayos determinados. Utilice la Figura VI- 4. para clasificar los materiales finogranulares a partir de los valores de LL y de IP. Todos los valores de límites de consistencia se

presentan como números enteros. Si aparecen números fraccionarios en los informes de ensayo, aproxímelos al número entero más próximo para utilizarlo en la clasificación.

A partir de los resultados de los ensayos requeridos, proceda de izquierda a derecha en las tablas VI-2 y VI-3, y encontrará la clasificación correcta por un proceso de eliminación. El primer grupo de la izquierda en el que se ajusten los resultados de los ensayos es la clasificación correcta.

La clasificación de los materiales en los diferentes grupos, se aplica solo a la fracción que pasa el tamiz de 7.5 cm. En consecuencia, cualquier especificación en relación con el uso de materiales de los grupos A1, A2 o A3 para construcción debe definir si admite cantos (retenidos sobre el tamiz de 7.5 cm).

1.5.4.8. DESCRIPCIÓN DE LOS GRUPOS DE CLASIFICACIÓN

Materiales granulares. Contienen 35% o menos de material que pase el tamiz de 0.075 mm. (#200).

Grupo A-I: El material típico de este grupo es una mezcla bien gradada de fragmentos de piedra o grava, arena gruesa, arena fina, y un ligante de suelo no plástico o de baja plasticidad. Sin embargo, este grupo incluye también fragmentos de roca, grava, arena gruesa, cenizas volcánicas, etc. sin un ligante de suelo.

Subgrupo A-I-a: Incluye aquellos materiales que consisten predominantemente de fragmentos de roca o grava con o sin un ligante bien gradado de material fino.

Subgrupo A-I-b: Incluye aquellos materiales que consisten predominantemente de arena gruesa con o sin un ligante de suelo bien gradado.

Grupo A-3: El material típico de este grupo es la arena fina de playa o la arena fina de desierto, sin finos de arcilla, limo o con una pequeña cantidad de limo no plástico. Este grupo también incluye las mezclas aluviales de arena fina mal gradada con pequeñas cantidades de arena gruesa y grava.

Grupo A-2: Este grupo incluye una amplia variedad de materiales granulares, que se encuentran en el límite entre los materiales que se clasifican en los grupos A-1 y A-3, y los materiales tipo limo y arcilla que se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Incluye todos los materiales que contienen 35% o menos de material que pasa el tamiz de 0.075mm. (#200) que no pueden ser clasificados en los grupos A-1 o A-3, debido al contenido de finos o a los índices de plasticidad, o ambos, por encima de las limitaciones de estos grupos.

Los subgrupos A-2-4 y A-2-5 incluyen varios materiales granulares que contienen 35% o menos de material que pasa el tamiz de 75 mm. (#200) y con una porción que pasa el tamiz de 0.425 mm. (#40) que tiene las características de los grupos A-4 y A-5 respectivamente.

Estos grupos comprenden materiales tales como grava y arena gruesa con contenidos de limo e índice plásticos IP por encima de las limitaciones del grupo A-1, y arena fina con un contenido de limo no plástico por encima de las limitaciones del grupo A-3.

Los subgrupos A-2-6 y A-2-7 incluyen materiales similares a los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5 excepto en que la porción fina contiene arcilla plástica que tiene las características de los grupos A-6 y A-7 respectivamente.

Material limo arcilloso: contiene más de 35% de material que pasa la malla de 0.075 mm. (#200).

Grupo A4: El material típico de este grupo es un suelo limoso no plástico o moderadamente plástico, que normalmente tiene el 75% o más de material que pasa el tamiz de 0.075 mm. (#200). Este grupo también incluye mezclas de suelo limoso fino y hasta 64% de arena y grava retenida sobre el tamiz de 0.075 mm. (#200).

Grupo A-5: El material típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-4, salvo que usualmente tiene un carácter diatomáceo o micáceo y puede ser muy elástico, como lo indica su alto límite líquido LL.

Grupo A-6: El material típico de este grupo es una arcilla plástica que usualmente tiene el 75% o más del material que pasa el tamiz de 0.075 mm. (#200). Este grupo también incluye mezclas de suelo arcilloso y hasta el 64% de arena y grava retenida, sobre el tamiz #200. Los materiales de este grupo normalmente presentan grandes cambios de volúmenes entre los estados seco y húmedo,

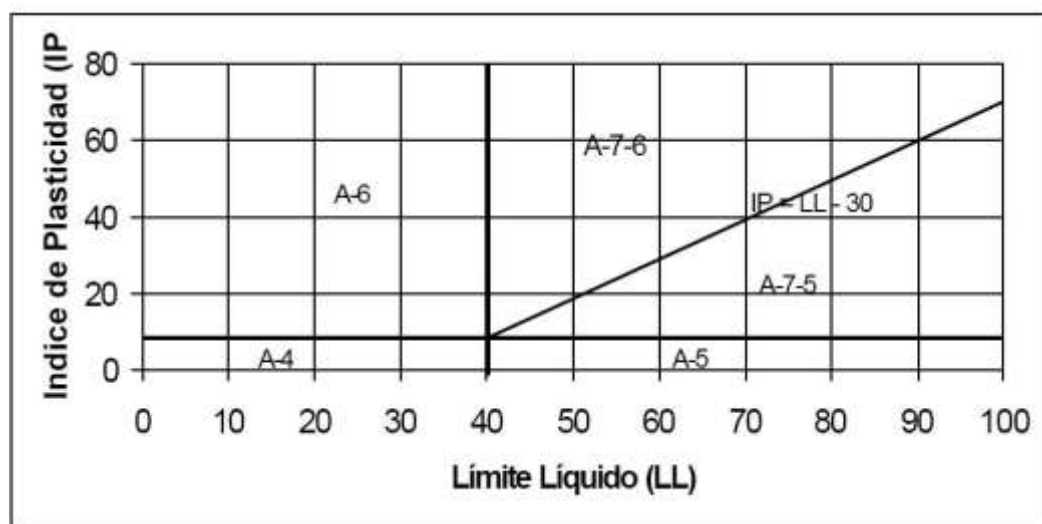
Grupo A-7: El material típico de este grupo es similar al descrito en el grupo A-6, salvo que tiene el LL elevado, característico del grupo A-5, y puede presentar elasticidad o alto potencial de expansión.

Subgrupo A-7-5: Incluye materiales con 1P moderados en relación con el LL y que pueden presentar un alto potencial de expansión.

Subgrupo A-7-6: Incluye materiales con un alto 1P en relación con el LL y que pueden presentar un alto potencial de expansión.

Figura - 11

Carta de plasticidad de sistema de clasificación AASTHO



Los suelos orgánicos, incluida la turba, pueden clasificarse en el grupo A8, La clasificación de estos materiales se basa en la inspección visual y no depende del porcentaje que pasa por el tamiz de 0.075 mm. (#200), el LL y el IP.

El material se compone principalmente de materia orgánica parcialmente descompuesta; generalmente tiene una textura fibrosa, un color negro o pardo oscuro y olor a podrido. Estos materiales orgánicos son inadecuados para su utilización en terraplenes y subrasantes. Tales materiales son altamente compresibles y tienen una baja resistencia al corte.

1.5.4.9. CÁLCULO DEL ÍNDICE DE GRUPO

La clasificación obtenida en las tablas VI-4 ó VI-5, puede ser modificada por la adición de un valor de índice de grupo. Los valores de índice de grupo deben mostrarse siempre en paréntesis después del símbolo de grupo como A-2-6 (3), A-4 (5), A-6 (12), A-7-5 (17), etc.

El cálculo del índice de grupo, IG, se realiza a partir de la siguiente fórmula empírica.

$$IG = (F - 35) * (0.2 + 0.005 * (LL - 40)) + 0.01 * (F - 15) * (IP - 10)$$

Donde:

F: porcentaje que pasa el tamiz de 0.075 mm. (#200), expresado como un número entero este porcentaje se basa sólo en el material que pasa el tamiz de 7.5 cm.

LL: Límite líquido

IP: índice de plasticidad

Consideraciones:

- Si el índice de grupo calculado es negativo registre el índice de grupo como cero.
- Si el suelo no es plástico y no se puede determinar el LL, registre el índice de grupo como cero.
- Registre el índice de grupo con el número entero más próximo
- El valor del índice de grupo puede estimarse utilizando un grafico, determinando en este los índices de grupo parciales debidos al LL y al IP, y luego obteniendo el total de los dos índices de grupo parciales.
- El índice de grupo en los suelos de los subgrupos A-2-6 y A-2-7, deben calcularse utilizando sólo la porción del IP de la fórmula o el grafico mencionado

1.5.4.10. DISCUSIÓN DEL ÍNDICE DE GRUPO

Los valores del índice de grupo, deben ser utilizados solo para comparar suelos dentro del mismo grupo y no entre grupos diferentes.

La fórmula empírica del índice de grupo diseñada para conseguir una evaluación aproximada intragrupo de los materiales granulares arcillosos, y los materiales limo arcillosos, se basa en las siguientes suposiciones.

- Los materiales que se encuentran en los grupos A-l-a, A-l-b, A-2-4, A-2-5 y A-

3 son adecuadas como subrasantes cuando están adecuadamente drenados y compactados bajo un espesor moderado de pavimento (base y carpeta de rodadura) de un tipo adecuado para el tráfico que soportará, o que puede adecuarse por adiciones de pequeñas cantidades de ligantes naturales o artificiales.

- Los materiales granulares arcillosos de los grupos A-2-6 y A-2-7 y los materiales limosos y arcillosos de los grupos A-4, A-5, A-6, y A-7, pueden calificarse para su utilización en subrasantes desde adecuadas como materiales de subbase equivalentes a las categorías A-2-4 y A-2-5, hasta regulares e inadecuadas hasta el punto de requerir una capa de subbase o una capa mayor de base, para proporcionar un adecuado soporte a las cargas de tráfico.
- Se supone que un 35% o más de material que pasa el tamiz de 0.075 mm. (#200) es crítico si se omite la plasticidad, pero el mínimo crítico es sólo el 15% cuando se ve afectado por IP mayor que 10.
- Se supone que un 35% o más de material que pasa el tamiz de 0.075 mm. (#200) es crítico si se omite la plasticidad, pero el mínimo crítico es sólo el 15% cuando se ve afectado por IP mayor que 10.
- Se supone que el LL igual o mayor que 40 es crítico
- Se supone que el IP igual o mayor que 10 es crítico.

No hay un límite superior de valor de índice de grupo obtenido por esta fórmula: Los valores críticos adoptados del porcentaje que pasa el tamiz de 0.075 mm. (# 200), el LL, y el IP, están basados en una evaluación de los materiales de subrasante, subbase y base por varias entidades que utilizan los ensayos involucrados en este sistema de clasificación.

Bajo condiciones promedias de drenaje y una compactación completa y adecuada, puede suponerse que la calificación de un material como subrasante, tiene una relación inversa con su índice de grupo: esto es, un índice de grupo de cero “0” indica un buen material de subrasante "bueno", y un índice de grupo igual a 20 o mayor, indica un material de subrasante "muy malo".

Tabla - 11
Tabla para clasificación de suelos

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz de 75 μm (#200))			Materiales limoarcillosos (Más de 35% pasa el tamiz de 75 μm (#200))			
Clasificación de grupo	A1	A3 ^A	A2	A4	A5	A6	A7
Análisis de tamizado, % que pasa							
2.00 mm (# 10)	...	...	...	...	...	...	...
425 μm (# 40)	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...
75 μm (# 200)	25 máx.	10 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción que pasa el tamiz de 425 μm							
Límite líquido	...	...	B	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.	N.P.	B	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Calificación general como subrasante	Excelente a bueno			regular a malo			
Tipos característicos de materiales del grupo	Cantos, grava y arena	Arena fina	Grava y arena limoarcillosas	Suelos limosos	Suelos		

^A La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica la superioridad de A3 sobre A2

^B ver tabla siguiente para definir valores apropiados

Tabla - 12
Tabla para clasificación de suelos

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...		...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^A La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica la superioridad de A3 sobre A2

^B el índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. el índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30

1.6. COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS

1.6.1 INTRODUCCIÓN

Es frecuente que el ingeniero encuentre no adecuados en algún sentido los suelos que ha de utilizar para un determinado fin en un lugar específico. Este hecho abre obviamente tres posibilidades de decisión:

- Aceptar el material tal como lo encuentre, pero tomando en cuenta prudentemente su calidad en el diseño efectuado.
- Eliminar el material insatisfactorio o prescindir de usarlo, substituyéndolo por otro de características adecuadas.
- Modificar las propiedades del material existente, para hacerlo capaz de cumplir mejores requerimientos.

La última alternativa da lugar a las técnicas de estabilización de suelos. En rigor son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría de las propiedades de los suelos. Con vistas a hacerlos apropiados para algún uso específico, lo que constituye la estabilización. La siguiente lista de tipos de procedimiento no agota seguramente el tema, aunque reúna los más comunes:

- Estabilización por medios mecánicos, de los que la compactación es el más conocido, pero entre los que las mezclas de suelos se utilizan también muy frecuentemente.
- Estabilización por drenaje utilizada frecuentemente en taludes; no utiliza ningún tipo de energía
- Estabilización por medios eléctricos, de los que la electrósmosis y la utilización de pilotes electrometalicos son probablemente los mejor conocidos.
- Estabilización por empleo de calos y calcinación
- Estabilización por medios químicos, generalmente lograda por la adición de agentes estabilizantes específicos, como el cemento, la cal el asfalto u otros

La gran variabilidad de los suelos y sus composiciones hacen que cada método resulte solo aplicable a un numero limitado de tipos de ellos; en muchas ocasiones, esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos metros, en tanto que en otras a lo largo de algunos kilómetros, pero en cualquier caso suele ser frecuente que para aplicar un método económicamente hayan de involucrarse varios tipos de suelos, a veces con variaciones de alguna significación, habiendo de renunciar correspondientemente al empleo del procedimiento “óptimo” en cada clase.

Desde un principio tiene que reconocerse que la estabilización no es una herramienta ventajosa en todos los casos y desde luego, no es siempre igualmente ventajosa en las situaciones en que pueda resultar conveniente; por consiguiente, habrá que guardar siempre muy claramente en mente el conjunto de propiedades que se desee mejorar y la relación entre lo que se logrará al mejorarlas y el esfuerzo y dinero que en ello haya de invertirse. Sólo balanceando cuidadosamente estos factores podrá llegarse a un correcto empleo de la estabilización de suelos.

Las propiedades de los suelos que más frecuentemente se estudian en problemas de estabilización son:

- Estabilidad volumétrica
- Resistencia
- Permeabilidad
- Compresibilidad
- Durabilidad

Frecuentemente será posible utilizar tratamientos que mejoren simultáneamente esas propiedades, pero también debe estarse preparado a encontrar evoluciones contradictorias en la lista, de manera que el mejoramiento de una propiedad signifique el deterioro de otra u otras. No debe verse a la estabilización sólo como una medida correctiva; algunos de los mejores usos de estas técnicas representan más

bien medidas preventivas contra condiciones adversas susceptibles de ulterior desarrollo. A continuación se insiste un poco sobre las propiedades de los suelos más susceptibles de mejorarlas por estabilización.

1.- Estabilidad volumétrica

La expresión se refiere por lo general a los problemas relacionados con los suelos expansivos por cambio de humedad. La experiencia muy orientada por factores económicos ha demostrado que los tratamientos químicos son útiles sobre todo para arcillas ubicadas cerca de la superficie.

2.- Resistencia

Existen varios métodos de estabilización que se han revelado útiles para mejorar la resistencia de muchos suelos. La compactación es de hecho una forma de estabilización mecánica a la que se recurre para incrementar la resistencia de los suelos

3.- Permeabilidad

No suele ser muy difícil modificar sustancialmente la permeabilidad de formaciones de suelo por métodos tales como la compactación la inyección, etc. En la actualidad se va disponiendo de algunas sustancias que introducidas en el suelo en forma de emulsión pueden reducir mucho su permeabilidad, pero no es raro que ejerzan efectos desfavorables en la resistencia al esfuerzo cortante

4.- Compresibilidad

La compactación es una forma rutinaria de estabilización que modifica fuertemente la compresibilidad de los suelos. Sin embargo, la compactación no es la única forma de

estabilización que influye en la compresibilidad, y de echo puede decirse que todos los métodos de estabilización mencionados en paginas anteriores (1,2,3) tienen influencia en dicho concepto.

5.- Durabilidad

Suele involucrarse en este concepto aquellos factores que se refieren a la resistencia de intemperismo. Este problema puede afectarse tanto a suelos naturales como estabilizados. Un mal comportamiento suele ser consecuencia de una mala elección del agente estabilizador, en la practica se echan de menos criterios de campo o de laboratorio que permitan establecer con seguridad cual va a ser la durabilidad de un suelo estabilizado, por lo cual este concepto de durabilidad es uno de los mas difíciles de analizar.

Realizada una introducción y conocimiento de los diferentes métodos y factores que se involucran en la estabilización de suelos, nos abocaremos principalmente en trabajo de tesis a analizar la técnica de estabilización por medio mecánico, específicamente la de compactación de suelos.

Antes de realizar el desarrollo de la compactación de los suelos es necesario aclarar, que a la densidad seca, también se lo llama como peso especifico seco o peso especifico lo cual es indistinto.

1.6.2. COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. Se distingue de la consolidación de los suelos por que en consolidación la densidad del material crece gradualmente bajo la acción natural de sobrecargas impuestas que provocan expulsión de agua por un proceso de difusión; ambos procesos involucran disminución de volumen, por lo que en el fondo son equivalentes.

La importancia de la compactación de los suelos consiste en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtienen al sujetar el suelo a técnicas convenientes que aumenten su densidad seca, disminuyendo sus vacíos. Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos, bordos de defensa, muelles, pavimentos, fundaciones, cimentaciones etc.

Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen del tipo de los materiales con los que se trabaje en cada caso; para suelos puramente friccionantes, como la arena, se compactan eficientemente por métodos vibratorios, en tanto que en los suelos plásticos el procedimiento de carga estática resulta el más ventajoso. En la práctica, estas características se reflejan en los equipos disponibles para trabajo, tales como plataformas vibratorias, rodillos lisos, neumáticos "pata de cabra". En las últimas épocas los equipos de campo han tenido gran desarrollo y hoy existen en gran variedad de sistemas o pesos, de manera que el ingeniero tiene posibilidad de elegir entre muchos, los implementos adecuados a cada caso particular.

La eficiencia de cualquier equipo de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno, se requiere disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan en el laboratorio la compactación que se pueda lograr en el campo con el equipo disponible. De entre todos los factores que influyen en la compactación obtenida en un caso dado, podría decirse que dos son los más importantes: el contenido de agua del suelo, antes de iniciarse el proceso de compactación y la energía específica empleada en dicho proceso. Por energía específica se entiende la energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen.

El establecimiento de una prueba simple de compactación en el laboratorio cubre, principalmente, dos finalidades. Por un lado disponer de muestras de suelo

compactadas teóricamente con las condiciones de campo, a fin de investigar sus propiedades mecánicas para conseguir datos firmes de proyecto; por otro lado, es necesario poder controlar el trabajo de campo, con vistas a tener la seguridad de que el equipo usado está trabajando efectivamente en las condiciones previstas en el proyecto.

En realidad la secuela práctica suele ser como sigue: cuando se va a realizar una obra en la que el suelo vaya a ser compactado se recaban muestras de los suelos que se usarán; en el laboratorio se sujetan esos suelos a distintas condiciones de compactación, hasta encontrar algunas que garanticen un proyecto seguro y que puedan lograrse económicamente con el equipo de campo existente; con el equipo de campo que vaya a usarse se reproducen las condiciones de laboratorio adoptadas para el proyecto (esto suele hacerse construyendo y compactando en el campo un terraplén de prueba con el suelo a usar, en el que se ve el número de veces que deba pasar el equipo, el espesor de las capas de los suelos depositados para compactar, etc.)

Finalmente, una vez iniciada la construcción, verificando la compactación lograda en el campo con muestras al azar tomadas del material compactado en la obra, se puede comprobar que en ésta se están satisfaciendo los requerimientos del proyecto.

1.6.2.1. PRUEBAS DE COMPACTACIÓN

En la actualidad existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en el laboratorio unas condiciones dadas de compactación de campo. Todos ellos pensados para estudiar, además, los distintos factores que gobiernan la compactación de los suelos. Históricamente, el primer método, en el sentido de la técnica actual, es el debido a R. R. Proctor y es conocido hoy día como Prueba Proctor Estándar o A.A.S.H.O. (American Association of State Highway Officials) 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 0.94 l de capacidad aproximada, de 10.2 cm. de diámetro y 11.7 cm. de altura, provisto de una extensión desmontable de igual diámetro y 5 cm. de altura. El molde puede fijarse a una base se metálica con tornillos de mariposa. El pisón es de 2.5 kg de peso y consta de un vástago cuyo extremo inferior hay un cilindro metálico de 5 cm. de diámetro. Los golpes se aplican dejando caer el pisón desde la altura de 30.5 cm.

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.

Con los datos anteriores la energía específica de compactación es de 6 kg cm/cm³ (12300 libras, pie/pie³), calculada con la fórmula:

$$Ee = \frac{N * n * W * h}{V}$$

Donde:

Ee = Energía específica.

N = Número de golpes por capa.

n = Número de capas de suelo.

W = Peso del pisón.

h = Altura de caída libre del pisón.

V= Volumen del suelo compactado.

Los datos que determinan la energía específica en la prueba, fueron establecidos originalmente por Proctor como los adecuados para reproducir los pesos específicos secos que podían lograrse económicamente (es decir, con un número moderado de pasadas) con el equipo comercialmente disponible en aquella época.

Con este procedimiento de compactación Proctor estudió la influencia que ejercía en

el proceso el contenido inicial de agua del suelo, encontrando que tal valor era de fundamental importancia en la compactación lograda. En efecto, observó que a contenidos de humedad crecientes, a partir de valores bajos, se obtenían más altos pesos específicos secos y, por lo tanto, mejores compactaciones del suelo, pero que esta tendencia no se mantenía indefinidamente, sino que al pasar la humedad de un cierto valor, los pesos específicos secos obtenidos disminuían, resultando peores compactaciones en la muestra. Es decir, Proctor puso de manifiesto que, para un suelo dado y usando el procedimiento descrito, .existe una humedad inicial, llamada la "óptima", que produce la máxima densidad seca que puede lograrse con este procedimiento de compactación.

Lo anterior puede explicarse, en términos generales, teniendo en cuenta que a bajos contenidos de agua, en los suelos finos, del tipo de los suelos arcillosos, el agua está en forma capilar produciendo compresiones entre las partículas constituyentes del suelo, lo cual tiende a formar grumos difícilmente desintegrables que dificultan la compactación. El aumento en contenido de agua disminuye esa tensión capilar en el agua haciendo que una misma energía de compactación produzca mejores resultados. Empero, si el contenido de agua es tal que haya exceso de agua libre, al grado de llenar casi los vacíos del suelo, ésta impide una buena compactación, puesto que no puede desplazarse instantáneamente bajo los impactos del pisón.

Debido al rápido desenvolvimiento del equipo de compactación de campo comercialmente disponible, la energía específica de compactación en la Prueba Proctor Estándar empezó a no lograr representar en forma adecuada las compactaciones mayores que podían lograrse con dicho nuevo equipo.

Esto condujo a una modificación de la prueba, 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 al mismo tiempo el peso del pisón y la altura de caída del mismo. Las nuevas 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 kg-cm/cm^3 ($56,200 \text{ libras-pie/pie}^3$), sobre la base de que el molde utilizado es el mismo que en la Prueba Proctor Estándar. Obviamente la densidad máxima obtenida con esta mayor energía de compactación resultará mayor que el obtenido en la Prueba Proctor Estándar y, consecuentemente, según la discusión precedente en torno al contenido inicial de agua, la nueva humedad óptima será ahora menor que en aquel caso. Esta prueba modificada es conocida como Prueba Proctor Modificada o A.A.S.H.O. Modificada. Por otra parte, con el objeto de estudiar más ampliamente el efecto de la energía de compactación sobre la compactación efectivamente lograda en el suelo, al mismo tiempo que por resultar de utilidad en casos en que sólo se disponga en el campo de equipo ligero, en algunos laboratorios se usa a veces la Prueba Proctor con un número de golpes de 15 por capa, disminuyendo así la energía específica de compactación a 3.6 kg-cm/cm^3 ($7,400 \text{ libras-pie/pie}^3$). En este caso la densidad seca máxima alcanzada en el suelo será menor y la humedad óptima requerida será mayor que en el caso de la prueba estándar.

En la Fig. VII-1 se presentan gráficas de compactación que ilustran los conceptos expuestos en los párrafos anteriores.

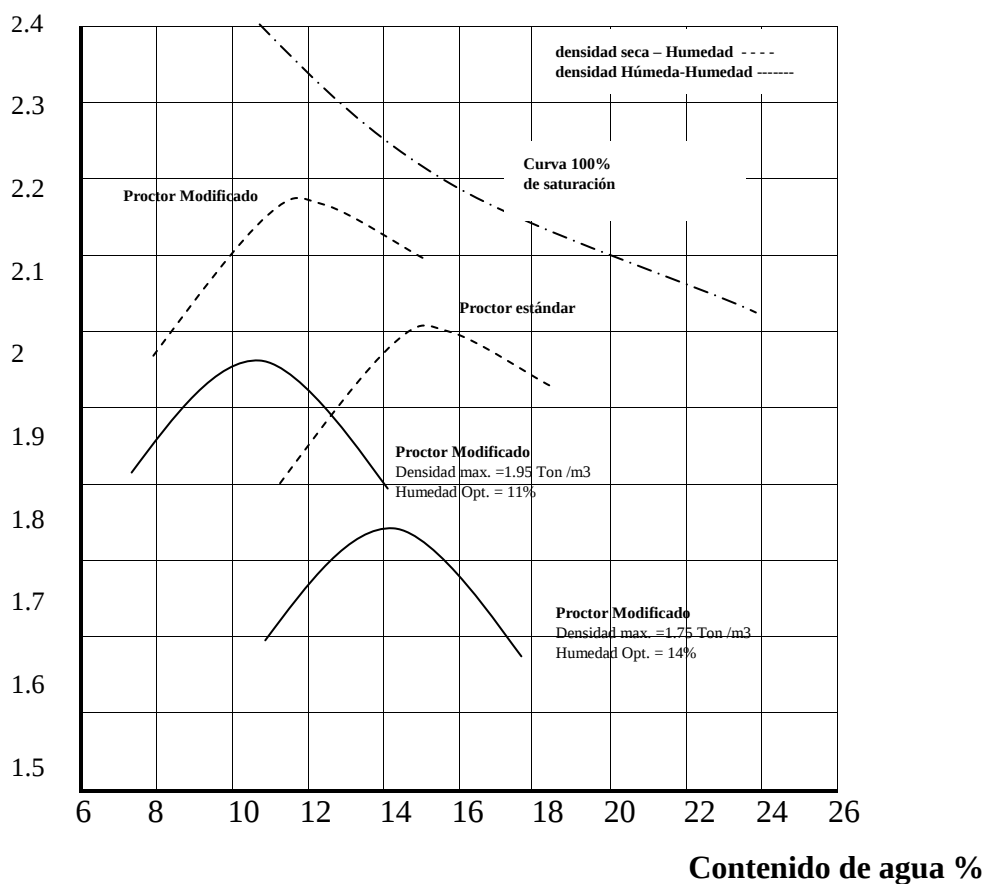
En la gráfica aparecen las curvas de densidad humedad-contenido de agua de un suelo arcillo-arenoso sujeto a Pruebas Proctor Estándar y Proctor Modificada; aparecen también las correspondientes curvas de densidad seca-contenido de agua y la curva “del 100% de saturación”.

Las curvas densidad humedad – humedad resultan de los datos de laboratorio, obtenidos al ejecutar las pruebas de compactación y las curvas densidad seca – Humedad se dibujan a partir de las anteriores aplicando la formula:

$$\gamma_{Humedad} = \frac{\gamma_{seca}}{1 + W\%}$$

Figura - 12
Curvas de compactación Proctor Estándar y Modificado

Densidad seca T/m3



Puede observarse que la densidad seca crece al principio al aumentar la humedad, disminuyendo después de sobrepasado el valor óptimo del contenido de agua y que la densidad máxima de la Prueba Proctor Modificada es mayor que el alcanzado con la Proctor Estándar, en tanto que la humedad óptima de ésta es mayor que la de

aquella, lo cual es acorde con lo mencionado anteriormente.

Las pruebas anteriormente vistas tienen el inconveniente de requerir mucho tiempo, bastante trabajo y una cantidad de material que a menudo resulta excesiva. En vista de ello, en épocas más recientes, se han desarrollado otras pruebas que tratan de atenuar esos defectos.

Aquí se trata a continuación una de tales pruebas, desarrollada por el Prof. S. D. Wiison en la Universidad de Harvard (E.U.A.); ésta ha sido, incidentalmente, una de las que ha rendido mejores resultados respecto a los fines perseguidos, pues duplica en forma, inclusive más aproximada que los métodos dinámicos antes descritos, la acción de amasado de los rodillos "pata de cabra". Esta prueba es aplicable únicamente a suelos finos plásticos, con partículas menores que 2 mm. que son los suelos que se compactan en el campo con tales rodillos. La prueba fue bautizada por el Prof. Wiison con el nombre de "miniatura", con referencia al hecho de que el molde empleado es de pequeñas dimensiones en comparación con el molde Proctor. La compactación del suelo se logra presionando estáticamente un émbolo de área especificada contra la superficie de las diversas capas con que se constituya la muestra; en cualquier aplicación la presión transmitida es constante, lo cual se logra adaptando al émbolo un resorte calibrado, que permite conocer el momento en que la presión ha sido aplicada. El molde es una cámara cilíndrica metálica de 3.3 cm de diámetro interior y 7.2 cm. de altura aproximada; el volumen de este molde resulta ser de 62 cm³; el molde está provisto de una extensión removible de 3.5 cm. de altura. El molde se fija a una base metálica que lo mantiene en posición durante la prueba. El émbolo aplicador de presión es una barra metálica de 1.3 cm de diámetro con mango de madera; dentro de este mango actúa el resorte comprimido a que se ha hecho referencia.

Cuando las pruebas Proctor se ejecutan sobre suelos puramente friccionantes como son las arenas limpias se encuentra que la curva no es del tipo mostrado en la Fig.

VII-1, no definiéndose, por lo general, una densidad seca máxima ni una humedad óptima. Esto es de esperarse si se toma en cuenta que este procedimiento de compactación no es el ordenado para este tipo de suelos por lo cual la acción del pisón no compacta eficientemente la muestra. Como se menciona anteriormente la vibración es el procedimiento más adecuado para compactar las arenas y por lo tanto, es preferible realizar pruebas de este tipo para determinar los pesos específicos en los estados más compacto y suelto y utilizar el concepto de compacidad relativa para determinar la compactación de masas de este tipo de suelo. Por lo anterior debe considerarse que las pruebas tipo Proctor son aplicables únicamente a suelos finos plásticos o que, por lo menos, tengan una apreciable proporción de éstos. En ocasiones se han utilizado algunos otros métodos de prueba con aplicación de carga estática, compactando a la muestra dentro de un cilindro por la aplicación de presión de un émbolo del mismo diámetro que el molde; estos métodos a veces han sido usados incluso en suelos puramente friccionantes; estas pruebas son realmente inadecuadas, por no reproducir las condiciones de amasado que pueda lograr cualquier equipo de campo disponible; en los suelos friccionantes la aplicación de carga estática, según es obvio, no conduce a ningún resultado práctico representativo. Modernamente se ha desarrollado equipo mecánico de laboratorio para efectuar las pruebas de compactación tipo Proctor automáticamente.

1.6.2.2. CURVA DE SATURACIÓN

La masa de suelo involucrada en el proceso de compactación comienza como un sistema de tres fases: suelos, agua y aire. Durante los primeros ensayos hay una cantidad considerable de aire presente, pero el proceso produce un cambio de estado en el cual cada vez hay mas suelo y agua presentes. Aun en la situación del contenido óptimo de agua en el suelo, existe una cantidad de aire considerable. En la parte húmeda de la curva, el efecto principal es de desplazar todo el aire de los vacíos con agua para producir un sistema de dos fases (una condición de cero aire – vacíos). Como nunca es posible sacar todo el aire de los vacíos, lo cual resultaría una

condición de $S=100\%$, cualquier curva de compactación estará siempre por debajo de la curva de saturación

El peso volumétrico seco correspondiente a la curva de saturación teórica para la humedad dada se calcula con la fórmula:

$$\gamma_{zav} = \frac{\gamma_w}{\frac{1}{G_s} + w}$$

Donde:

γ_{zav} = peso específico seco de vacíos cero de aire

γ_w = peso específico del agua

G_s = peso específico de los sólidos del suelo

W = contenido del agua

La curva de saturación teórica tiene por objeto comprobar si la prueba Proctor fue correctamente efectuada, ya que la curva de saturación y la curva Proctor nunca deben cortarse dado que es imposible en la práctica llenar totalmente con agua los huecos que dejan las partículas del suelo compactado.

La curva de saturación teórica sirve para determinar si un suelo, en el estado en que se encuentra en el lugar, es susceptible de adquirir mayor humedad o mayor peso volumétrico fácilmente

1.6.2.3. OTROS FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS

Aparte del contenido inicial de agua y de la energía específica de compactación, que son los factores más importantes entre los que influyen en la compactación de los suelos, hay otros que, en algunos casos, pueden ser de significación y cuya importancia práctica no debe ser subestimada. Brevemente se mencionan algunos de

ellos a continuación:

La curva densidad seca - humedad es diferente si la prueba se efectúa partiendo de un suelo relativamente seco y se va agregando agua para obtener los diferentes puntos o si se parte de un suelo húmedo que se va secando por evaporación en el laboratorio, según la prueba progresa. Las investigaciones experimentales comprueban que en el primer caso se obtienen pesos específicos secos mayores que en el segundo, para un mismo suelo y a los mismos contenidos de agua; este efecto parece ser particularmente notable en suelos finos plásticos con contenidos de agua inferiores al óptimo. La explicación del fenómeno podría ser como sigue:

cuando el suelo está seco y se le agrega agua, ésta tiende a quedar en la periferia de los grumos, tendiendo a penetrar en ellos sólo cuando pase el tiempo; por otra parte, cuando el agua se evapora al irse secando un suelo húmedo, la humedad superficial de los grumos se hace menor que la interna. A un mismo contenido de humedad se tienen entonces condiciones diferentes en los grumos de suelo; en el primer caso, en que el agua se agregó, la presión capilar entre los grumos será menor por el exceso de agua en comparación con el segundo caso, en que la evaporación hace que los meniscos se desarrollen más. Por lo tanto, en el primer caso la ligazón entre los grumos será menor, haciendo que una misma energía de compactación sea más eficiente para compactar al suelo que en el segundo caso.

Claro está que los efectos anteriores se ven influidos por el tiempo que se deje pasar entre la incorporación del agua y el momento de la prueba, pues si este tiempo es largo se permite la uniformización de la humedad en los grumos de suelo, con la consecuencia de que el agua superficial de ellos disminuye aumentando las presiones capilares. Por lo tanto la diferencia entre las curvas de compactación de los casos antes analizados disminuirá al aumentar el tiempo de humedecimiento de la muestra de suelo.

La práctica recomendada a estos efectos es proceder en la prueba a partir de un suelo relativamente seco incorporando agua a distintas porciones del mismo en la proporción necesaria para alcanzar los contenidos de agua deseables, dejando cada porción 24 horas en reposo a fin de permitir la uniformización de la humedad.

El contenido de agua original del suelo en la naturaleza también es un factor que influye, aunque en menor grado, en la porción de la parte "seca" de la curva de compactación, sobre todo cuando se procede a la compactación inmediatamente después de haber incorporado al suelo el agua adicional requerida. Este fenómeno se comprende si se toma en cuenta la discusión arriba incluida, pues en un suelo originalmente bastante seco, el agua que se añada para llegar a un contenido de agua deseado para la determinación de un cierto punto de la curva, producirá una mayor diferencia inmediata entre las condiciones de humedad externa e interna de los grumos, que si el suelo originalmente hubiera estado más húmedo. Por ello es de esperarse que los pesos específicos secos obtenidos sean mayores cuando los contenidos originales de agua del suelo sean menores. Este efecto prácticamente se elimina si se procede como anteriormente se recomienda; es decir, dejando pasar suficiente tiempo para la adecuada incorporación del agua.

Es común en la práctica el usar la misma muestra de suelo para la obtención de puntos sucesivos de la curva de compactación: ello implica la continuada "recompactación" del mismo suelo. Esta práctica se ha revelado como totalmente inconveniente toda vez que la investigación experimental ha demostrado, sin género de duda, que procediendo con un suelo recompactado los pesos específicos obtenidos son mayores que los mismos obtenidos con muestra virgen, por lo que en suelos "recompactados" la prueba puede llegar a dejar de ser representativa. Parece que una explicación simple del efecto anterior reside en la deformación volumétrica del tipo plástico producida por las sucesivas compactaciones. Como en el campo el suelo no sufre ninguna recompactación, la práctica de laboratorio debe ser, consecuentemente, el usar muestras de suelo diferentes para la obtención de cada punto de la curva de

compactación.

Las Pruebas Proctor Estándar o Modificada con el molde de 10.2 cm (4 pulgadas) de diámetro interior no deben usarse en suelos cuyo tamaño máximo de partícula sea mayor que el correspondiente a la malla N° 4; es decir, del orden de gravas, pues estas partículas introducen efectos restrictivos indeseables que afectan las relaciones de pesos húmedos-contenido de agua; en estos casos es mucho más conveniente usar un molde de mayor volumen, cuyo diámetro sea de unos 15.2 cm. (6 pulgadas), que puede usarse en materiales cuyo tamaño máximo no sobrepase el correspondiente a la malla de 19.1 mm. (3/4 pulgadas). Independientemente del tamaño del molde, el número de capas, el número de golpes, el peso y la altura de caída del pisón deben correlacionarse para producir la misma energía de compactación. Cuando esto se cumpla, el tamaño del molde no ejerce, de por sí, influencia apreciable en la forma de las curvas de compactación, según ha demostrado la experiencia. Sin embargo, un detalle que debe cuidarse cuando se hacen todas las combinaciones necesarias es el que se conserve en todos los casos aproximadamente la relación entre el espesor de las capas compactadas y el diámetro del pisón empleado para ello.

1.6.2.4. COMENTARIOS ADICIONALES SOBRE LA COMPACTACIÓN DE LOS SUELOS "FRICCIONANTES" Y "COHESIVOS"

Los principios que gobiernan la compactación de suelos en el campo son esencialmente los mismos que los discutidos anteriormente para las pruebas de laboratorio; así, los pesos específicos secos máximos obtenidos resultan ser fundamentalmente función del tipo de suelo, del contenido de agua usado y de la energía específica aplicada por el equipo que se utilice, la cual depende del tipo y peso del equipo y del número de pasadas sucesivas que se aplique.

La compactación de terraplenes se realiza con rodillos "pata de cabra", rodillos lisos, rodillos neumáticos y equipos vibratorios. Los rodillos pata de cabra tienen como

característica fundamental compactar al suelo de abajo hacia arriba ejerciendo un efecto de amasado en el mismo, por medio de protuberancias de unos 15 cm. de longitud fijas al tambor metálico y espaciadas entre sí 15 a 25 cm de cualquier dirección. Estas protuberancias tienen la forma típica de la pezuña de una cabra, lo cual da su nombre al equipo. Los demás rodillos mencionados y los equipos vibratorios compactan al suelo de la superficie hacia abajo. Los rodillos pata de cabra normalmente usados ejercen presiones sobre el suelo comprendidas entre 10 y 40 kg/cm^2 , si bien cargándolos con agua y arena es posible elevar estas presiones hasta valores del orden de 80 kg/cm^2 y aún, más; sin embargo, estos rodillos tan pesados sólo funcionan satisfactoriamente en los casos en que el contenido de agua del suelo sea muy bajo.

Los equipos vibratorios recomendados para la compactación de suelos puramente friccionantes como son las arenas o las gravas arenosas pueden variar en un gran número de tipos y sistemas, que van desde la utilización de pisones vibratorios manuales, hasta plataformas vibratorias que compactan extensiones mayores de suelo. Existe un intervalo para la frecuencia del vibrador en el cual trabaja con el máximo de eficiencia; este intervalo parece estar comprendido entre $1/2$ a $11/2$ veces la frecuencia natural del suelo. En la práctica se ha visto que frecuencias de 1,500 a 2,000 ciclos por minuto para el vibrador suelen rendir buenos resultados. En épocas recientes se ha tratado de combinar efecto vibratorio con rolado pero, en este tipo de equipo, se presenta la dificultad de que cualquier amortiguador, incluyendo las llantas de los rodillos, que se intercale entre el vibrador y el suelo produce una amortiguación de las vibraciones de tal magnitud que difícilmente se justifica la combinación, económicamente hablando. De lecho el uso de equipo vibratorio encierra algunas dificultades prácticas que hacen que muchos especialistas prefieran los rodillos neumáticos para la compactación de grandes masas de arena. El problema de compactación de arenas ha tratado de resolverse también por el procedimiento llamado de vibroflotación, que consiste en introducir en la arena a la profundidad deseada un vibrador combinado con un inyector de agua a presión. Al retirar el

vibrador se produce la compactación por un efecto combinado de vibración e inyección del agua; el efecto del agua realmente es soltar la arena a fin de permitir que la acción del vibrador sea más efectiva: También ha dado excelente resultado para compactación de grandes masas de arena suelta el hacer estallar cargas de explosivos en pozos excavados al efecto en el interior de la masa. Por último, se han compactado arenas muy sueltas simplemente bañándolas con agua y permitiendo la filtración de esa agua a través de la masa; el agua arrastra los granos finos, depositándolos en los huecos entre los más gruesos, aumentando así la compacidad general del manto. A veces el efecto se ha acelerado empleando agua a presión. Desde luego este procedimiento sencillo y económico es mucho menos eficiente que los antes descritos.

En suelos arenosos con finos poco plásticos los rodillos neumáticos son los que rinden mejores resultados y actualmente su uso tiende a imponerse aun sobre los rodillos "pata de cabra". En estos suelos no existen grumos cuya disgregación requiera grandes concentraciones de presión, como las que proporciona el rodillo "pata de cabra"; por ello resulta mejor la aplicación de presiones uniformes en áreas mayores, que evitan, inclusive, el producir zonas sobrefatigadas en el material compactado.

En limos poco plásticos, los rodillos neumáticos resultan también eficientes. Suelen usarse también los rodillos lisos y "pata de cabra", aunque con resultados un poco menos satisfactorios. En estos suelos la curva de compactación es muy aguda, por lo que es recomendable ejercer un control muy estricto sobre los contenidos de agua usados en el trabajo de campo.

Para compactar grandes masas de arcilla, el mejor método es el uso de los rodillos "pata de cabra", pues este equipo proporciona, dadas sus características peculiares, las concentraciones de presión y efectos de amasado necesarios para la disgregación de los grumos y compactación adecuada de estos materiales. El rodillo "pata de cabra" ofrece un ejemplo típico de cómo la moderna Mecánica de Suelos ha adoptado

técnicas fundadas en prácticas ancestrales, basadas en la experiencia más primitiva. En efecto, existe evidencia histórica suficiente para poder afirmar que los primeros esfuerzos sistemáticos de compactación de masas arcillosas fueron realizados en Asia, en la construcción de bordos y consistían en un apisonamiento manual continuado con varilla de bambú, así como en el paso de animales sobre los terrenos por compactar. Los constructores ingleses adoptaron la práctica y observaron que la cabra, por la forma especial de su pata, era uno de los animales que más eficientemente compactaban las arcillas; el actual rodillo reproduce esas tradiciones de un modo fiel.

La compactación producida en los suelos por los diferentes equipos se ve, evidentemente, influida por el número de veces sucesivas que aquéllos pasan sobre el material tendido; la relación entre los pesos específicos secos obtenidos en el campo y el número de pasadas es abrupta en un principio; es decir, para las primeras pasadas la compactación crece muy rápidamente, pero cuando el equipo ha pasado varias veces, el efecto de una pasada posterior disminuye, al grado que, económicamente, se llega a un momento en que ya no compensa que el equipo pase más veces sobre el suelo. En la práctica se ha encontrado que el número económico de pasadas fluctúa entre 5 y 10, según los casos.

El número de pasadas necesario para obtener una cierta densidad seca es función del equipo de campo usado; un equipo pesado logrará más pronto el mismo efecto que otro más ligero. Actualmente la tendencia es usar equipos de compactación pesados, a fin de reducir el número de pasadas sobre el material.

Por lo general, los requisitos de compactación en el campo se basan sobre una densidad seca de proyecto, obtenido en pruebas de laboratorio realizadas sobre el suelo de que se trata. El equipo a usarse para lograr la compactación dependerá de tal valor de proyecto y del contenido de agua natural del suelo en los bancos de que se extraiga y además claro .es, del tipo de suelo en sí. Teóricamente el material habrá de

compactarse con la humedad óptima correspondiente a la densidad deseada, obtenida en laboratorio. Para ello a veces puede ser necesario añadir agua al material en el banco, en tanto que otras veces será preciso secar éste, generalmente aireándolo un período de tiempo después de extraído. Sin embargo, condiciones de clima pudieran imponer restricciones muy serías respecto a la humedad del suelo por compactar; en tales casos, la prueba de laboratorio que fije los datos de proyecto deberá tener en cuenta tales restricciones y el equipo de campo trabajar sobre tales bases. Desde luego siempre conviene que el material se compacte, por lo menos, con una humedad próxima a la óptima.

Por todas las reflexiones anteriores resulta lógico esperar que en el campo no se logre precisamente la densidad seca máxima indicada por las pruebas de laboratorio. Se define como grado de compactación de un suelo compactado la relación, en porcentaje, entre el peso específico seco obtenido en la obra, y el máximo especificado en el laboratorio para tal obra. El control de la obra se lleva generalmente investigando el grado de compactación de los materiales ya compactados y estableciendo un mínimo aceptable, que varía según la importancia y función de la obra.

El material por compactar se deposita por capas, generalmente de espesor comprendido entre 10 y 30 cm. siendo común el de 20 cm.

En obras importantes se recomienda siempre recurrir a secciones experimentales por ejemplo terraplenes de prueba que permitan determinar el espesor de las capas y el número de pasadas de un cierto equipo, para obtener el grado de compactación deseado.

El grado de compactación de un suelo es:

$$GC(\%) = 100 * \frac{\gamma_{campo}}{\gamma_{laboratorio}}$$

Cabe mencionar que, independientemente del amplio uso que se hace actualmente del concepto grado de compactación, dista de estar libre de defectos. En efecto, podría decirse que el concepto es inadecuado para evaluar la compactación lograda por un cierto equipo de campo. Un material (A) en estado totalmente suelto, tal como se deposita en la obra, antes de sufrir ninguna compactación, puede exhibir un grado de compactación, según la fórmula citada, del orden de 80%, mientras que otro material (B), en las mismas condiciones puede tener un grado de compactación de 60%. (Dependiendo de la relación que en esos materiales pueda tenerse entre sus pesos específicos en el estado más suelto y los mismos después de haber sometido al suelo a una prueba de compactación.) Si el material B se compacta ahora hasta alcanzar en el campo un 80% de compactación, se dirá que está igualmente compacto que el A, aplicando el criterio del grado de compactación; sin embargo, la realidad es totalmente distinta: A está en estado totalmente suelto, con todo lo que ello implica en lo que se refiere a su comportamiento mecánico, en tanto que B ya ha sido parcialmente compactado, con lo que aumentó su resistencia, disminuyó su compresibilidad y en general, adquirió características diferentes de las correspondientes al estado suelto.

Tomando en cuenta lo anterior referido a grado de compactación, se adoptó una relación diferente para medir la compactación alcanzada por el suelo en el campo, denominada "Compactación Relativa", definida por la expresión:

$$C.R.(%) = 100 * \frac{\gamma_d - \gamma_{d \min}}{\gamma_{d \max} - \gamma_{d \min}}$$

Donde:

$\gamma_{d \max}$ = Máxima densidad seca obtenida según un cierto procedimiento de

compactación de laboratorio.

$\gamma_{d \min}$ = Mínima densidad seca del material.

γ_d = Peso específico seco del material tal como ha sido compactado en la obra.

Esta nueva relación tiene la ventaja de no caer en la ambigüedad del grado de compactación, pues ahora un material totalmente suelto tiene 0% de compactación relativa, pero presenta el inconveniente, en la actualidad, de no existir aún un procedimiento estándar para determinar $\gamma_{d \min}$. Esta dificultad desaparecerá el día en que se logre un acuerdo al respecto entre todos los técnicos interesados. Claro que tal procedimiento seguramente habrá de depender del tipo de suelo con que se trabaje.

En suelos puramente friccionantes el $\gamma_{d \min}$ se determina de un modo natural colocando la arena simplemente a volteo y en estos materiales la fórmula C.R (%) puede aplicarse de inmediato, calculando el $\gamma_{d \max}$ con un procedimiento de vibrado y varillado, pues ninguna otra prueba de compactación de las hoy usadas es adecuada para compactarlos según ya se indicó; por lo tanto, en arenas las pruebas tipo Proctor son inadecuadas y la expresión grado de compactación G.C (%) carece de sentido.

Como se ha indicado el control de los trabajos de compactación suele llevarse actualmente haciendo uso del concepto grado de compactación, Generalmente una empresa contratista realiza el trabajo y la parte contratante controla los resultados obtenidos para verificar el cumplimiento de las condiciones de proyecto; esto se hace verificando que en el campo se alcance el grado de compactación especificado en dicho proyecto. Esta forma de trabajar ha ocasionado un problema que comúnmente molesta a los ingenieros de control de calidad. Para determinar el grado de compactación que el contratista ha alcanzado en una determinada capa compacta es preciso conocer el contenido de agua de la muestra de suelo que se haya extraído de dicha capa; esta determinación, si se siguen los métodos tradicionales, exige un

período de secado al horno del orden de las 24 horas, con el inconveniente de que en el momento que el ingeniero llegue a calcular el grado de compactación, probablemente el contratista ya ha compactado otras capas sobre aquella cuya calidad se controla. Este problema ha tratado de resolverse sobre todo por procedimientos de laboratorio para lograr el secado de un suelo empleando tiempos mucho más reducidos; el secador de rayos infrarrojos cubre estos fines. Finalmente en épocas más recientes se han desarrollado equipos nucleares, en los que se determina la densidad y el contenido de agua del suelo recién compactado por medio de aparatos especiales en breves minutos. Aunque los equipos de medición basados en técnicas de ingeniería nuclear están en rápido desarrollo y se perfeccionan de día en día,

1.6.3. PRUEBAS DE COMPACTACIÓN PROCTOR STÁNDAR Y MODIFICADA

1.6.3.1 EQUIPO NECESARIO

Para la realización de la prueba se requiere el siguiente equipo:

Molde de 100 cm. De diámetro nominal con una capacidad de 0.944 ± 0.008 lt, con un diámetro interno de 101.6 ± 0.4 mm. y una altura de 116.4 ± 0.1 mm.

Molde de 150 mm. De diámetro nominal con una capacidad de 2124 ± 0.021 lt, con un diámetro interno de 152.4 ± 0.1 mm.

Pisón metálico de 50 ± 0.2 mm. De diámetro, con un peso de 2500 ± 10 g. Se ocupa en el método Standard.

Pisón metálico de 50 ± 2 mm. De diámetro con un peso de 4.500 ± 10 g. Se ocupa en el método modificado.

Probetas graduado con capacidad de 500 cm^3 graduada a 2.5 cm^3 .

Una balanza con una capacidad de 10 kg y una precisión de 5 g y otra con 1 kg de capacidad y una precisión de 0.1 g.

Regla de acero de 300 mm. De largo, tamices de 50; 20 y 5 mm. De abertura, cápsulas, pailas, poruñas

1.6.3.2 TAMAÑO DE LA MUESTRA

El tamaño de la muestra de ensayo se obtiene de acuerdo a la tabla mostrada a continuación:

Tabla - 13

Tamaño de la muestra de ensayo

Molde	Método	Masa mínima de la muestra (g)	Masa aprox. De fracción de muestra para cada determinación (g).
100	1	15000	3000
150	2	30000	6000

1.6.3.3. PROCEDIMIENTO DE PRUEBA

El procedimiento de prueba se ajustará a lo siguiente:

Se describe solo el método uno, Proctor Standard, ya que los demás siguen el mismo procedimiento variando solo las características indicadas.

1. Para permitir un mínimo de 5 determinaciones de punto de la curva de compactación, dos bajo la humedad óptima y dos sobre ellas, se procede a secar al aire una cantidad suficiente de suelo.
2. Se selecciona el material haciéndolo pasar por la malla N°4, se pesa el material retenido por ella y el que pasa. Se utiliza en el ensaye solo el material que pase bajo esta malla.
3. Se mezcla cada porción de suelo, con agua para llevarla al contenido de humedad deseado, considerando el agua contenido en la muestra.

4. Para permitir que el contenido de humedad se distribuya uniformemente en toda la muestra, se guardan las proporciones de suelo en envases cerrados.
5. Se pesa el molde y su base. Se coloca el collar ajustable sobre el molde.
6. Colocar una capa de material aproximadamente $\frac{1}{3}$ de la altura del molde más el collar. Compactar la capa con 25 golpes uniformemente distribuidos en el molde de 100 mm de diámetro con un pisón de 2.5 kg con una altura de caída de 30.5 cm.
7. Repetir 2 veces la operación anterior, escarificando ligeramente la superficie compactada antes de agregar una nueva capa. Al compactar la ultima capa debe quedar un pequeño exceso de material por sobre el borde del molde, el que debe sobresalir de $\frac{1}{4}$ a $\frac{1}{2}$ pulgada.
8. Retirar cuidadosamente el collar ajustado y enrasar la superficie del molde con una regla metálica. Pesar el molde (con la placa) y el suelo y restar la masa del primero, obteniendo así la masa del suelo compactado (**M**). Registrar aproximado a 1 g.
9. Retirar el material del molde y extraer dos muestras representativas del suelo compactado. Obtener la humedad de cada uno de ellos y registrar la humedad del suelo compactado como el promedio de ambas.
10. Repetir las operaciones anteriores, hasta que haya un decrecimiento en la densidad húmeda del suelo. El ensaye se debe efectuar desde la condición más seca a la condición más húmeda
11. dibuje los resultados obtenidos en una grafica que tenga como ábsidas, los diferentes contenidos de agua resultantes y como ordenadas los pesos específicos secos.

1.6.3.4. ERRORES POSIBLES

Los errores más comunes que pueden afectar los resultados de estas pruebas son los siguientes:

1. El mezclado incompleto del suelo con el agua o la incompleta destrucción de grumos en el suelo.
2. El no repartir uniformemente los golpes del pisón sobre la superficie de la muestra.
3. El que las muestras tomadas para determinación del contenido de humedad no sean representativas del material compactado. En caso de duda al respecto puede determinarse la humedad de todo el material del molde.
4. El no determinar el número suficiente de puntos cómo definir correctamente la curva de compactación.
5. al no realizar la compactación en las capas correspondientes iguales los puntos determinados de la curva se mostraran erráticos.
6. el molde de compactación debe de colocarse sobre una base firme que evite su vibración durante el proceso de compactación
7. El uso continuado de la misma muestra.

1.6.3.5. PROPIEDADES DE SUELO AFECTADAS POR LA COMPACTACIÓN

Generalmente el esfuerzo de compactación imparte al suelo:

1. Un incrementó a la resistencia la corte
2. un incremento en el potencial de expansión
3. un incremento en la densidad $\gamma = f(e)$
4. una disminución de la contracción
5. una disminución de la permeabilidad $\kappa = f(e)$
6. una disminución de la compresibilidad $S = f(e)$

De esta lista de propiedades afectadas por la compactación, se ve claramente que el problema de especificar la compactación es algo mas que simplemente el requerimiento de incrementar la densidad del suelo. También es importante

considerar los efectos colaterales; afortunada mente el problema no es tan grave como parecía a primera vista divido al método de estipular o especificar compactación utilizando mas común mente $X\%$ de patrón de compactación modificada según el método Aashto. Es sin embargo muy importante especificar el tipo de suelos al cual se aplican los criterios de compactación en un proyecto dado con fin de eliminar por ejemplo, problemas con el cambio de volumen.

Se reconoce hoy en día que la estructura resultante de la masa de suelos especialmente cuando hay suelos finos presentes se asocia íntimamente con el proceso de compactación y el contenido de humedad a la cual se compacta la masa de suelo. Este concepto es importante en extremo para compactar los núcleos de arcilla de represas (por ejemplo), donde asentamientos fuertes pueden causar fracturas de dicho núcleo. Se ha encontrado que la estructura dispersa del suelo obtenida al compactarlo en el lado húmedo del óptimo de la humedad resulta en un suelo que tiene resistencia la corte algo menor pero que puede resistir grandes deformaciones sin falla (fracturas) y las consiguientes filtraciones y falla total de la presa. La compactación del suelos en el lado húmedo del óptimo reduce igual mente su permeabilidad, comparada con la permeabilidad obtenida al compactar en el lado seco del óptimo

1.6.3.6. CONSIDERACIONES SOBRE EL SIGNIFICADO DE LOS TÉRMINOS “HUMEDAD ÓPTIMA” Y “DENSIDAD SECA MÁXIMA”

En esta parte del trabajo de tesis se hace una breve discusión sobre el significado de los términos humedad óptima y densidad seca máxima.

Desde hace mucho tiempo atrás y como consecuencia de los estudios de Proctor sobre compactación de suelos, los ingenieros de todo el mundo han llegado a estar familiarizados con las expresiones humedad óptima y densidad seca máxima. Desafortunadamente, con frecuencia han sido mal entendidos y es común ver que

muchos ingenieros los manejan como si fueran constantes básicas fundamentales del suelo, al modo que en Física se manejan constantes tales como la de gravitación universal o el punto de ebullición del agua. En realidad hoy es evidente que se trata de conceptos relativos variables, que pueden cambiar con el método que se utilice para compactar el suelo y con otros factores, como ya se ha hecho notar en el cuerpo de este capítulo.

Para ilustrar la variación de la densidad seca máxima y de la humedad óptima con el método de compactación, científicos presenta los resultados obtenidos en varios suelos, que cubren la gama desde piedra triturada que pasa la malla 4 hasta arcilla limosa. Estos suelos se estudiaron según varios procedimientos de compactación que incluyen el Proctor Estándar (AASHO estándar), el Proctor Modificado (AASHO modificado), el método de compactación por impacto de California y un método que usa un compactador mecánico. Aunque todos estos métodos compactan al suelo por el impacto de un pistón, existen diferencias en el peso y altura de caída libre del mismo, así como en el número y espesor de las capas de suelo. De los resultados obtenidos es evidente que hay diferencias notorias en los pesos específicos secos máximos obtenidos por estos métodos que son estándar en varias instituciones. También es evidente que al procedimiento que da los mayores pesos específicos secos máximos corresponde una menor humedad óptima. Dicho en otras palabras, la humedad óptima es una variable que depende de la energía de compactación. En el campo la humedad óptima es una variable que depende del tipo y peso de los rodillos usados en la compactación. Los resultados obtenidos muestran diferencias del orden de 10% para arena limpia y del 5% para arena limosa en los pesos específicos secos máximos. Desde el punto de vista práctico surge, entonces, la pregunta:

¿Cuál método de laboratorio duplica mejor los pesos específicos secos que pueden obtenerse en el campo con los rodillos modernos de construcción? Se tiene la experiencia, hasta cierto punto contradictoria, de que las gravas arenosas se compactan fácilmente a la densidad seca especificada con unas cuantas pasadas de un rodillo neumático y a veces hasta con el paso del equipo usual de construcción,

mientras que los suelos arcillosos y limosos sujetos a numerosas pasadas de los rodillos no llegan en ocasiones a compactarse a la densidad seca especificada para una obra dada. También es evidente de los resultados obtenidos en la práctica que el acomodo de las partículas de suelo que se logra por impacto en el espacio confinado del molde en el laboratorio no es, necesariamente, el mismo que producen los rodillos lisos o los rodillos neumáticos en el campo, en que el suelo no está confinado. Mientras que algunos procedimientos de laboratorio producen compactaciones similares a las obtenidas en el campo en ciertos suelos, lo cierto es que ningún método, de los ahora en uso, duplica en forma completa la compactación lograda en el campo en todos los tipos de materiales.

Especulando un poco sobre las relaciones entre los resultados obtenidos de los diversos procedimientos de compactación y el grado de compactación que normalmente puede lograrse en una obras se hace notar que si se especifica un grado de compactación del 90% del AASHO modificado, es frecuente que la densidad seca así especificada corresponda a un 95% de compactación del AASHO estándar en un tipo de material, mientras que en otro tipo de suelo puede corresponder al 100% del AASHO estándar. .Estas son las diferencias que debe conocer todo ingeniero encargado del control de la compactación de una obra dada. Lo anterior se acentúa aún más con el desarrollo durante los últimos años del equipo de compactación, tanto en cuanto a que los nuevos rodillos lisos y neumáticos son mucho más pesados cuanto que nuevos tipos, como los rodillos segmentados o los vibratorios, han hecho su aparición en este equipo especializado.

Mientras que el grado de compactación aumenta con la energía de compactación en un procedimiento dado, esto no es necesariamente cierto cuando se varía el método de compactación, pues un cierto procedimiento puede ser más eficiente que otro. Por ejemplo, los rodillos lisos no vibratorios. Así, con un rodillo vibratorio apropiado puede compactarse adecuadamente la arena con muy poca energía, sin haber ejecutado un fuerte trabajo de compactación.

Por último se comenta sobre la diferencia entre un suelo adecuadamente compactado con un ligero trabajo de compactación y otro inadecuadamente compactado con un fuerte trabajo de compactación. En otros términos: ¿Qué significado tiene la compactación lograda con el equipo especializado de construcción? Hveem hace notar que mientras la mayoría de los ingenieros parecen estar interesados en controlar únicamente la densidad seca como tal, se ha descuidado la atención a lo realmente importante, a saber, la mejor estabilidad estructural del suelo compactado. En cierto tipo de suelos puede lograrse una adecuada estabilidad estructural con un ligero trabajo de compactación, mientras que en otros esta estabilidad estructural (características de resistencia, compresibilidad y de esfuerzo-deformación) puede ser inadecuada aunque se haya efectuado un fuerte trabajo de compactación y se haya aun obtenido la compactación especificada, fijada con el criterio simplista e ingenuo de llegar a un 90% densidad seca máxima de un método estándar de laboratorio.

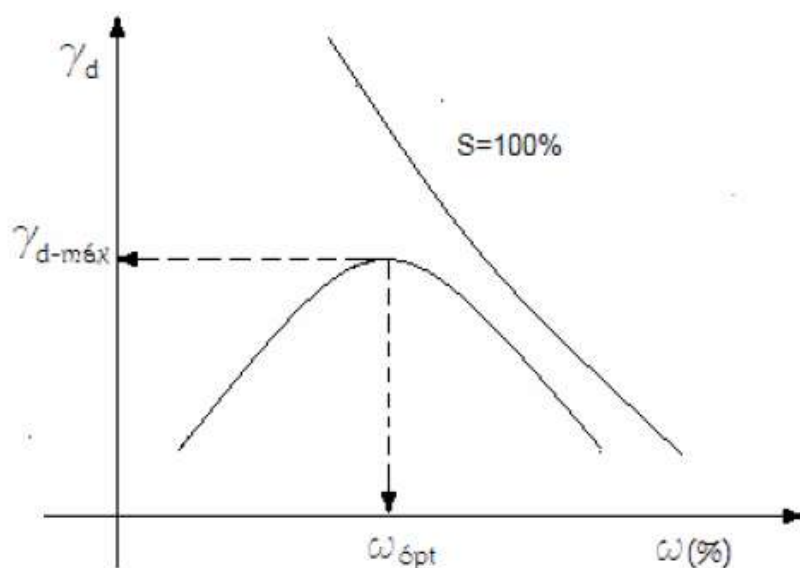
El aumentar el grado de compactación o peso volumétrico seco de un suelo puede ser o no benéfico, dependiendo del tipo de suelo, de su grado de compactación y de su contenido de agua principalmente. Por lo tanto, los términos densidad seca máxima y humedad óptima carecen de significado a menos que todas las condiciones y circunstancias del suelo estén claramente definidas. Existen, en efecto, casos en que inclusive una sobre compactación puede ser peligrosa, en el sentido de que se harán empeorar con ella las características de comportamiento mecánico de los suelos. Por ejemplo, la espuma de basalto (tezontle), que se usa frecuentemente cuando se desea tener un material ligero, al ser compactada más allá de un cierto límite comienza a disgregarse produciendo gran cantidad de finos que perjudican las características de resistencia del conjunto; en otros casos, ciertos limos y arcillas expansivos aumentan mucho su peligrosidad por esta propiedad al ser compactados fuertemente sobre todo en climas húmedos.

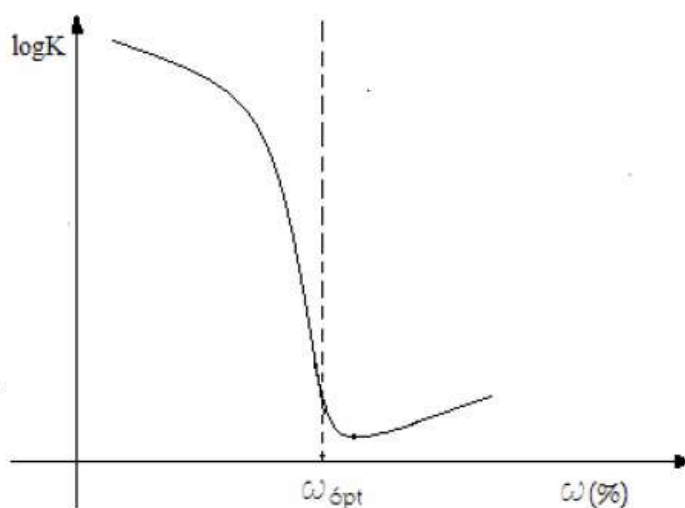
En resumen, la compactación de los suelos es un tratamiento mecánico que se da a

éstos en el campo a fin de mejorar sus características de comportamiento mecánico y su permanencia ante el ataque de ciertos agentes del intemperismo. Como tal trabajo cuesta esfuerzo y dinero y ha de quedar bien hecho, está ligado a problemas de control de calidad de la obra terminada; para hacer posible tal control, se han desarrollado hoy las pruebas de compactación.

1.6.3.7. VARIACIÓN DE LA PERMEABILIDAD CON LA HUMEDAD Y LA DENSIDAD SECA PARA UNA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN

Figura VII-2

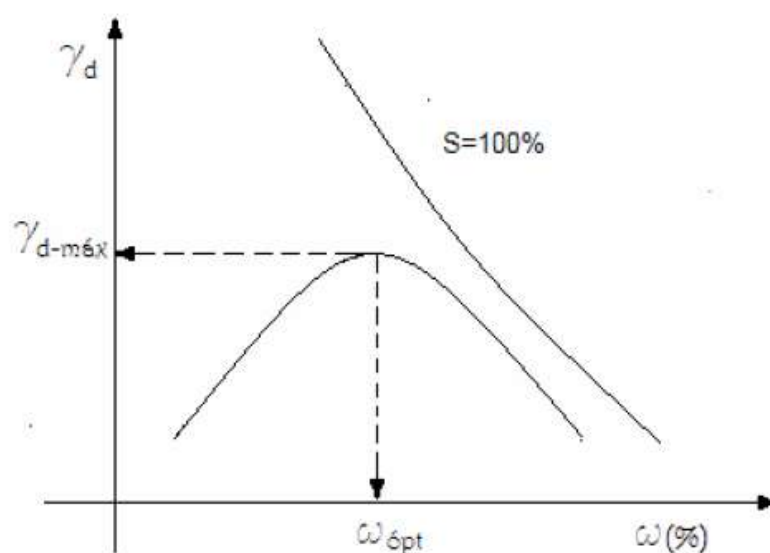


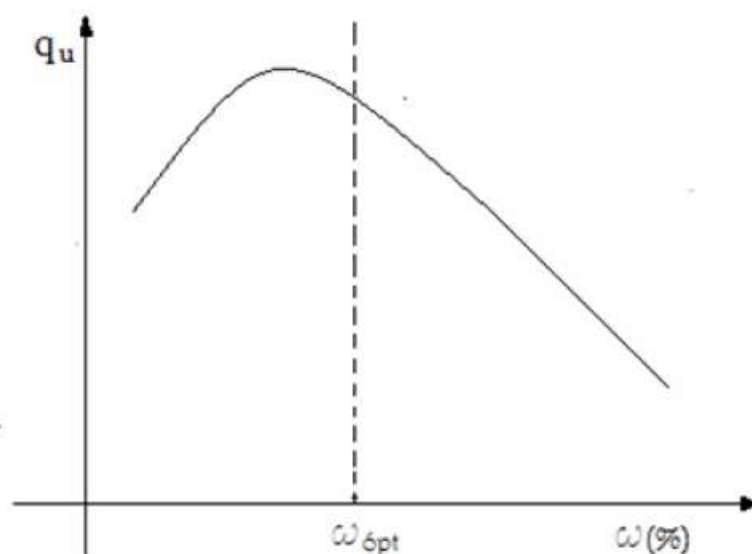


Como se observa en la figura VII-2, las permeabilidades más bajas, para una misma energía de compactación y por ende para un mismo costo de compactación, se alcanzan con humedades ligeramente superiores a la óptima de dicha energía (2 ó 3%)

1.6.3.8. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA CON LA HUMEDAD Y LA DENSIDAD SECA PARA UNA ENERGÍA DE COMPACTACIÓN.

Figura VII-3





En la Figura VII-3 se observa que la mayor resistencia, para una misma energía de compactación y por ende para un mismo costo de compactación, se alcanza con humedades inferiores ligeramente a la óptima de dicha energía (2 ó 3%). También se observa que cuando se compacta con humedades superiores a la óptima la resistencia desciende bruscamente.

1.6.3.9. CARACTERISTICAS DEL EQUIPO DE COMPACTACIÓN ESTANDAR Y MODIFICADO

Actualmente existen muchos métodos para reproducir, al menos teóricamente, en laboratorio las condiciones dadas de compactación en terreno. El mas empleado, actualmente, es la denominada prueba Proctor modificado en el que se aplica mayor energía de compactación que el estándar siendo el que esta mas de acuerdo con las solicitaciones que las modernas estructuras imponen al suelo. Todos ellos consisten en compactar el suelo, con condiciones variables que se especifican a continuación:

Tabla - 13

Especificaciones de pruebas en laboratorio

Método Proctor	N	Tamaño molde (cm)	Volumen molde (cm)	Pisón (kg)	Nº Capas	Altura caída (cm)	Nº Golpes	Energía compac. / volumen (kg*m/m3)
ESTÁNDAR	1	11.64*10.16	943.33	2.49	3	30.48	25	60.500
ESTÁNDAR	2	11.64*15.24	2123.03	2.49	3	30.48	55	60.500
MODIFICADO	3	11.64*10.16	943.33	4.54	5	45.72	25	275.275
MODIFICADO	4	11.64*15.24	2123.03	4.54	5	45.72	55	275.275

3w2

1.7. AJUSTE DE CURVAS Y MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

1.7.1. AJUSTE DE CURVAS Y EL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

1.7.1.1 RELACIONES ENTRE VARIABLES

En la práctica encontramos a menudo que existen relaciones entre dos (o más) variables. Por ejemplo, los pesos de las personas dependen en cierta medida de sus alturas, las circunferencias de los círculos dependen de los radios, y la presión de una masa de gas dada depende de su volumen y de su temperatura.

Suele ser deseable expresar tales relaciones en forma matemática determinando una ecuación que conecte a las variables.

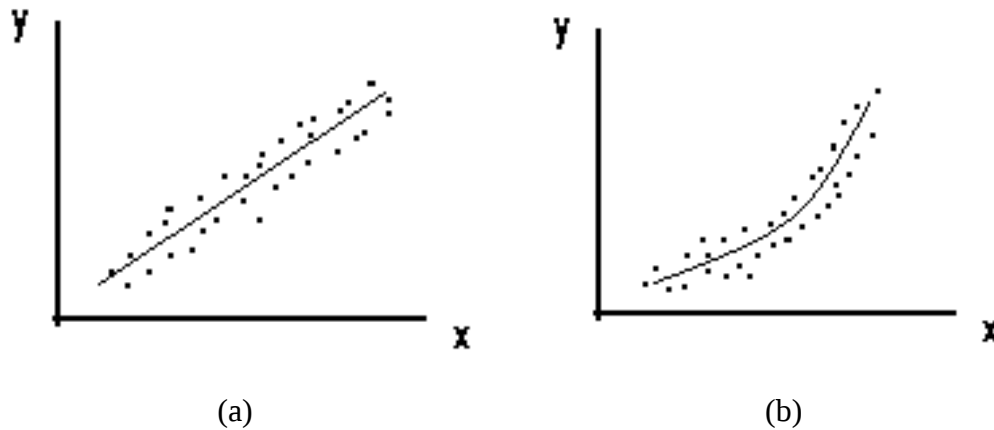
1.7.1.2. AJUSTE DE CURVAS

Para hallar una ecuación que relacione las variables, el primer paso es recoger datos que muestren valores correspondientes de las variables bajo consideración. Así por ejemplo, supongamos que X e Y denotan, respectivamente, la altura y el peso de personas adultas; entonces una muestra de N individuos revelaría las alturas $X_1, X_2, \dots, X_n$ y los pesos correspondientes $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$.

El próximo paso es marcar los puntos $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ sobre un sistema de coordenadas rectangulares. El conjunto de puntos resultante se llama a veces un diagrama de dispersión.

A partir del diagrama de dispersión es posible, con frecuencia visualizar una curva suave que aproxima los datos. Tal curva se llama una curva aproximante. En la Figura VIII-1(a) por ejemplo, los datos parecen aproximarse bien a una línea recta, y decimos que hay una relación lineal entre las variables. En la Figura VIII-1(b), sin embargo, aunque existe una relación entre las variables, no es lineal, y se dice que es una relación no lineal.

Figura - 13
Diagrama de dispersión



El problema general de hallar ecuaciones de curvas aproximantes que se ajusten a un conjunto de datos se llama ajuste de curvas.

1.7.2. ECUACIONES DE CURVAS APROXIMANTES

Varios tipos comunes de curvas aproximantes y sus ecuaciones se presentan en la lista adjunta para facilitar posteriores referencias. Todas las letras excepto X e Y representan constantes. Las variables X e Y se llaman variable independiente y dependiente, respectivamente, aunque estos papeles se pueden intercambiar.

- Línea recta

$$Y = a_0 + a_1x \quad 1$$

- Parábola o curva cuadrática

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 \quad 2$$

- Curva cúbica

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 \quad 3$$

- Curva cuadrática

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3 + a_4x^4 \quad 4$$

- Curva de grado (n)

$$Y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n \quad 5$$

Los lados derechos de las ecuaciones anteriores se llaman polinomios de grado uno, dos, tres, cuatro y n, respectivamente. Las funciones definidas por las cuatro primeras ecuaciones se llaman a veces funciones lineal, cuadrática, cúbica y cuártica, respectivamente.

He aquí algunas otras de las muchas ecuaciones que se utilizan frecuentemente en la práctica:

- Hipérbola

$$Y = \frac{1}{a_0 + a_1x} \quad \text{o} \quad \frac{1}{y} = a_0 + a_1x \quad 6$$

- Curva exponencial

$$Y = ab^x \quad 7$$

- Curva geométrica

$$Y = ax^b \quad 8$$

- Curva exponencial modificada

$$Y = ab^x + g \quad 9$$

- Curva geométrica modificada

$$Y = ax^b + g \quad 10$$

- Curva de Gompertz

$$Y = pq^{b^x} \quad 11$$

- Curva de Gompertz modificada

$$Y = pq^{b^x} + h \quad 12$$

Para decidir qué curva usar, es útil obtener diagramas de dispersión de variables transformadas. Por ejemplo, si un diagrama de dispersión de $\log Y$ versus X indica una relación lineal, la ecuación tiene la forma (7), mientras que si $\log Y$ versus $\log X$ es lineal, la ecuación tiene la forma (8).

1.7.2.1 AJUSTE DE CURVAS A MANO

A menudo puede recurrirse a la intuición personal a la hora de dibujar una curva que ajuste un conjunto de datos. Esto se conoce como método de ajuste de curvas a mano. Si el tipo de ecuación de esa curva es conocido, es posible obtener las constantes de la ecuación eligiendo tantos puntos de la curva como constantes haya en la ecuación. Por ejemplo, si la curva es una recta, son necesarios dos puntos; si es una parábola, son precisos tres puntos. El método tiene la desventaja de que diferentes observadores obtendrán distintas curvas y ecuaciones.

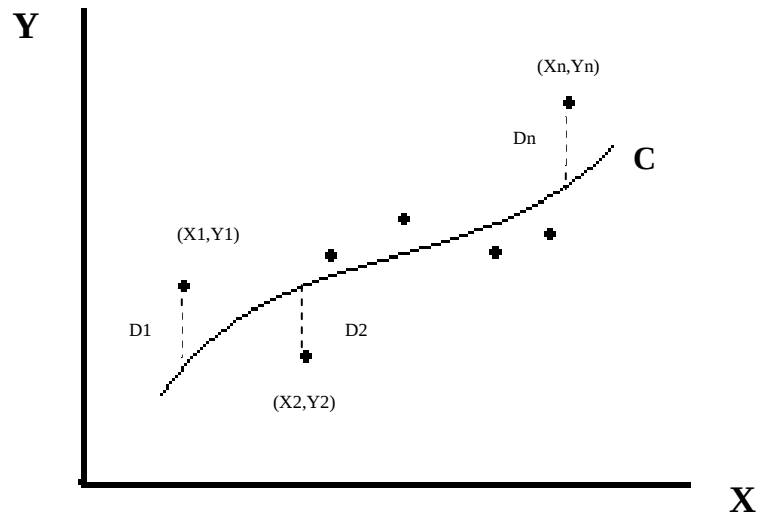
1.7.2.2. EL MÉTODO DE MÍNIMOS CUADRADOS

Para evitar juicios subjetivos al construir rectas, parábolas, u otras curvas aproximantes de ajuste de datos, es necesario acordar una definición de «recta de mejor ajuste», «parábola de mejor ajuste», etcétera.

Para ir hacia una tal definición, consideremos la Figura VII-2, en la cual los puntos dato vienen dados por $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$. Para un valor dado de X , digamos X_1 habrá una diferencia entre el valor Y_1 y el correspondiente valor deducido de la curva C . Como enseña la figura, denotamos esta diferencia por D_1 que se llama

a veces desviación, error o residual, y puede ser positiva, negativa o nula. Análogamente, asociadas a los datos $X_2, \dots, X_n$ se obtienen desviaciones $D_2, \dots, D_n$

Figura - 13



Una medida de la «bondad del ajuste» de la curva **C** a los datos dados viene proporcionada por la cantidad $(D1)^2 + (D2)^2 + \dots + (Dn)^2$. Si es pequeña, el ajuste es bueno; si es grande, el ajuste es malo. Hacemos, por tanto, la siguiente

Definición. De todas las curvas que aproximan un conjunto dado de datos, la que tiene la propiedad de que $(D1)^2 + (D2)^2 + \dots + (Dn)^2$ es mínimo se llama una curva de ajuste óptimo.

Una tal curva se dice que ajusta los datos en el sentido de mínimos cuadrados y se llama una curva de mínimos cuadrados. Así pues, una recta con esa propiedad se llama recta de mínimos cuadrados, una parábola con esa propiedad se llama parábola de mínimos cuadrados, etc.

Es habitual emplear la definición precedente cuando X es la variable independiente e Y la dependiente. Si la variable dependiente, es X , la definición se modifica considerando desviaciones horizontales en lugar de verticales, lo que viene a ser como intercambiar los ejes X e Y . Estas dos definiciones conducen, en general, a curvas distintas de mínimos cuadrados. Salvo que se especifique lo contrario, consideraremos a Y como la variable dependiente y a X como la independiente.

Es posible definir otras curvas de mínimos cuadrados considerando distancias perpendiculares desde cada uno de los puntos a la curva, en vez de distancias verticales u horizontales, pero no son de uso común.

1.7.2.2.1 LA RECTA DE MÍNIMOS CUADRADOS

La recta de mínimos cuadrados que aproxima el conjunto de puntos $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ tiene por ecuación

$$Y = a_0 + a_1 X \quad 13$$

Donde las constantes a_0 y a_1 quedan fijadas al resolver simultáneamente las ecuaciones

$$\begin{aligned} Y &= a_0 N + a_1 \sum x \\ \sum XY &= a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 \end{aligned} \quad 14$$

1.7.2.2.2. LA PARÁBOLA DE MÍNIMOS CUADRADOS

La parábola de mínimos cuadrados que aproxima el conjunto de puntos $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2), \dots, (X_n, Y_n)$ tiene ecuación dada por:

$$Y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 \quad 15$$

Donde las constantes a_0 , a_1 , y a_2 se determinan al resolver simultáneamente las ecuaciones:

$$\begin{aligned}\sum Y &= a_0 N + a_1 \sum x + a_2 \sum x^2 \\ \sum XY &= a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 + a_2 \sum x^3 \\ \sum X^2 Y &= a_0 \sum x^2 + a_1 \sum x^3 + a_2 \sum x^4\end{aligned}\quad 16$$

Llamadas ecuaciones normales de la parábola de mínimos cuadrados (15).

Las ecuaciones (16) se recuerdan fácilmente observando que se pueden obtener formalmente multiplicando (22) por 1, X y X^2 , respectivamente, y sumando en ambos lados de las ecuaciones resultantes. Esta técnica puede extenderse para obtener ecuaciones normales para curvas cúbicas de mínimos cuadrados curvas cuárticas de mínimos cuadrados, y en general cualquiera de las curvas de mínimos cuadrados correspondientes a la ecuación (5).

1.7.3. REGRESIÓN

A menudo deseamos estimar, basados en datos de una muestra, el valor de una variable Y correspondiente a un valor dado de la variable X . Ello se puede hacer estimando el valor de Y mediante una curva de mínimos cuadrados que ajuste los datos. La curva resultante se llama una curva de regresión de Y sobre X , ya que Y se estima a partir de X .

Si queremos estimar el valor de X a partir de un valor dado de Y , hemos de usar una curva de regresión de X sobre Y , que viene a ser un intercambio de las variables en el diagrama de dispersión de modo que X sea la variable dependiente e Y la independiente. Eso equivale a sustituir las desviaciones verticales en la definición de la curva de mínimos cuadrados desviaciones horizontales.

En general, la recta o curva de regresión de Y sobre X no es la misma que la de X sobre Y.

1.7.3.1. PROBLEMAS EN MAS DE DOS VARIABLES

Los problemas que involucran a más de dos variables pueden tratarse de manera análoga a los de dos variables. Por ejemplo, puede haber una relación entre tres variables X, Y y Z descrita por la ecuación

$$Z = a_0 + a_1x + a_2y \quad 17$$

Que se llama ecuación lineal en las variables X, Y y Z

En un sistema de coordenadas rectangulares tridimensional esa ecuación representa un plano, y los puntos (X_1, Y_1, Z_1) , (X_2, Y_2, Z_2) , ..., (X_n, Y_n, Z_n) de la muestra pueden «dispersarse» no lejos de ese plano, que se llama un plano aproximante.

Por extensión del método de mínimos cuadrados, podemos hablar de un plano de mínimos cuadrados que aproxima los datos. Si estamos estimando Z a partir de valores de X e Y, se le llama un plano de regresión de Z sobre X e Y. Las ecuaciones normales correspondientes al plano de mínimos cuadrados (17) vienen dadas por:

$$\begin{aligned} \sum Z &= a_0N + a_1\sum x + a_2\sum y \\ \sum XZ &= a_0\sum x + a_1\sum x^2 + a_2\sum yx \\ \sum ZY &= a_0\sum y + a_1\sum xy + a_2\sum y^2 \end{aligned} \quad 18$$

y se pueden memorizar como obtenidas de (17) multiplicándola por 1, X, Y sucesivamente, y sumando después.

Cabe considerar también ecuaciones más complicadas que (17), que representan superficies de regresión. Si el número de variables es mayor que tres, se pierde la intuición geométrica ya que se requieren espacios de 4, 5, dimensiones.

Los problemas de estimación de una variable a partir de dos o más variables se llaman problemas de regresión múltiple.

1.8. TEORÍA DE LA CORRELACIÓN

1.8.1. CORRELACIÓN Y REGRESIÓN

En el anterior capítulo del trabajo de tesis hemos considerado el problema de la regresión o estimación de una variable (la variable dependiente) de una o más variables relacionadas (las variables independientes). En este capítulo tratamos el problema cercano de la correlación, o grado de interconexión entre variables, que intenta determinar con qué precisión describe o explica relación entre variables una ecuación lineal o de cualquier otro tipo.

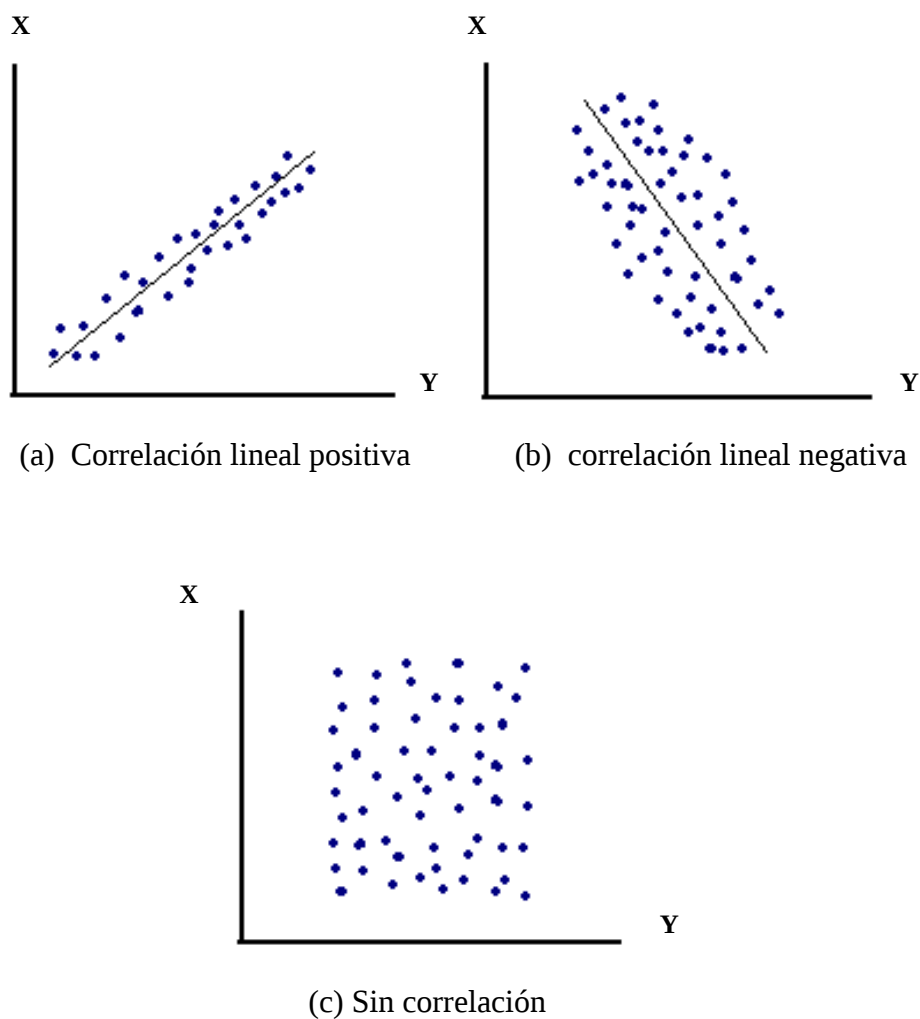
Si todos los valores de las variables satisfacen una ecuación exactamente, decimos que las variables están perfectamente correlacionadas o que hay correlación perfecta entre ellas. Así, las circunferencias C y los radios r de todos los círculos están perfectamente correlacionados porque $C = 2\pi r$. Si se lanzan dos dados 100 veces, no hay relación entre las puntuaciones de ambos dados (a menos que estén trucados) es decir, no están en correlación. Variables tales como el peso y la altura de las personas tienen una cierta correlación.

Cuando sólo están en juego dos variables, hablamos de correlación simple y regresión simple. En otro caso, se habla de correlación múltiple y regresión múltiple.

1.8.2 CORRELACIÓN LINEAL

Si X e Y son las dos variables en cuestión, un diagrama de dispersión muestra la localización de los puntos (X, Y) sobre un sistema rectangular de coordenadas. Si todos los puntos del diagrama de dispersión parecen estar en una recta, como en las Figuras IX-1(a) y IX-1(b), la correlación se llama lineal. En tales casos, como ya hemos visto en el Capítulo anterior, una ecuación lineal es adecuada a efectos de regresión (o estimación).

Figura - 14
Diagramas de dispersión



Si Y tiende a crecer cuando X crece, como en la Figura IX-1(a), la correlación se dice positiva, o directa. Si Y tiende a decrecer cuando X crece, como en la Figura IX-1(b), la correlación se dice negativa, o inversa.

Si todos los puntos parecen estar sobre una cierta curva, la correlación se llama no lineal, y una ecuación no lineal será apropiada para la regresión. Es claro que la correlación no lineal puede ser positiva o negativa.

Si no hay relación entre las variables, como en la Figura IX-1(c), decimos que no hay correlación entre ellas.

1.8.2.1 MEDIDAS DE CORRELACIÓN

Podemos determinar de forma cualitativa con qué precisión describe una curva dada la relación entre variables por observación directa del propio diagrama de dispersión. Por ejemplo, se ve que una recta es mucho más conveniente para describir la relación entre X e Y para los datos de la Figura IX-1(a) que para los de la Figura IX-1(b), porque hay menos dispersión relativa a la recta en la Figura IX-1(a).

1.8.2.3. LA RECTA DE REGRESIÓN DE MÍNIMOS CUADRADOS

Consideremos primero el problema de ver con qué calidad explica una recta la relación entre dos variables. Para ello, necesitaremos las ecuaciones de la recta de regresión de mínimos cuadrados. Tal como vimos, la recta de regresión de mínimos cuadrados de Y sobre X es

$$Y = a_0 + a_1 x \quad 1$$

Donde las constantes a_0 y a_1 quedan fijadas al resolver simultáneamente las ecuaciones

$$\begin{aligned} Y &= a_0 N + a_1 \sum x \\ \sum XY &= a_0 \sum x + a_1 \sum x^2 \end{aligned} \quad 2$$

1.8.2.4. ERROR TÍPICO DE ESTIMACIÓN

Si denotamos por Y_{est} el valor de Y para valores dados de X , tal como se estima a partir de la ecuación (1), una medida de la dispersión respecto de la recta de regresión de Y sobre X viene proporcionada por la cantidad

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (y - y_{est.})^2}{N}} \quad 3$$

Que se llama el error típico de estimación de Y sobre X .- esta misma ecuación se puede formular de la siguiente manera:

$$S_{y,x}^2 = \frac{\sum y^2 - a_0 \sum y - a_1 \sum xy}{N} \quad 4$$

Que puede ser más conveniente para el cálculo.

1.8.2.5. VARIACIÓN EXPLICADA Y VARIACIÓN INEXPLICADA

La variación total de Y se define como $\sum (y - \bar{y})^2$: esto es, la suma de los cuadrados de las desviaciones de los valores de Y respecto de la media Y , eso se puede escribir.

$$\sum (y - \bar{y})^2 = \sum (y - y_{est})^2 + \sum (y_{est} - \bar{y})^2 \quad 5$$

El primer término de la derecha en la ecuación (5) se llama la variación explicada, mientras que el segundo se llama la variación inexplicada (porque las desviaciones

$(y_{est} - \bar{y})$ tienen un esquema definido mientras las desviaciones $(y - y_{est})$ se comportan de modo caótico, impredecible

1.8.2.6. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN

El coeficiente entre la variación explicada y la variación total se llama coeficiente de determinación. Si la variación explicada es cero (o sea, toda la variación es variación inexplicada), ese cociente es 0. Si la variación inexplicada es cero (o sea, toda la variación es explicada), el cociente es 1. En los demás casos, está entre 0 y 1. Como nunca es negativo, denotaremos ese cociente por r . La cantidad r , llamada coeficiente de correlación, viene dada por:

$$r = \pm \sqrt{\frac{\text{var iacion} - \text{exp licada}}{\text{var acion} - \text{total}}} = \pm \sqrt{\frac{\sum (y_{est} - \bar{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2}} \quad 6$$

Este coeficiente varía entre -1 y +1. Se usan los signos + y - para las correlaciones positivas y negativas, respectivamente. Nótese que r es una cantidad adimensional, es decir, no depende de las unidades empleadas

Usando las ecuaciones (3) y (5) se puede escribir independiente mente del signo como:

$$r = \sqrt{1 - \frac{s_{y,x}^2}{s_y^2}} \quad \text{ó sea} \quad s_{y,x} = s_y \sqrt{1 - r^2} \quad 6$$

La formula 6 se la puede escribir en la forma equivalente, como una formula corta de calculo

$$r = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad 7$$

Hay que insistir en que en todo caso el valor calculado de r mide el grado de relación con referencia al tipo de ecuación que se adopta. Así pues, si se supone una ecuación lineal y dan un valor de r próximo a cero, eso significa que no hay apenas correlación lineal entre las variables. No obstante, no quiere decir que no haya correlación en absoluto, pues puede haber una fuerte correlación no lineal entre ellas. En otras palabras, el coeficiente de correlación mide la bondad del ajuste.

Hemos de hacer constar que un coeficiente de correlación alto (o sea, cercano a 1 ó -1) no indica necesariamente una dependencia directa de las variables. Puede haber una alta correlación entre el número de libros publicados cada año y el número de tormentas cada año. Tales ejemplos constituyen lo que se llama correlaciones sin sentido.

1.8.3 CORRELACIÓN MÚLTIPLE

El grado de correlación existente entre tres o más variables se llama correlación múltiple. Los principios fundamentales implicados en los problemas de correlación múltiple son análogos a los de la correlación simple, tratados anteriormente.

Notación de subíndices

Para permitir generalizaciones a números grandes de variables, conviene adoptar una notación de subíndices.

Denotaremos por $X_1, X_2, X_3, \dots$ las variables bajo consideración. Entonces denotaremos por $X_{11}, X_{12}, X_{13}, \dots$ los valores que toma la variable X_1 , y $X_{21}, X_{22}, X_{23}, \dots$ los que toma la

variable X_2 . Con esta notación, una suma tal como $X_{21}+X_{22}+X_{23}..... X_{2n}$ se escribirá $\sum X$.

1.8.3.1 ECUACIONES DE REGRESIÓN Y PLANOS DE REGRESIÓN

Una ecuación de regresión es una ecuación para estimar una variable dependiente, digamos X_1 a partir de las variables independientes $X_2, X_3 ..$ y se llama una ecuación de regresión de X_1 sobre $X_2, X_3...$

Para el caso de tres variables, la ecuación de regresión más simple de X_1 sobre X_2 y X_3 , tiene la forma:

$$x_1 = b_{1.23} + b_{12.3}x_2 + b_{13.2}x_3 \quad 8$$

La ecuación (8) se llama una ecuación de regresión lineal de X_1 sobre X_2 y X_3 . En un sistema rectangular tridimensional de coordenadas representa un plano llamado plano de regresión.

1.8.3.2. ECUACIONES NORMALES PARA EL PLANO DE REGRESIÓN DE MÍNIMOS CUADRADOS

Así como existen rectas de regresión de mínimos cuadrados que aproximan un conjunto de N puntos dato (X,Y) en un diagrama de dispersión, existen también planos de regresión de mínimos cuadrados que ajustan un conjunto de N puntos dato (X_1, X_2, X_3) en un diagrama de dispersión tridimensional.

El plano de regresión de mínimos cuadrados de X_1 sobre X_2 y X_3 tiene ecuación (8) donde $b_{1.23}$ $b_{12.3}$ y $b_{13.2}$ se determinan resolviendo simultáneamente las ecuaciones normales

$$\begin{aligned}
\sum x_1 &= b_{1.23}N + b_{12.3} \sum x_2 + b_{13.2} \sum x_3 \\
\sum x_1 x_2 &= b_{1.23}N \sum x_2 + b_{12.3} \sum x_2^2 + b_{13.2} \sum x_3 x_2 \\
\sum x_1 x_3 &= b_{1.23}N \sum x_3 + b_{12.3} \sum x_2 x_3 + b_{13.2} \sum x_3^2
\end{aligned}
\tag{9}$$

1.8.3.4. ERROR TÍPICO DE ESTIMACIÓN

Si los coeficientes de correlación entre variables X_1 y X_2 , X_1 y X_3 , y X_2 y X_3 , tal como se calculaban en correlación simple se denotan respectivamente por r_{12} , r_{13} , y r_{23} , podemos decir en términos de los coeficientes de correlación r_{12} , r_{13} , y r_{23} el error típico de estimación se puede calcular también a partir del resultado de:

$$s_{1.23} = s_1 \sqrt{\frac{1 - r_{12}^2 - r_{13}^2 - r_{23}^2 + 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}} \tag{10}$$

1.8.3.5. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN MÚLTIPLE

El coeficiente de correlación múltiple se define por extensión de la ecuación (6). En el caso de dos variables independientes, por ejemplo, el coeficiente de correlación múltiple viene dado por

$$R_{1.23} = \sqrt{1 - \frac{s_{1.23}^2}{s_1^2}} \tag{11}$$

Donde S_1 es la desviación típica de X_1 y $S_{1.23}$ viene dado por la ecuación (10). La cantidad $R^2_{1.23}$ se llama coeficiente de determinación múltiple

Cuando se usa una ecuación de regresión lineal, el coeficiente de correlación múltiple se llama coeficiente de correlación múltiple lineal. Salvo que se especifique lo contrario, siempre que nos refiramos a correlación múltiple querremos decir correlación múltiple lineal.

En términos de r_{12} , r_{13} , y r_{23} la ecuación (11) se puede expresar

$$R_{1.23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}} \quad 12$$

Un coeficiente de correlación múltiple, tal como $R_{1.23}$ está entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1, más precisa es la relación lineal entre las variables. Cuanto más cerca de 0, peor es la relación lineal. Si el coeficiente de correlación múltiple es 1, la correlación se dice perfecta. Aunque un coeficiente de correlación igual a 0 indica que no hay relación lineal entre las variables, puede haber una relación no lineal

1.8.3.6. GENERALIZACIONES A MAS DE TRES VARIABLES

Estas se obtienen por analogía con los resultados precedentes. Así, las ecuaciones de regresión lineales de X_1 sobre X_2 , X_3 y X_4 pueden escribirse:

$$x_1 = b_{1.2.3.4} + b_{12.34}x_2 + b_{13.24}x_3 + b_{14.23}x_4 \quad 13$$

Esta ecuación representa un hiperplano en el espacio de cuatro dimensiones.

2.1. MATERIALES Y METODOS DE INVESTIGACION

2.1.1. PROYECTO DE INVESTIGACIÓN SOBRE LA CORRELACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMA Y LA PLASTICIDAD DE LOS SUELOS EN LA CIUDAD DE TARIJA

Al comienzo cuando importantes razones impulsaron al autor a desarrollar esta investigación sobre la correlación entre el contenido de humedad óptima y la plasticidad de los suelos en Tarija, solamente se disponía de una escasa bibliografía referente al tema en específico.

Si bien se disponía de alguna información básica, desafortunadamente no contaban con un mecanismo el cual relacione la humedad óptima de los suelos en la ciudad de Tarija con su plasticidad, por lo general la información que existía hacía mención a propiedades de suelos que están ubicadas a miles de kilómetros con referencia a la zona de estudio, lo que conlleva a una gran diferencia y variación en las propiedades de los suelos existentes en la ciudad de Tarija. Además, sumada a toda esta situación, estaba el hecho de que no existía ningún antecedente concreto sobre la aplicación y el grado de interconexión de las propiedades, humedad y plasticidad de los suelos en el Departamento de Tarija, ya que se encontró que era muy poco lo que se había hecho en nuestra región referente al tema en estudio.

Estos inconvenientes hallados al principio obligaban al autor a encarar con los medios disponibles el estudio de un problema técnico importante, recurriendo para ello un plan de trabajo netamente empírico que fue formulado en base a la revisión de la escasa información científico - técnica leída sobre el tema.

El estudio y análisis que se realizara en el presente trabajo reflejara específicamente la características y propiedades de los suelos de la parte urbana y suburbana de la ciudad de Tarija, donde la geomorfología y geología de la zona se identifica por pertenecer a la cuenca pleistocena de Tarija ubicada en el extremo oriental de la cordillera de los Andes.

Los sedimentos pertenecientes al cuaternario, adquieren una representatividad y difusión, relleno de la depresión de la cuenca lacustre de Tarija, definida por bordes elevados de los cortes orográficos conformados por rocas antiguas ordovícicas.

Litológicamente la Formación de la zona en estudio está representada por estratos conformados por arcillas plásticas, arcillas limosas, con baja permeabilidad; continuando arenas medias y gruesas algo limosas de color marrón naranja, friables, de mala selección, de permeabilidad alta; continúan arenas finas limosas, de color marrón claro con tono amarillento, friables, mala selección, de permeabilidad media.

Por las características de los estratos de suelo que existe en zona, es que se decide realizar el presente trabajo ya que los suelos existentes son en un mayor porcentaje plásticos.

El método experimental propuesto por el autor, consiste primeramente en la obtención de las propiedades de los suelos mediante ensayos convencionales (granulometría, límites de plasticidad y compactación T-180), realizados con un equipo básico disponible en cualquier laboratorio de suelos común. En segundo lugar, debía adoptar un criterio de diseño para definir el grano de interconexión que existiese entre las propiedades de los suelos que se determinaron.

En resumen, el esquema de estudio planteado, consiste realizar una investigación y análisis del grado de interconexión o correlación empírica que existe entre la Humedad óptima determinada mediante ensayo de compactación T-180 y los límites de plasticidad (límite líquido, límite plástico) de los suelos, considerando como zona de estudio la ciudad de Tarija.

Al principio hubo algunos inconvenientes para encaminar el estudio debido a la falta de información sobre la investigación y al tiempo que conlleva obtener los datos o propiedades que se necesitan para la ejecución de la tesis.

posteriormente con el desarrollo de la investigación se pudo indagar más profundamente sobre el tema, hasta lograr obtener más información sobre las propiedades y ensayos de laboratorio ya determinados con anterioridad por diferentes instituciones públicas y privadas del medio, lo que facilitó la elaboración del trabajo, ya que con la información encontrada y la determinada o calculado se pudo establecer un banco de datos de las propiedades de los suelos que nos interesaba para la realización del trabajo.

En el proceso de elaboración de la tesis, se pudo conocer varias herramientas las cuales nos ayudaron a realizar un mejor y óptimo trabajo, una de las más importantes fue la obtención de software el cual nos ayudó a determinar y definir una interconexión más precisa entre las propiedades en estudio, con la utilización de los paquetes encontrados se pudo realizar la comparación de resultados, medir la bondad del diseño propuesto, etc.

2.1.2. MATERIALES Y METODOS DE INVESTIGACION PARA DETERMINAR EL GRADO DE INTERCONEXION ENTRE LA HUMEDAD OPTIMA Y PLASTICIDAD DE LOS SUELOS

Como se indicó anteriormente, en este capítulo de la tesis se describen las bases de un estudio minucioso desarrollado en laboratorio para determinar las propiedades de plasticidad y contenido óptimo de humedad en un suelo.

Los métodos de investigación aquí empleados, se aplican a diferentes muestras de suelo de la ciudad de Tarija que tenga características o un comportamiento plástico. Los resultados obtenidos de la caracterización física y mecánica, permitirá al autor comprobar la variación de las propiedades de los diferentes tipos de suelos existentes en la zona

Debemos aclarar en principio, que durante el desarrollo del presente estudio, se determino un gran número de ensayos de manera personal por el tesista, en el laboratorio de la Universidad Juan Misael Saracho, pero por la cantidad de ensayos que se requería y el tiempo que conlleva realizar cada uno de estos se opto por realizar la recopilación de datos de estos ensayos en diferentes laboratorios de la ciudad, trabajos o estudios realizados los cuales contaban con los ensayos requeridos, para la elaboración de este trabajo de tesis.

Los materiales y métodos empleados para conseguir los objetivos y metas trazadas inicialmente, en el presente trabajo de tesis, consisten en realizar y resolver las siguientes actividades:

1. Obtención de muestras de suelo existentes en la zona en estudio
2. Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos las cuales nos coadyuvaran en la elaboración del trabajo.
3. Estudio, análisis y clasificación de las propiedades de suelos obtenidas mediante los ensayos de laboratorios (límite líquido, límite plástico, granulometría y Proctor modificado T-180)
4. Definir los grupos y clases de suelos que son tomados en cuenta en el trabajo de tesis
5. Determinación del grado de interconexión entre las propiedades de plasticidad y contenido de humedad optimo del suelo
6. verificación del modelo asumido el cual establece el grado de interconexión entre las variables definidas.

2.1.2.1. FASE 1: OBTENCIÓN DE MUESTRAS DE SUELO EXISTENTE EN LA ZONA EN ESTUDIO

Por las características geológicas en la que esta asentada la ciudad de Tarija, y en función a los estudios realizados en zona, la obtención de las muestras se lo realizo

considerando la zonificación de la ciudad en función a clasificación y capacidad admisible del suelo ya existente (trabajo de tesis existente).

Como se menciona anteriormente el área urbana de la ciudad se encuentra asentada sobre el periodo cuaternario, periodo que cuenta en su estructura con los sedimentos aluviales, fluviales y lacustres; aflorando en algunos lugares de la ciudad estratos pertenecientes al periodo Ordovícico, siendo estos muy pocos por ejemplo podemos citar la zona donde se ubica la iglesia de San Juan el resto de la ciudad se constituyen de terrazas cuaternarias lacustre en su gran mayoría

En base a esta zonificación se encaro y planifico la exploración y muestreo de suelo en la ejecución del trabajo de tesis.

En la zonificación realizada en la ciudad de Tarija en función al tipo de suelo se puede evidenciar la presencia de una gran variedad de suelos, pero por la características geológicas explicadas anteriormente, en la zona en estudio existe en mayor porcentaje cuatro tipos de suelo que son predominantes en la zona, lo cual fue comprobado por los ensayos de laboratorio realizado por el tesista.

Considerando lo mencionado anteriormente y con el interés de dar mayor precisión y efectividad al trabajo de tesis, se considero en la elaboración del presente trabajo las cuatro clases de suelo existentes en mayor porcentaje.

También se tomo en cuenta para definir las clases de suelos que formaran parte de la investigación, suelos que tengan propiedades de plasticidad, ya que la plasticidad es una limitante que deben tener los suelos para poder ser utilizar en el trabajo planteado.

2.1.2.2. FASE 2: DETERMINACIÓN DE LA PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.

La importancia de disponer de una base de datos de las diferentes propiedades de los suelos, es imprescindible ya que mediante estos se pueda realizar la comparación o estimación de los resultados obtenidos mediante ensayos minuciosos de laboratorio.

Una de las propiedades necesarias y que se requieren conocer con mayor frecuencia en el campo de la ingeniería civil es la determinación del contenido óptimo de húmeda del suelo con la cual se logra la máxima densidad seca, esto debido a que los suelos al compactarse a un contenido de humedad óptimo mejoran sus propiedades mecánicas y optimizan su aplicabilidad en la ingeniería civil.

En la actualidad en nuestro medio no se cuenta con un registro o una base de datos del contenido de humedad óptimo de los diferentes suelos existentes en la ciudad de Tarija, los cuales nos puedan proporcionar una ayuda para poder estimar o aproximarnos a valores mas certeros y adecuados para su utilización o también estos valores sean usados de manera comparativa con los ensayos que se determinen en laboratorio.

- Análisis Granulométrico de todas las muestras de suelo.
- Determinación de los límites de plasticidad “límite líquido, límite plástico”.
- Compactación mediante Proctor estándar modificado T-180

Para la caracterización de los materiales los ensayos que deben ejecutarse a cada una de las muestras se indican en la siguiente tabla X-1

El equipo de laboratorio utilizado para la ejecución de cada uno de los ensayos, son aquellos comunes o usuales de cualquier laboratorio de suelos. Asimismo, los ensayos empleados son los convencionales, ya que se ejecutan de acuerdo a sus correspondientes normas ASTM (American Society Testing for Materials);

Tabla - 14
Pruebas para la caracterización del suelo

Propiedad analizada	Tipo de ensayo o prueba	Norma o especificación
Granulometría	Ensayo del porcentaje que pasa el tamiz N°10, N°40 y N°200. Método del lavado.	ASTM D1140-54 ASTM D421-58
Plasticidad	Ensayo de límite líquido Ensayo de límite plástico e índice plástico	ASTM D423-66 ASTM D424-59
Compactación	Ensayo de compactación Proctor Modificado	ASTM D1557-70

Los ensayos de laboratorio citados anterior mente se realizo a cada una de las muestras de suelo utilizadas en el trabajo de tesis, logrando con esto establecer un banco de datos significativo de cada una de las propiedades establecidas las cuales mencionamos a continuación.

- Obtención de la distribución granulométrica por tamaños de las muestras de suelos analizadas
- Se determino el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se considera como un material no plástico (límite plástico)
- Se determino el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico (límite Líquido)
- Se determino el contenido óptimo de humedad con el cual se logra obtener la máxima densidad seca del suelo.

Como se hizo conocer anterior mente la obtención de cada una de las propiedades mencionadas, fueron determinadas en un porcentaje considerable por el tesista, y lo restante fue obtenido de trabajos ya establecidos y realizados con anterioridad.

Una vez establecidos el numero de datos necesarios para realizar el análisis y estudio de los mismos se procedido a realizar un trabajo netamente de gabinete el cual se explicara en la próxima fase.

2.1.2.3. FASE 3: ESTUDIO, ANÁLISIS Y CLASIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE SUELOS OBTENIDAS MEDIANTE LOS ENSAYOS DE LABORATORIOS

En esta fase del trabajo de tesis donde ya se determino todas las propiedades necesarias para realizar un trabajo netamente de gabinete se procede a generar un ordenamiento y clasificación de los datos obtenidos, cumpliendo las especificaciones y normas establecidas para cada ensayo.

Los pasos que se siguen en la clasificación y ordenamiento del trabajo son los siguientes:

1º PASO

Con los ensayos de laboratorio en los cuales se obtienen la distribución granulométrica de los suelos se procede a determinar y graficar la curva granulométrica de los suelos y en función a un análisis cuantitativo del gráfico granulométrico semilogaritmico acumulativo se procede a determinar los siguientes parámetros, tales como:

D10: tamaño máximo de las partículas que constituyen la porción 10% más fina del suelo. Recibe el nombre particular de diámetro efectivo.

D30: tamaño máximo de las partículas que constituyen la porción 30% más fina del suelo.

D60: tamaño máximo de las partículas que constituyen la porción 60% más fina del suelo.

Su obtención es muy sencilla: consiste en trazar abscisas por los porcentajes 10,30 y 60 de material pasante hasta intersectar la curva granulométrica semilogarítmica acumulativa. Los diámetros correspondientes a los puntos de intersección serán , respectivamente, D10, D30 y D60. Estos parámetros servirán para la obtención de los coeficientes de uniformidad y curvatura que definen cuantitativamente la graduación de los materiales granulares.

El coeficiente de uniformidad (C_u) es la razón por cociente entre D60 y D10. No tiene valores límites.

A medida que D60 se aleja más de D10, aumenta el coeficiente de uniformidad, lo que significa que mejora la graduación del material. Si, por el contrario, son muy parecidas, tenemos un material mal graduado cuya gráfica tiende a una línea vertical. De modo que C_u mide la mejor representación de tamaños. En arenas graduadas: $C_u > 6$, mientras que las gravas bien graduadas son aquellas en las que $C_u > 4$.

Podría ser que entre los puntos D60 y D10 el gráfico tuviera algunas sinuosidades, por lo que conviene tener una medida intermedia que es lo que persigue el coeficiente de curvatura (C_c), denominado así porque se está controlando la curvatura o rectitud del gráfico en ese intervalo.

La experiencia indica que materiales bien graduados poseen un coeficiente de curvatura fluctuante entre 1 y 3.

Determinados los parámetros citados los cuales nos proporcionan una gran ayuda para llegar a caracterizar los suelos, pero que no son suficientes para establecer una clasificación de los suelos se procede a analizar las propiedades de plasticidad, como se indica en el paso siguiente.

2º PASO

En la mecánica de suelos, se creyó en los comienzos de la investigación de las propiedades de los suelos dependían directamente de la distribución de las partículas constituyentes según sus tamaños; e incluso en la actualidad se piensa que es posible deducir las propiedades mecánicas de los suelos a partir de su distribución granulométrica o descripción por tamaños. Solamente en suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de lo referente a las propiedades físicas del material

La plasticidad es, en este sentido, una propiedad tan evidente que ha servido hace mucho tiempo atrás para clasificar suelos en forma puramente descriptiva. Pronto se reconoció que existía una relación específica entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas. En ese momento la plasticidad se convirtió en una propiedad ingenieril de interés científico, dejando de ser una cualidad puramente descriptiva

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios, de los cuales uno solo, el debido a Atterberg, se mencionará en lo que sigue. Atterberg hizo ver que, en primer lugar, la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente.

Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg.

1. Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.
2. Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.

3. Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente.
4. Estado semisólido, en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aún disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
5. Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Los anteriores estados son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando y no existen criterios estrictos para distinguir sus fronteras. El establecimiento de éstas ha de hacerse en forma puramente convencional. Atterberg estableció las primeras convenciones para ello, bajo el nombre general de límites de consistencia

La frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamada *límite líquido*, nombre que hoy se conserva. Se definió en términos de una cierta técnica de laboratorio que consistía en colocar el suelo remoldeado en un cápsula, formando en él una ranura y en hacer cerrar la ranura golpeando secamente la cápsula contra una superficie dura; el suelo tenía el contenido de agua correspondiente al límite líquido, cuando los bordes inferiores de la ranura se tocaban, sin mezclarse, al cabo de un cierto número de golpes.

La frontera convencional entre los estados plástico y semisólido fue llamada *límite plástico* y definida también en términos de una manipulación de laboratorio. En este caso se rolaba un fragmento de suelo hasta convertirlo en un cilindro de espesor no especificado; el agrietamiento y desmoronamiento del rollito, en un cierto momento, indicaba que se había alcanzado el límite plástico y el contenido de agua en tal momento era la frontera deseada

A las fronteras anteriores, que definen el intervalo plástico del suelo se les ha llamado límites de plasticidad.

En la elaboración de trabajo se determino las fronteras convencionales citadas en base a los ensayos de laboratorio ya explicados en el capítulo IV, una vez establecidos

estas propiedades “límite líquido y límite plástico” se procede a determinar el índice de plasticidad.

El índice de plasticidad (IP) numéricamente es la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), El cual nos indica la magnitud del campo plástico del material analizado. Esto significa que un índice plástico elevado indicará mayor plasticidad del suelo.

Una vez determinada estas propiedades de plasticidad, y en función las características granulométricas ya establecidas en la anterior fase se procede a realizar la clasificación de los suelos en función a los sistemas Unificado de clasificación de suelos y el sistema AASHTO.

3º PASO

Para la clasificación de los suelos en el presente trabajo se llega a considerar dos sistemas de clasificación los cuales son los más utilizados en nuestro medio en la elaboración de distintos trabajos en el campo de la ingeniería civil.

- Sistema unificado de clasificación de suelos
- Sistema AASHTO de clasificación de suelos.

Como se menciona en el capítulo VI el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos está basado en el Sistema de clasificación de Aeropuertos, hasta el nivel que puede decirse que es el mismo con ligeras modificaciones.

El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el cribado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera *grueso* si más del 50% de sus partículas son gruesas, y fino si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas. El procedimiento

técnico para la clasificación mediante este sistema se izó conocer en el capítulo correspondiente

La clasificación AASHTO norma describe y regula el procedimiento para la clasificación de suelos y agregados para la construcción de diferentes obras civiles, pero general mente esta fue creada para el uso en carreteras. Esta clasificación establece 7 grupos de suelos y agregados con base en la determinación en el laboratorio de la granulometría, el límite líquido y el límite plástico. Un octavo grupo corresponde a los suelos orgánicos una explicación mas detallada sobre el tema se la realizo en el capítulo VI.

Con todos los datos técnicos determinados en laboratorio los cuales son suficientes para clasificar los suelos se realiza la clasificación correspondiente con los sistemas ya definidos.

4º PASO

El propósito de los ensayos de compactación que se realizaron es para determinar la curva de compactación para la energía de compactación ya definida (Proctor Modificado). Esta curva considera en abscisas el contenido de humedad y en ordenadas la densidad seca. A partir de ella, se obtiene la humedad llamada óptima que es la que corresponde a la densidad máxima. Con estos resultados se determinaron la cantidad de agua de amasado a usar cuando se compacta el suelo en terreno para obtener la máxima densidad seca para una determinada energía de compactación.

Una vez determinados todos las densidades máximas con sus respectivas humedades óptimas de todos los suelos analizados, se procede a realizar el ordenamiento de los datos obtenidos (humedad optima y densidad máxima) en función a las diferentes clases de suelos determinados en base a los datos obtenidos en los pasos 1,2 y 3.

2.1.2.4 FASE 4: DEFINICIÓN DE LOS GRUPOS Y CLASES DE SUELOS QUE SON TOMADOS EN CUENTA EN EL TRABAJO DE TESIS

Establecidas ya todas las propiedades como la distribución granulométrica y plasticidad de los suelos, datos que nos permiten realizar una clasificación de los suelos analizados, como También determinada la humedad óptima y la densidad seca máxima, se procede a definir las clases de suelos que intervendrán en la investigación y estudio que se realiza sobre la correlación del contenido óptimo de humedad con la plasticidad de los suelos en la ciudad de Tarija.

El análisis que se realizó para definir las clases de suelo que intervendrán en la ejecución del trabajo se lo hizo considerando los siguientes puntos:

1. La investigación planteada con el trabajo de tesis, de inicio pone una condición que deben cumplir los suelos; estos deben presentar características de plasticidad, ya que esta propiedad será utilizada en la correlación que se pretende demostrar con la elaboración de trabajo
2. Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen de los materiales con los que se trabaje, y como el método que se utilizó en laboratorio para compactar y determinar el contenido de humedad óptima del suelo fue mediante impacto ósea utilizando equipo para la prueba de Proctor Modificado, y este método no es recomendable para suelos friccionantes o granulares, esta clase de suelos por las razones ya explicadas se los omitió en la ejecución del trabajo.
3. Como se hizo conocer anteriormente en la zonificación realizada en la ciudad de Tarija en función al tipo de suelo se puede evidenciar la presencia de una gran variedad de suelos, estos en porcentajes pequeños con referencia a los suelos que caracterizan una cuenca sentada en el período cuaternario, período que cuenta en su estructura con los sedimentos aluviales, fluviales y lacustres; si bien como se menciona existe en la zona en estudio diferentes tipos de

suelos para el análisis, pero por razones ya explicadas solo se considero los suelos mas predominantes.

Considerando los tres puntos mencionados anteriormente y con el interés de dar mayor precisión y efectividad al trabajo de tesis, los suelos definidos técnicamente y tomados en cuenta en la elaboración del trabajo de tesis son los siguientes: Suelos definidos según el Sistema de clasificación Asshto tenemos a Suelo A-2-4 ; Suelo A-2-6 ; Suelo A-4 ; Suelo A-6. este sistema de clasificación se toma como base para realizar la correlación entre las propiedades estudiadas.

2.1.2.5. FASE 5: DETERMINACIÓN DEL GRADO DE INTERCONEXIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES DE PLASTICIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD ÓPTIMO DEL SUELO

Una vez establecido un banco de datos de todas las propiedades necesarias para alcanzar el objetivo y metas propuestas con la elaboración de la tesis. Se procede a definir las variables que intervendrán en la investigación; como el objetivo principal del trabajo es el de realizar una investigación y análisis del grado de interconexión o correlación empírica que existe entre la Humedad optima determinada mediante ensayo de compactación T-180 y los límites de plasticidad (límite líquido, límite plástico); considerando la necesidad de conocer el contenido de humedad optimo en un menor tiempo; esto teniendo en cuenta que para realizar el mejoramiento artificial de las propiedades mecánicas de un suelo y obtener la máxima densidad seca, es necesario realizar una serie de ensayos de laboratorio complementarios que demandan un tiempo prudente y costo económico elevado en establecer estas propiedades, lo que ocasiona que las personas omitan la determinación de estos parámetros, induciendo a realizar con esto una mala ejecución de las obras civiles.

Teniendo en cuenta lo mencionado y en base a los datos de laboratorio establecidos se definen las variables que intervendrán en el estudio de la siguiente manera:

- **Variable dependiente:** como variable dependiente se define al contenido de humedad óptimo del suelo determinada mediante ensayo de compactación T-180 Proctor modificado.
- **Variables independientes:** se define como variables independientes a los límites de plasticidad, el límite líquido y límite plástico.

Hacemos notar que las muestras de todas las variables establecidas, son muestras grandes ya que el numero de datos con los que se cuenta de cada una de ellas es $N > 30$ siendo la aproximación tanto mejor mientras mayores son las muestras

Definidas ya las variables que intervendrán en el análisis se procede a realizar la comprobación del grado de interconexión que existe entre las variables establecidas siguiendo los siguientes pasos:

1º PASO

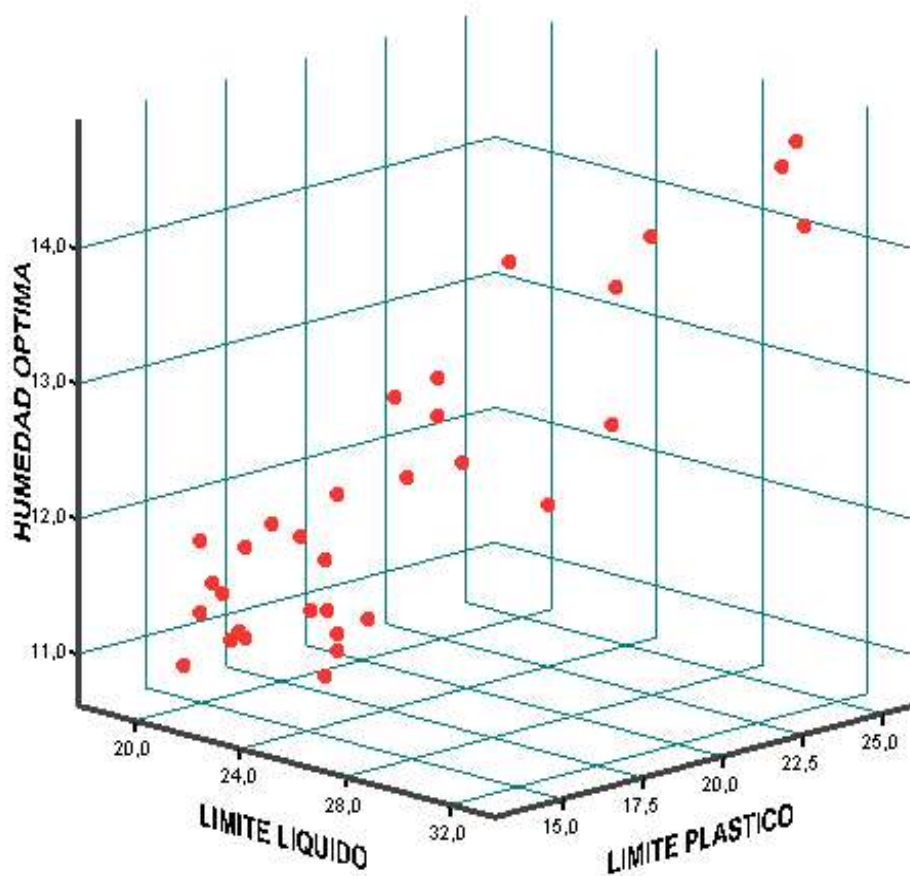
Muy a menudo se encuentra en la práctica que existe una relación entre dos o más variables, por ejemplo como en nuestro caso queremos demostrar en que medida esta relacionado el contenido optimo de humedad del suelo y los límites de plasticidad de este.

Para estudiar y medir la relación entre dos o más variables, el primer paso es recoger los datos que muestren los correspondientes valores de las variables consideradas ósea los datos correspondientes a contenido óptimo de humedad, límite líquido y límite plástico.

En todos los casos lo primero que se realiza en este tipo de análisis es representar en un grafico tridimensional los N puntos (z,x,y) donde (Z) representa el contenido de humedad optimo, (Y) límite plástico y (X) el límite líquido. El conjunto de puntos que así se obtiene se suele denominar diagrama de dispersión o mas sencillamente nube de puntos.

Por ejemplo, en la escena siguiente se puede contemplar una nube de puntos real, obtenida a partir de datos reales de los que luego hablaremos.

Figura - 15
DIAGRAMA DE DISPERSION



Con una variable dependiente y dos variables independientes, se necesita tres ejes para poder representar el correspondiente diagrama de dispersión. Si en lugar de dos variables independientes utilizaríamos tres, seria necesario un espacio de cuatro dimensiones para poder construir el diagrama de dispersión.

2º PASO

Con el diagrama de dispersión o nube de puntos, es posible frecuentemente representar una curva que se aproxime a los datos.

Tal curva se llama curva de aproximación; pero en este caso en particular cuando se cuenta con más de una variable independiente la representación grafica de las relaciones presentes en un modelo de regresión resulta poco intuitiva, muy complicada y nada útil. Es más fácil y practico partir de una ecuación del modelo de regresión múltiple.

$$x_1 = b_{1.23} + b_{12.3}x_2 + b_{13.2}x_3 \quad 1$$

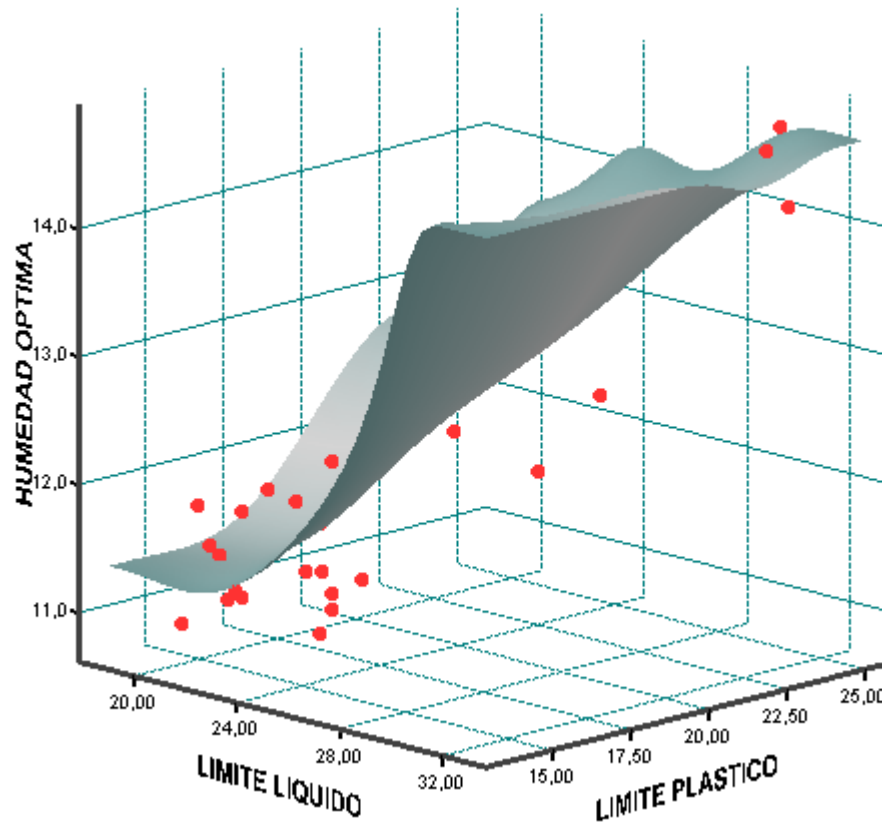
Que se llama ecuación lineal en las variables X_1 , X_2 y X_3

En un sistema de coordenadas rectangulares tridimensional esa ecuación representa un plano, y los puntos (X_{11}, X_{21}, X_{31}) , (X_{12}, X_{22}, X_{32}) , ..., (X_{1n}, X_{2n}, X_{3n}) , que se llama un plano de regresión el cual ya se estudio con detalle en los capítulos anteriores.

A continuación a partir del diagrama de dispersión y haciendo uso del programa estadístico SSPS el cual si nos da la posibilidad de realizar la representación grafica de una superficie aproximante a los puntos tridimensionales establecidos, lo cual nos permite visualizar y definir un modelo de regresión múltiple.

Esto nos permite tener más certeza y seguridad de que los puntos se ajustaran al modelo de regresión que se definirá.

Figura - 16
Superficie Aproximante



3º PASO

Así como existen rectas de regresión de mínimos cuadrados que aproximan un conjunto de N puntos dato (X,Y) en un diagrama de dispersión, existen también planos de regresión de mínimos cuadrados que ajustan un conjunto de N puntos dato (X₁,X₂,X₃) en un diagrama de dispersión tridimensional.

$$x_1 = b_{1.23} + b_{12.3}x_2 + b_{13.2}x_3 \quad 1$$

El plano de regresión de mínimos cuadrados de X₁ sobre X₂ y X₃ tiene ecuación (1) donde b_{1.23} b_{12.3} y b_{13.2} se determinan resolviendo simultáneamente las ecuaciones normales

$$\begin{aligned}
\sum x_1 &= b_{1.23}N + b_{12.3} \sum x_2 + b_{13.2} \sum x_3 \\
\sum x_1 x_2 &= b_{1.23}N \sum x_2 + b_{12.3} \sum x_2^2 + b_{13.2} \sum x_3 x_2 \\
\sum x_1 x_3 &= b_{1.23}N \sum x_3 + b_{12.3} \sum x_2 x_3 + b_{13.2} \sum x_3^2
\end{aligned}
\quad 2$$

De acuerdo con este modelo o ecuación, la variable dependiente (X_1) se interpreta como una combinación lineal de un conjunto de K variables independientes (X_k) cada una de las cuales va acompañada de un coeficiente (b_k) que indica el peso relativo de esa variable en esa ecuación e incluye también una constante (b_0).

Este modelo al igual que cualquier modelo estadístico, se basa en una serie de supuestos (linealidad, independencia, y no-colinealidad) que asimilaremos en detalle posterior mente.

4º PASO

Además de acompañar el plano con su formula, resulta útil disponer de una indicación precisa del grado en el que el plano se ajusta a la nube de puntos.

Debemos tener en cuenta que siempre resulta posible, cualquiera sea la nube de puntos obtener un plano de regresión de mínimos cuadrados, se necesita información adicional para determinar el grado de fidelidad con el plano describe la pauta de relación existente en los datos.

Para cuantificar ese mejor o peor ajuste del plano calcularemos el coeficiente de correlación (R); el valor calculado de este coeficiente nos mide la bondad de ajuste entre: la ecuación adoptada y los datos; Ósea en otras palabras mide le grado de relación con referencia al tipo de ecuación que se adopto.

Un coeficiente de correlación múltiple, tal como $R_{1.23}$ está entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1, más precisa es la relación lineal entre las variables. Cuanto más cerca de 0, peor es la relación lineal. Si el coeficiente de correlación múltiple es 1, la

correlación se dice perfecta. Aunque un coeficiente de correlación igual a 0 indica que no hay relación lineal entre las variables, puede haber una relación no lineal

Para el cálculo de este coeficiente en términos de r_{12} , r_{13} , y r_{23} la ecuación se puede expresar:

$$R_{1.23} = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2r_{12}r_{13}r_{23}}{1 - r_{23}^2}} \quad 3$$

Una medida de ajuste que a recibido gran aceptación en el contexto de análisis de regresión es el **coeficiente de determinación** R^2 el cuadrado del coeficiente de correlación múltiple. Se trata de una medida estandarizada que toma valores entre 0 y 1 (0 cuando las variables son independientes y 1 cuando entre ellas existe relación perfecta).

Este coeficiente posee un interpretación muy intuitiva representa el grado de ganancia que podemos obtener al predecir una variable basándonos en el conocimiento que tenemos de otra u otras variables.

Realizados todos los pasos mencionados que se siguen para determinar el grado de interconexión entre las propiedades de humedad óptima, límite plástico y límite líquido de los suelos, y calculados todos los datos técnicos necesarios, se procede a verificar el modelo asumido. Nos referimos a una serie de condiciones que deben darse para garantizar la validez del modelo.

2.1.2.6. FASE 6: VERIFICACIÓN DEL MODELO ASUMIDO EL CUAL ESTABLECE EL GRADO DE INTERCONEXIÓN ENTRE LAS VARIABLES DEFINIDAS

Los supuestos del modelo estadístico asumido se refieren a una serie de condiciones que deben darse para garantizar la validez del modelo. Al efectuar aplicaciones

prácticas del modelo de regresión, nos veremos en la necesidad de examinar muchos de estos supuestos o condiciones.

1. **Linealidad:** La ecuación de regresión adopta una forma particular. En concreto, la variable dependiente es la suma de un conjunto de elementos: el origen de la recta, una combinación lineal de variables independientes o predictoras. El incumplimiento del supuesto de linealidad suele denominarse error de especificación. Algunos ejemplos son: omisión de variables independientes importantes, inclusión de variables independientes irrelevantes, no linealidad (la relación entre las variables independientes y la dependiente no es lineal); parámetros cambiantes (los parámetros no permanecen constantes durante el tiempo que dura la recogida de datos}, no aditividad (el efecto de alguna variable independiente es sensible a los niveles de alguna otra variable independiente).
2. **Independencia:** Los residuos son independientes entre si. es decir, los residuos constituyen una variable aleatoria (recordemos que los residuos son las diferencias entre los valores observados y los pronosticados) cuando se trabaja con series temporales.
3. **No-colinealidad.** No existe relación lineal exacta entre ninguna de las variables independientes. El incumplimiento de este supuesto da origen a colinealidad o multicolinealidad.

Sobre el cumplimiento del primer supuesto puede obtenerse información a partir de una inspección del diagrama de dispersión: si tenemos intención de utilizar el modelo de regresión lineal, lo razonable es que la relación entre la variable dependiente y las independientes sea de tipo lineal (veremos que existen gráficos parciales que permiten obtener una representación de la relación neta existente entre dos variables). El tercer supuesto, no-colinealidad no tiene sentido en regresión simple, pues es imprescindible la presencia de más de una variable independiente. Veremos que existen diferentes formas de diagnosticar la presencia de colinealidad.

Por las características de la investigación que se quiere realizar y teniendo en cuenta el numero de variables que se analizara, es necesario recurrir a la ayuda de programas informáticos, los cuales nos faciliten el análisis y procesamientos de los datos; entre los programas que se utiliza para efectuar el procesamiento de datos en el presente trabajo tenemos a:

- SPSS el paquete estadístico (Statistical Package for Sciences) es un software destinado a realizar una gran variedad de análisis estadísticos desde un simple análisis descriptivo hasta diferentes tipos de análisis multivariante de datos
- Sthargrafic software de gran utilidad para solucionar problemas estadísticos de las distintas ramas como la economía, ingeniería y otras.

Establecer el software adecuado, el cual satisfaga los requerimientos que se desea obtener con el trabajo fue una de las actividades primordiales que se realizo ya que esta herramienta resulta de gran ayuda para realizar el estudio e investigación planteada.

3.1. PROCESO ANÁLISIS DE DATOS, DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1.1. INTRODUCCIÓN

En los capítulos anteriores se realizó una exposición y estudio de los temas más importantes relacionados a la tesis de grado; los temas estudiados son necesarios para realizar de una manera adecuada la obtención, proceso y análisis de los datos.

En este capítulo se mostrará los datos obtenidos de las pruebas preliminares realizadas, y en función a estos datos se realizará el proceso y análisis de los mismos, logrando con esto obtener resultados los cuales serán discutidos y validados para luego definir su aplicación práctica en el campo de la ingeniería civil u otras ramas afines.

3.1.2. RESULTADOS DE PRUEBAS PRELIMINARES REALIZADAS

Como se indicó en el objetivo planteado del presente trabajo de tesis, para realizar una investigación y análisis del grado de interconexión o correlación empírica que existe entre la Humedad óptima determinada mediante ensayo de compactación T-180 y los límites de plasticidad (límite líquido, límite plástico) de los suelos, es necesario realizar los siguientes ensayos o pruebas preliminares:

- Análisis Granulométrico de todas las muestras de suelo.
- Determinación de los límites de plasticidad “límite líquido, límite plástico”.
- Compactación mediante Proctor estándar modificado T-180

Realizadas las pruebas y ensayos preliminares citados donde se determinaron los resultados de cada una de estas pruebas y posteriormente estos datos se los clasifico en función a cada clase de suelo, *(el detalle de los ensayos efectuados se encuentra en el Anexo1)* como se muestra en los cuadros resúmenes siguientes:

Cuadro - 15
RESUMEN DE DATOS PRELIMINARES SUELO A-4

MUESTRA Nº	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE PLASTICIDAD	GRANULOMETRIA									CLASIFICACIÓN		COMPACTACION T-180	
				2"	11/2"	1"	3/4"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	AASTHO	SUCS	H. Op.	D. max
1	22,045	17,558	4,49	100	100	100	100	100	99,7	99,25	96,80	44,8	A-4(2)	SC	12,103	2,003
2	29,422	20,186	9,24	100	100	100	100	100	100	99,88	98,30	82,4	A-4(8)	CL	13,849	1,868
3	19,509	16,268	3,24	100	97,77	96,37	94,8	91,4	89,2	87,8	76,00	36,1	A-4(0)	SM	10,971	2,072
4	29,607	21,133	8,47	100	100	100	100	97,2	95,6	94,9	92,00	79,8	A-4(8)	CL	14,173	1,918
5	26,455	20,494	5,96	100	100	100	98,7	91,8	85,9	81,2	65,00	43,0	A-4(2)	SP-SM	12,071	2,071
6	28,761	20,583	8,18	100	97,3	94,2	91,4	84	77,3	72,6	68,20	43,0	A-4(2)	SC	12,780	2,045
7	21,825	19,883	1,94	100	100	100	100	98,2	95,9	94,7	89,00	46,3	A-4(2)	SM	12,075	1,985
8	18,432	16,178	2,25	100	100	100	100	100	100	99,1	93,20	41,2	A-4(2)	SM	11,125	2,053
9	23,080	13,613	9,47	100	96,4	93,5	91,5	83,8	80,6	78,2	69,40	41,0	A-4(1)	SC	11,399	4,073
10	20,314	17,820	2,49	100	100	100	100	96,4	92,0	90,7	79,20	49,3	A-4(3)	SM	11,683	1,981
11	26,142	15,955	10,19	100	100	100	100	97,4	95,7	94,5	88,50	58,3	A-4(5)	CL	13,143	2,019
12	20,378	15,334	5,04	100	100	100	100	100	100	100	99,60	60,7	A-4(5)	ML-CL	11,420	1,922
13	25,527	15,642	9,88	100	100	100	100	100	100	100	99,90	70,2	A-4(7)	CL	11,479	1,997
14	21,230	13,378	7,85	100	100	100	100	100	100	100	94,70	51,9	A-4(8)	CL	11,060	1,945
15	20,402	14,947	5,46	100	100	100	100	100	100	100	95,12	56,1	A-4(5)	ML-CL	11,522	1,917
16	19,106	17,067	2,04	100	100	100	100	100	100	100	99,50	69,6	A-4(7)	ML	11,593	1,918
17	19,096	17,901	1,19	100	100	100	100	100	100	100	100	66,2	A-4(6)	ML	11,717	1,872
18	20,719	18,300	2,42	100	100	100	100	100	100	100	100	85,9	A-4(8)	ML	11,131	1,899
19	20,168	14,806	5,36	100	100	100	100	100	100	100	99,90	81,4	A-4(8)	ML-CL	11,840	2,054
20	22,654	14,147	8,51	100	100	100	100	98,9	97,2	96,1	91,30	46,4	A-4(2)	CL	11,284	1,944
21	22,045	15,337	6,71	100	100	100	100	97,0	92,6	88,9	82,00	52,6	A-4(4)	ML-CL	10,779	2,040
22	22,100	17,160	4,94	100	100	100	100	97,0	93,0	89,1	81,00	53,1	A-4(4)	ML-CL	11,639	2,069
23	22,169	17,457	4,71	100	100	100	98,4	91,4	83,9	74,9	60,10	40,6	A-4(1)	SM	11,089	2,244
24	22,169	17,457	4,71	100	100	100	98,4	90,4	83,9	74,9	60,10	40,6	A-4(1)	SM	10,967	2,078
25	33,124	22,335	10,79	100	100	100	98,4	90,4	83,9	74,9	60,10	40,6	A-4(9)	SC	14,807	1,868
26	22,674	20,165	2,51	100	100	100	100	100	100	97,7	95,10	91,1	A-4(8)	ML	12,833	1,879
27	25,291	20,262	5,03	100	100	100	100	100	100	80,4	70,30	63,8	A-4(6)	ML-CL	13,819	1,930
28	25,090	18,166	6,92	100	100	100	100	100	100	87,6	73,30	60,2	A-4(5)	ML-CL	12,796	1,931
29	26,534	17,769	8,76	100	100	100	100	100	100	100	96,50	92,6	A-4(8)	CL	12,556	1,709
30	30,321	26,039	4,28	100	100	100	100	100	100	100	95,80	78,1	A-4(8)	ML	14,487	1,888
31	33,124	23,013	10,11	100	100	100	100	100	98,8	97,4	95,80	78,1	A-4(8)	CL	14,323	1,884
32	22,054	16,693	5,36	100	100	100	100	100	10,0	97,3	94,00	90,0	A-4(8)	ML-CL	11,306	1,799

Cuadro - 16
RESUMEN DE DATOS PRELIMINARES SUELO A-6

MUESTRA Nº	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE PLASTICIDAD	GRANULOMETRIA									CLASIFICACIÓN		COMPACTACION T-180	
				2"	11/2"	1"	3/4"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	AASTHO	SUCS	H. Op.	D. max
1	26,446	14,687	11,76	100	100	100	100	100	100	100	97,75	82,21	A-6 (9)	CL	13,068	1,852
2	32,034	18,435	13,60	100	100	100	100	100	100	100	99,63	85,3	A-6 (9)	CL	14,842	1,939
3	35,232	23,007	12,23	100	100	100	100	100	100	100	93,33	76,7	A-6 (9)	CL	16,328	1,774
4	34,066	22,620	11,45	100	100	100	100	100	100	98	88,00	68,0	A-6 (7)	CL	15,887	1,886
5	35,581	20,661	14,92	100	100	100	100	100	100	100	95,56	84,4	A-6 (10)	CL	17,079	1,699
6	25,251	12,062	13,19	100	100	100	100	100	100	100	95,85	53,0	A-6 (5)	CL	12,051	1,920
7	31,931	20,407	11,52	100	97	88	76	68,5	61,9	53,8	46,02	38,6	A-6 (2)	CL	15,533	1,953
8	29,062	17,559	11,50	100	100	100	100	100	100	100	99,76	79,2	A-6 (9)	CL	13,683	1,956
9	31,532	18,647	12,88	100	100	100	100	100	100	100	99,85	74,9	A-6 (9)	CL	14,572	1,922
10	24,906	14,004	10,90	100	100	100	100	100	100	100	99,51	71,6	A-6 (8)	CL	11,763	1,972
11	35,420	17,896	17,52	100	100	100	100	100	100	100	99,54	82,7	A-6 (11)	CL	13,880	1,924
12	27,951	17,043	10,91	100	100	100	100	100	100	100	99,35	80,4	A-6 (8)	CL	14,066	1,864
13	39,256	23,899	15,36	100	100	100	100	100	100	100	97,19	94,0	A-6 (10)	CL	17,061	1,857
14	37,789	22,581	15,21	100	100	100	100	98	98	97	93,40	84,9	A-6 (13)	CL	16,868	1,849
15	35,021	22,968	12,05	100	100	100	100	100	92	86	56,60	44,7	A-6 (3)	CL	17,014	1,806
16	37,728	20,961	16,77	100	100	100	100	100	100	100	99,56	97,2	A-6 (11)	CL	15,664	1,807
17	24,204	13,490	10,71	100	100	100	100	100	100	100	98	75,8	A-6 (9)	CL	12,556	1,843
18	28,285	14,246	14,04	100	100	100	100	100	100	100	98	77,6	A-6 (9)	CL	13,115	1,840
19	31,665	16,859	14,81	100	100	100	100	100	100	100	99,34	82,6	A-6 (10)	CL	15,606	3,722
20	36,442	19,955	16,49	100	97	94	92	90,0	83,5	72,8	69,37	54,1	A-6 (6)	CL	16,158	1,785
21	34,863	23,904	10,96	100	100	100	100	100	100	100	99,40	98,3	A-6 (8)	CL	16,625	1,826
22	34,482	23,239	11,24	100	100	100	100	100	100	100	99,52	97,7	A-6 (9)	CL	17,674	1,825
23	27,420	15,764	11,66	100	100	100	100	100	100	100	100	46,3	A-6 (3)	CL	13,045	1,896
24	36,745	20,405	16,34	100	100	100	100	100	100	100	99,07	87,7	A-6 (11)	CL	16,487	1,907
25	39,902	24,677	15,22	100	100	100	100	100	100	100	99,56	93,6	A-6 (10)	CL	17,942	1,690
26	32,736	17,631	15,10	94	93	92	91	89	88	84,2	73,30	45,6	A-6 (4)	CL	15,029	1,958
27	37,757	17,949	19,81	100	100	100	100	100	100	100	98,67	79,3	A-6 (13)	CL	14,512	1,956
28	29,881	17,948	11,93	100	100	100	100	100	100	100	97,83	43,2	A-6 (2)	CL	16,391	1,932
29	34,127	19,322	14,81	100	100	100	100	100	100	100	99,63	98,3	A-6 (10)	CL	15,923	1,732
30	33,8	21,732	12,04	100	100	100	100	100	100	100	98,24	95,5	A-6 (9)	CL	17,143	1,751
31	33,77	22,498	11,27	100	100	100	100	100	100	98,8	95,03	91,1	A-6 (9)	CL	16,484	1,875

Cuadro - 17
RESUMEN DE DATOS PRELIMINARES SUELO A-2-4

N°	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE PLASTICIDAD	GRANULOMETRIA										CLASIFICACIÓN.		COMPACTACION T-180	
				21/2	2"	11/2"	1"	3/4"	3/8"	Nº4	Nº10	Nº40	Nº200	AASHTO	SUCS	H. Op.	D. max
1	28,005	19,746	8,26	100	94,32	87,77	74,38	60,5	41,89	25,66	14,55	7,7	5,3	A-2-4 (0)	GC	13,275	2,071
2	25,763	22,265	3,50	100	100	100	95,1	91,27	71,51	50,03	37,08	33,30	19,7	A-2-4 (0)	SM	15,250	1,718
3	24,972	18,263	6,71	100	100	100	98	92,1	55,42	27,31	15,47	11,10	7,4	A-2-4 (0)	GP-GC	12,970	1,972
4	23,861	14,074	9,79	100	95,89	93,56	86,33	82,04	73,83	59,55	48,52	33,20	20,0	A-2-4 (0)	SC	11,324	2,099
5	28,213	20,834	7,38	100	95	93,29	82,96	74,57	52,82	35,71	28,78	25,70	18,3	A-2-4 (0)	GC	13,649	2,000
6	29,905	19,887	10,02	100	100	100	95,1	91,27	71,51	50,03	37,08	33,30	19,7	A-2-4 (0)	SC	14,500	1,923
7	26,138	20,346	5,79	100	96,22	91	86	84	78,7	74,2	69,0	62,80	34,9	A-2-4 (0)	SC	13,878	1,889
8	20,804	19,244	1,56	100	100	100	94,24	91,16	83,98	79,42	74,77	70,70	25,5	A-2-4 (0)	SM	14,313	1,913
9	22,503	17,977	4,53	100	96,08	94,44	91,72	88,72	81,72	78,76	78,76	73,33	19,5	A-2-4 (0)	SC	12,658	1,950
10	27,816	20,952	6,86	100	100	100	100	100	100	97,41	90,44	82,60	33,4	A-2-4 (0)	SC	14,375	1,923
11	23,858	16,928	6,93	100	98,91	95,65	80,16	71,82	61,08	49,93	44,6	38,60	24,0	A-2-4 (0)	SC	13,000	2,014
12	20,010	17,628	2,38	100	100	100	100	98,66	96,65	94,29	91,48	80,30	30,9	A-2-4 (0)	SM	13,052	1,969
13	20,740	18,900	1,84	100	100	100	100	98,22	93,48	87,93	79,91	74,60	29,2	A-2-4 (0)	SM	12,808	1,965
14	23,083	16,710	6,37	100	100	88,25	78,37	70	57	46	39	28,20	15,7	A-2-4 (0)	GC	12,500	2,061
15	23,159	13,718	9,44	100	100	100	94,81	91	82,73	76	73	68,60	20,6	A-2-4 (0)	SC	12,103	1,928
16	24,265	16,690	7,57	100	100	91,66	79,92	71,02	50,34	35,29	29,49	26,70	17,2	A-2-4 (0)	GC	12,880	2,093
17	22,495	17,690	4,80	100	100	98,55	91,52	87,51	80,91	75,79	70,89	59	34,5	A-2-4 (0)	SC	13,071	1,962
18	21,220	13,826	7,39	100	100	94,24	81,06	75,94	59,94	50,11	42,09	33	14,6	A-2-4 (0)	SC	10,522	1,993
19	18,929	15,163	3,77	100	100	100	95,88	92,37	82,31	73,47	65,72	56,20	30,2	A-2-4 (0)	SM	10,885	2,011
20	20,673	13,119	7,55	100	100	78	66	58	45,8	40,0	36,4	29,60	11,6	A-2-4 (0)	GP-GC	11,288	2,118
21	20,168	13,613	6,56	100	100	77,41	66,47	60,08	46,8	39,63	35,4	32,80	11,8	A-2-4 (0)	GP-GC	10,719	2,130
22	22,099	15,097	7,00	100	100	79,79	65,53	54,89	41,13	35,89	32,75	27,90	11,8	A-2-4 (0)	GP-GC	11,909	2,102
23	21,560	13,360	8,20	100	86,24	72,02	66,4	59,5	50,04	44,09	40,54	32	13,8	A-2-4 (0)	GC	10,140	2,140
24	22,779	13,360	9,42	100	91,43	83,18	74,55	69,75	60,87	55,11	51,78	28,40	12,7	A-2-4 (0)	SC	11,465	2,133
25	24,143	16,533	7,61	100	91,74	76,14	58,51	49,62	40	35,17	32,34	27,70	16,0	A-2-4 (0)	GC	11,651	2,105
26	22,904	14,152	8,75	100	91	72	62	58	49	44	40,0	28,90	15,0	A-2-4 (0)	GC	11,952	2,115
27	20,303	14,074	6,23	100	100	77,88	67,42	60,83	49,45	42,47	37,4	30,80	15,0	A-2-4 (0)	GC	11,626	2,099
28	21,656	13,317	8,34	97,50	84,68	71,37	61,95	59,23	50,77	44,89	40,75	30,60	14,3	A-2-4 (0)	GC	11,808	2,100
29	22,406	14,072	8,33	100	87,68	78,18	67,8	59,9	47,11	41,27	37,92	31,80	16,7	A-2-4 (0)	GC	11,104	2,115
30	22,4	14,239	8,17	91,95	83,41	77,25	68,11	61,26	49,47	43,19	39	32,90	16,5	A-2-4 (0)	GC	11,846	2,108

Cuadro - 18
RESUMEN DE DATOS PRELIMINARES SUELO A-2-6

N°	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE PLASTICIDAD	GRANULOMETRIA										CLASIFIC.		COMPACTACION T-180	
				21/2	2"	11/2"	1"	3/4"	3/8"	N°4	N°10	N°40	N°200	AASTHO	SUCS	H. Op.	D. max
1	35,260	18,544	16,72	100	100	98,97	97,14	93,4	66,29	22,64	10,21	7,39	5,78	A-2-6 (0)	GP-GC	14,036	2,062
2	35,440	21,854	13,59	100	96,28	92,2	87,03	84,59	79,12	71,21	64,22	37,70	21,2	A-2-6 (1)	SC	15,870	1,905
3	30,508	16,386	14,12	100	93,99	91,91	86,81	77,11	55,77	39,18	37,59	26,20	21,6	A-2-6 (0)	GC	13,585	2,091
4	30,518	17,309	13,21	100	100	94,05	82,74	73,06	51,43	34,48	26,91	19,90	10,7	A-2-6 (0)	GP-GC	15,343	1,969
5	33,914	21,173	12,74	100	100	100	92,43	84,96	47,14	23,12	15,45	9,10	6,6	A-2-6 (0)	GP-GC	15,295	1,904
6	34,595	23,443	11,15	100	100	90,96	79,64	67,53	57,98	51,31	43,29	38,18	32,5	A-2-6 (0)	SC	15,758	1,822
7	35,021	22,968	12,05	100	100	92	72	63	52,7	49,3	46,8	34,11	29,0	A-2-6 (0)	GC	15,186	1,823
8	37,728	20,961	16,77	100	100	92,32	82,83	74,05	66,98	47,22	40,61	38,42	32,9	A-2-6 (1)	GC	15,895	1,800
9	36,442	19,955	16,49	100	100	93,09	79,87	75,73	69,88	54,62	44,95	38,96	32,7	A-2-6 (0)	SC	14,338	1,892
10	34,863	23,904	10,96	100	100	81,49	71,3	63,66	59,44	41,41	33,17	28,95	21,7	A-2-6 (0)	GC	16,674	1,799
11	34,482	23,239	11,24	100	100	93,01	85,28	76,68	67	59,47	41,15	31,50	24,5	A-2-6 (0)	SC	15,634	1,842
12	27,420	15,764	11,66	100	100	100	90,27	78,93	69,83	56,23	36,76	28,90	21,3	A-2-6 (0)	SC	13,483	1,887
13	27,829	14,583	13,25	100	100	92,11	81,26	74,95	61,85	53,93	48,01	33,21	28,2	A-2-6 (0)	SC	12,750	1,880
14	36,745	20,405	16,34	100	93,9	84,84	68,3	57	48	42	38	33,00	28,9	A-2-6 (1)	GC	16,234	1,947
15	39,902	24,677	15,22	100	100	100	91,64	82,84	71,85	65	50	42,11	34,0	A-2-6 (1)	SC	17,616	1,706
16	32,736	17,631	15,10	100	100	90,91	82,69	76,33	72,69	66,85	45,04	35,95	27,7	A-2-6 (1)	SC	14,764	1,956
17	37,757	19,120	18,64	100	90,42	84,18	64,93	56,3	49,31	39,71	33,47	33	32,3	A-2-6 (3)	GC	14,925	1,852
18	29,881	15,586	14,30	100	100	87,4	77,25	67,03	58,89	53,04	40,23	32	24,5	A-2-6 (1)	SC	12,513	1,935
19	34,127	19,322	14,81	100	100	92,65	85,22	77,79	71,97	64,52	53,09	40,92	33,0	A-2-6 (1)	SC	14,719	1,837
20	33,604	21,208	12,40	100	100	90	78	76	66,4	59,4	47,6	38,73	30,8	A-2-6 (0)	SC	16,717	1,719
21	29,529	18,436	11,09	100	100	89,16	77,88	69,06	63,2	48,54	42,39	28,72	20,9	A-2-6 (0)	GC	14,037	1,874
22	33,606	17,558	16,05	100	100	86,24	72,95	65,95	57,31	50,87	45,85	39,35	32,9	A-2-6 (1)	SC	14,474	1,964
23	29,422	18,387	11,04	100	100	87,66	77,03	65,26	58,44	40,08	34,33	28	23,0	A-2-6 (0)	GC	13,849	1,868
24	22,654	11,465	11,19	100	100	88,36	73,48	61,77	54,33	44,79	34,14	28,33	19,6	A-2-6 (0)	GC	11,284	1,944
25	22,045	10,752	11,29	100	87,92	79,56	69,57	61,94	55,15	42,34	30,57	25,52	18,1	A-2-6 (0)	GC	9,422	2,040
26	22,674	11,202	11,47	100	100	86	77	65	56	50	40,9	32,58	27,4	A-2-6 (0)	SC	9,736	1,919
27	29,853	16,825	13,03	100	100	92,3	74,11	66,02	56,04	48,59	41,78	34,10	27,9	A-2-6 (0)	GC	13,819	1,930
28	25,469	14,562	10,91	100	100	87,39	75,53	61,03	55,62	45,46	37,86	32,00	24,5	A-2-6 (0)	GC	11,260	1,947
29	26,534	15,576	10,96	100	100	90,19	82,85	72,08	66,47	59,35	41,87	34,53	27,8	A-2-6 (0)	SC	12,886	1,730
30	30,3	19,009	11,31	100	100	87,71	80,36	74,42	67,51	55,4	45	37,85	29,7	A-2-6 (0)	SC	14,740	1,851
31	33,1	21,098	12,03	100	100	86,64	78,62	67,07	54,66	47,13	41	33,23	24,4	A-2-6 (0)	GC	15,665	1,889

Conocidos todos los datos preliminares necesarios, los cuales se muestran en los cuadros anteriores se procede a realizar y calcular todo los parámetros que coadyuven a establecer el grado de interconexión o correlación entre las variables ya definidas. El proceso y análisis se lo realiza en función a lo establecido en el capítulo anterior.

3.1.3. PROCEDIMIENTO Y ANALISIS DE REGRECION MULTIPLE

Haciendo uso de las variables ya definidas en el capítulo anterior se procede a realizar los cálculos y análisis correspondientes.

- **Variable dependiente:** como variable dependiente se define al contenido de humedad óptimo del suelo determinada mediante ensayo de compactación T-180 Proctor Modificado.
- **Variables independientes:** se define como variables independientes a los límites de plasticidad, el límite líquido y limite plástico.

3.1.3.1 DIAGRAMA DE DISPERSION O NUBE DE PUNTOS

Con el diagrama de dispersión o nube de puntos, es posible frecuentemente representar una curva que se aproxime a los datos. Tal curva se llama curva de aproximación; pero en este caso en particular cuando se cuenta con más de una variable independiente la representación grafica de las relaciones presentes en un modelo de regresión resulta poco intuitiva, muy complicada y nada útil. Es más fácil y practico partir de una ecuación del modelo de regresión múltiple.

La representación del diagrama de dispersión o nube de puntos que se representa sin la ayuda de herramientas adecuadas como el software con el cual se cuenta (SSPS) resultaría poco intuitivo, pero gracias a esta herramienta el diagrama se lo puede apreciar y visualizar de mejor manera, pudiéndole hacer rotar la grafica en las

diferentes direcciones los 360°. esto facilita la toma de dicciones por el tesista para asumir un modelo adecuado ya que se puede distinguir la tendencia que toman los datos en la figura.

La representación grafica de los diferentes diagramas de dispersión de las clases de suelo estudiadas se presenta a continuación:

Figura - 17

Diagrama de Dispersión suelo A-4

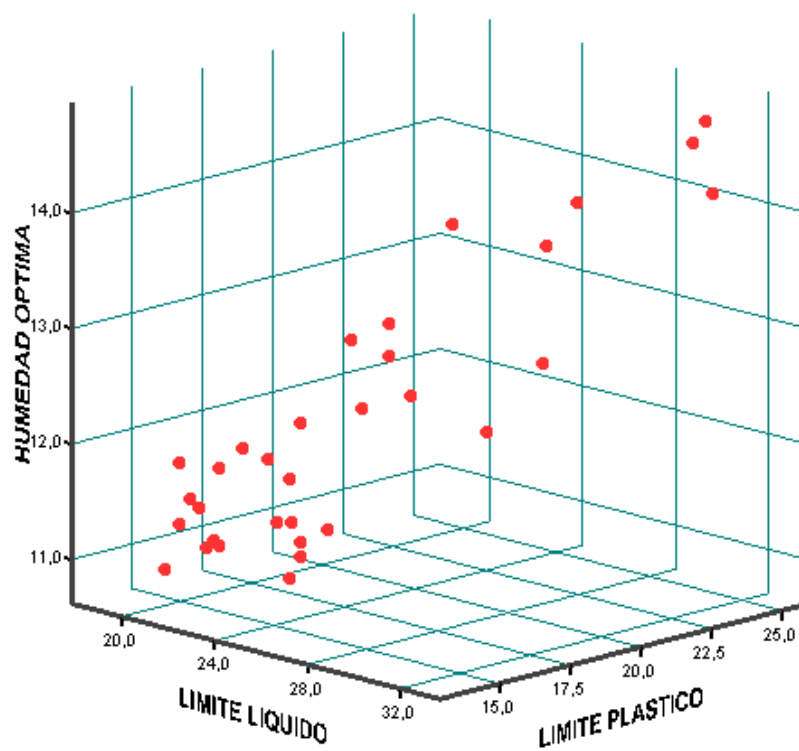


Figura - 18
Diagrama de dispersión suelo A-6

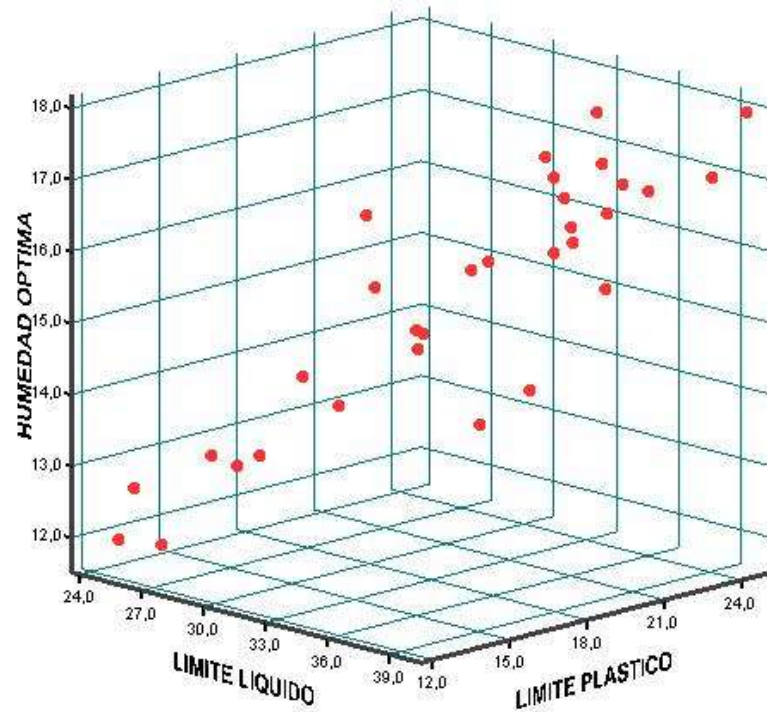


Figura - 19
Diagrama de dispersión suelo A-2-4

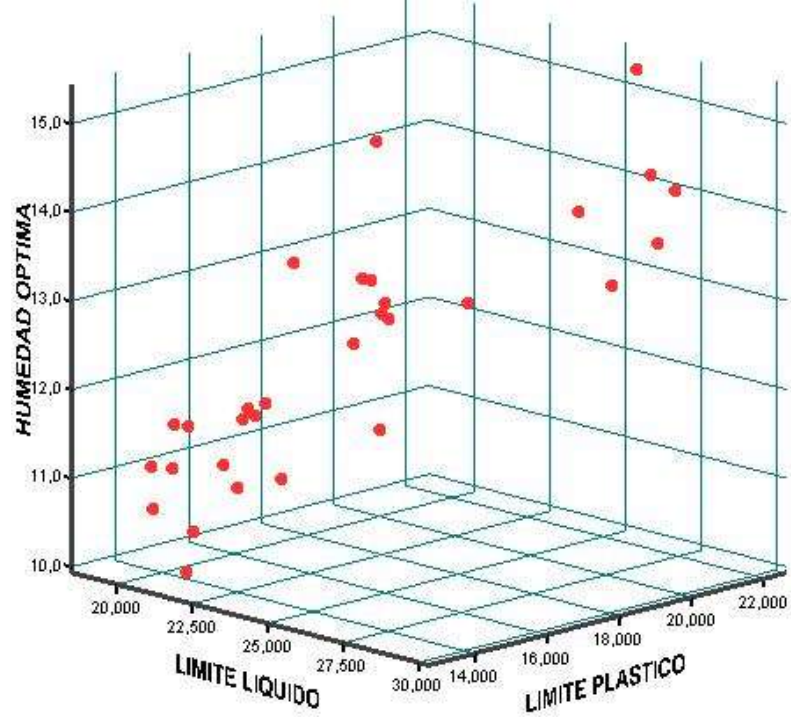
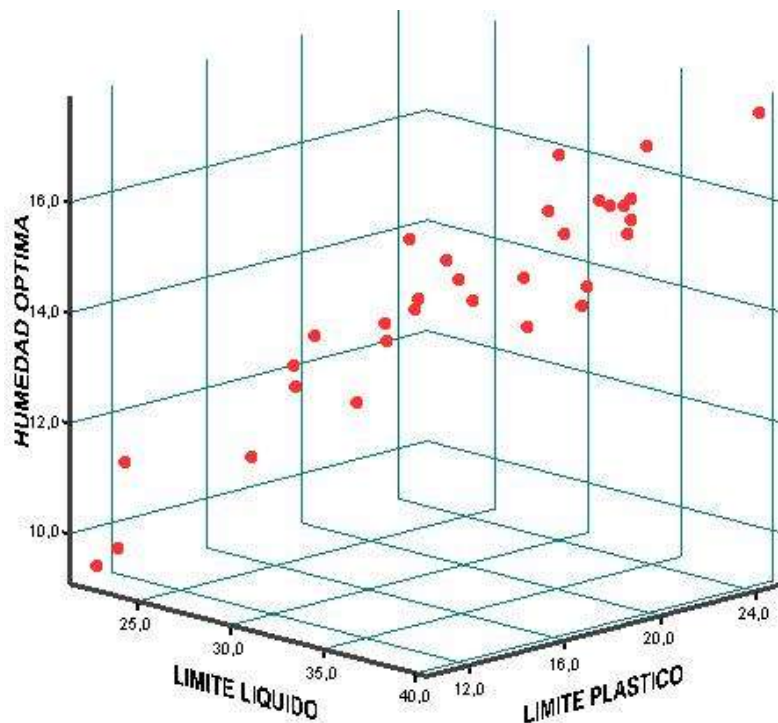


Figura - 20
Diagrama de dispersión suelo A-2-6



En la visualización ocular realizada a cada uno de los diagramas de dispersión o nube de puntos se pudo apreciar, que estos tienen tendencia a ser ajustados por un modelo de regresión en particular.

3.1.3.2. CURVA O SUPERFICIE DE APROXIMACION

Como se sabe la representación de una superficie aproximante a los puntos de un sistema tridimensional es complejo y nada útil, pero con la ayuda de las herramientas utilizadas (software SPSS), la representación de la superficie aproximante se la puede graficar con facilidad y visualizar de diferentes perspectivas. Estas graficas nos proporcionan gran ayuda y nos permite tener más certeza y seguridad de que los puntos se ajustaran al modelo de regresión que se definirá.

Figura - 21
Superficie de aproximación suelo A-4

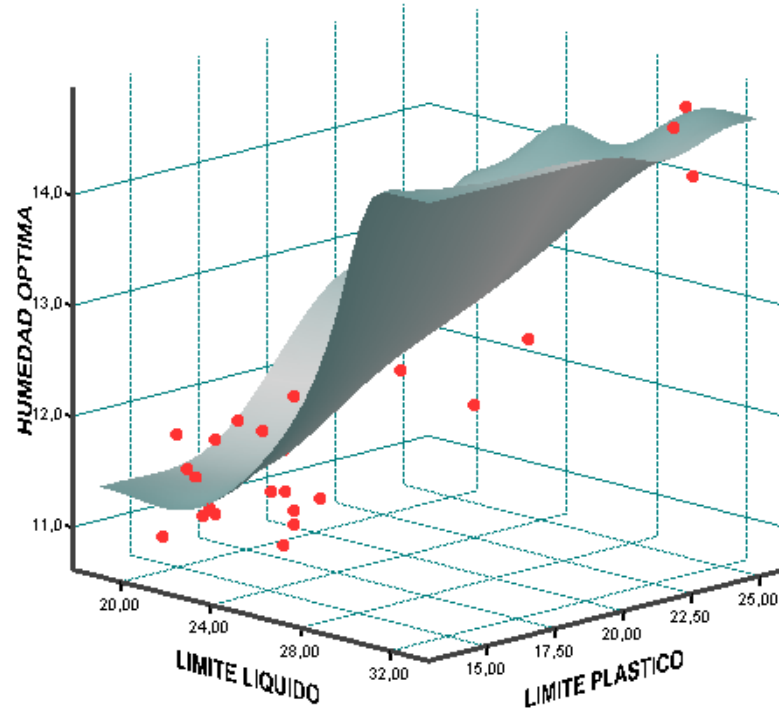


Figura - 22
Superficie de aproximación suelo A-6

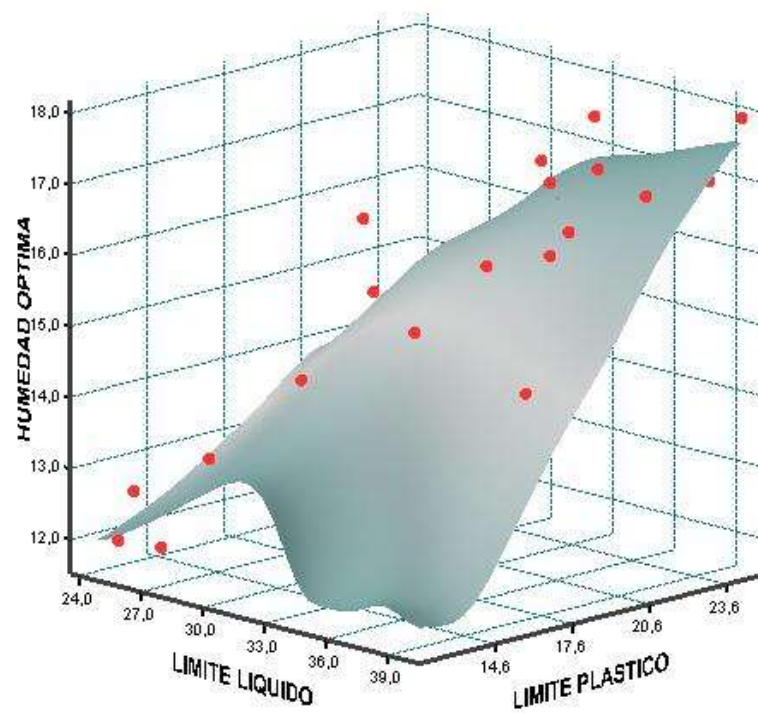


Figura - 23
Superficie de aproximación suelo A-2-4

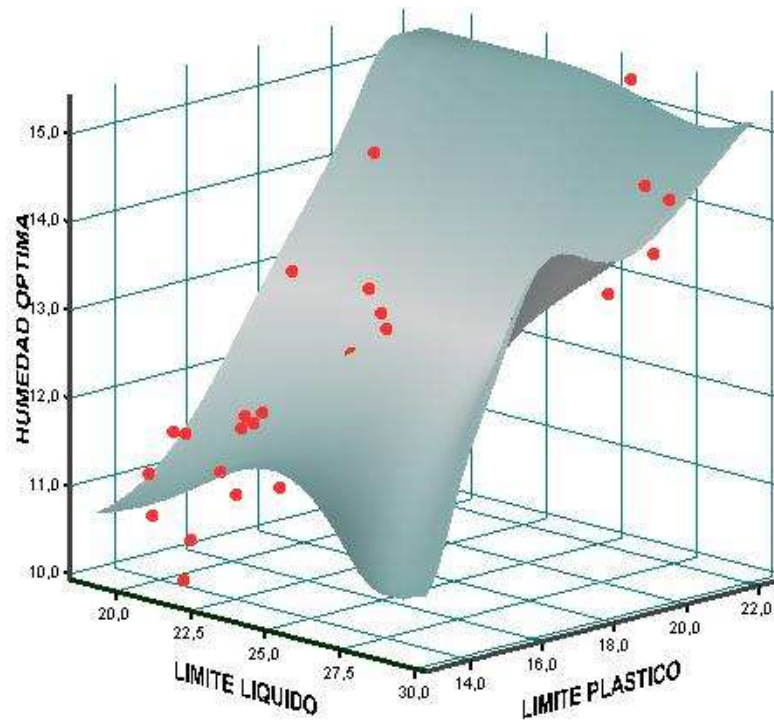
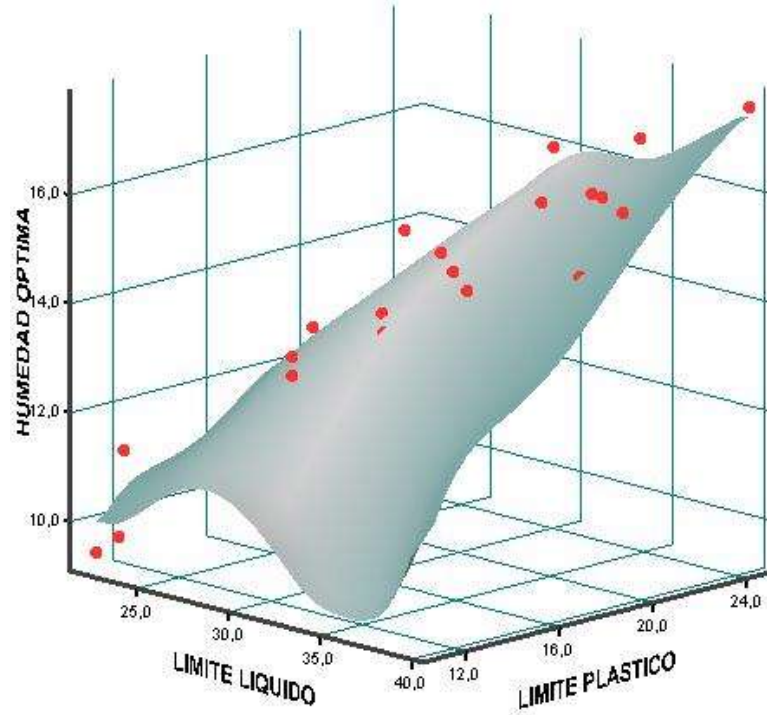


Figura - 24
Superficie de aproximación suelo A-2-6



3.1.3.3. MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE

Visualizados los diagramas de dispersión con sus respectivas superficies aproximantes, pasos que nos dan gran certeza y seguridad que el modelo asumido obtendrá un buen ajuste con los datos.

Así como existen rectas de regresión de mínimos cuadrados que aproximan un conjunto de N puntos dato (X,Y) en un diagrama de dispersión, existen también planos de regresión de mínimos cuadrados que ajustan un conjunto de N puntos dato (X_1, X_2, X_3) en un diagrama de dispersión tridimensional.

$$x_1 = b_{1.23} + b_{12.3}x_2 + b_{13.2}x_3 \quad 1$$

Modelo o ecuación de regresión múltiple

De acuerdo con este modelo o ecuación asumido, la variable dependiente (X_1) se interpreta como una combinación lineal de un conjunto de K variables independientes (X_k) cada una de las cuales va acompañada de un coeficiente (b_k) que indica el peso relativo de esa variable en esa ecuación e incluye también una constante (b_0).

Para el análisis de los datos denotaremos como:

- X_1 = Contenido de humedad óptimo del suelo (*variable dependiente*)
- X_2 = Límite líquido (*variable independiente*)
- X_3 = Límite plástico (*variable independiente*)

La ecuación de regresión mínimo cuadrática se construye estimando los valores de los coeficientes (b) del modelo de regresión. Estas estimaciones se obtienen intentando hacer que las diferencias al cuadrado entre los valores observados (X_1) y los pronosticados (X'_1) sean mínimas.

3.1.3.3.1 ECUACION DE REGRESIÓN

En los cuadros de coeficientes de regresión parcial (ver cuadro XI-5) contiene toda la información necesaria para construir la ecuación de regresión mínimo cuadrática de cada una de las clases de suelos estudiadas.

Cuadro - 19

Coeficientes de regresión múltiple suelo A-4

Coeficientes(a)

		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
Modelo		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	5,225	,657		7,957	,000
	LIMITE LIQUIDO	,174	,034	,595	5,098	,000
	LIMITE PLASTICO	,157	,049	,370	3,171	,003

a Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Cuadro - 20

Coeficientes de regresión múltiple suelo A-6

Coeficientes(a)

		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados		
Modelo		B	Error típ.	Beta	t	Sig.
1	(Constante)	5,645	,979		5,767	,000
	LIMITE LIQUIDO	,065	,054	,165	1,213	,0.04
	LIMITE PLASTICO	,390	,068	,779	5,734	,000

a Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Cuadro - 21
Coefficientes de regresión múltiple suelo A-2-4
Coefficientes(a)

Modelo	Coefficients no estandarizados		Coefficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	4,987	,865		5,763	,000
LIMITE LIQUIDO	,041	,049	,086	,836	,005
LIMITE PLASTICO	,392	,047	,855	8,291	,000

a Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Cuadro - 22
Coefficientes de regresión múltiple suelo A-2-6
Coefficientes(a)

Modelo	Coefficients no estandarizados		Coefficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	3,838	,900		4,267	,000
LIMITE LIQUIDO	,124	,057	,298	2,181	,003
LIMITE PLASTICO	,351	,072	,667	4,882	,000

a Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

A continuación se hace una interpretación y análisis de todos los parámetros calculados en los cuadros anteriores

3.1.3.3.2. COEFICIENTES NO ESTANDARIZADOS

Estos coeficientes no estandarizados se interpretan en los términos ya conocidos. Por ejemplo, en el cuadro XI- 5(a) el coeficiente correspondiente a la variable limite liquido que tienen un valor de 0.174 indica que; si el resto de las variables se

mantienen constantes, a un aumento de una unidad en el límite líquido le corresponde en promedio, un aumento de 0.174 unidades a la humedad óptima del suelo.

Es necesario señalar que estos coeficientes no son independientes entre sí. De hecho, reciben el nombre de coeficientes de regresión *parcial* porque el valor concreto estimado para cada coeficiente se ajusta teniendo en cuenta la presencia del resto de variables independientes. Conviene, por tanto; interpretarlos con cautela

3.1.3.3.3. COEFICIENTES DE REGRESIÓN ESTANDARIZADOS

Los coeficientes beta están basados en las puntuaciones típicas y, por tanto, son directamente comparables entre sí. Indican la cantidad de cambio, en puntuaciones típicas; que se producirá en la variable dependiente por cada cambio de una unidad en la correspondiente variable independiente (manteniendo constantes el resto de variables independientes).

Estos coeficientes proporcionan una pista muy útil sobre la importancia relativa de cada variable independiente en la ecuación de regresión. En general, una variable tiene tanto más peso (importancia) en la ecuación de regresión cuanto mayor (en valor absoluto) es su coeficiente de regresión estandarizado. Observando los coeficientes beta del cuadro XI-5 (a) vemos que la variable límite líquido es la más importante. Lo ya dicho sobre la no independencia de los coeficientes de regresión parcial no estandarizados también vale aquí.

Se puede apreciar también que la variable límite plástico resulta mas importante en los modelos XI-5(b); XI-5(c); XI-5(d).

3.1.3.3.4 PRUEBAS DE SIGNIFICACIÓN.

Las pruebas (t) y sus niveles críticos (últimas dos columnas de los cuadros XI-5 t y Sig.) sirven para contrastar la hipótesis nula de que un coeficiente de regresión vale

cero en la población. Niveles críticos (Sig.) muy pequeños (generalmente menores que 0,05) indican que debemos rechazar esa hipótesis nula.

Un coeficiente de cero indica ausencia de relación lineal, de modo que los coeficientes significativamente distintos de cero nos informan sobre qué variables son relevantes en la ecuación de regresión. Observando el nivel crítico asociado a cada prueba (t) (cuadro XI-5), vemos que las dos variables utilizadas poseen coeficientes significativamente distintos de cero. Todas ellas, por tanto; contribuyen de forma significativa a explicar lo que ocurre con la variable dependiente.

3.1.3.3.5 BONDAD DE AJUSTE

Hay un término denominado R cuadrado, que se interpreta del siguiente modo. La variable respuesta presenta cierta variabilidad (incertidumbre), pero cuando se conoce el valor de las variables independientes, dicha incertidumbre disminuye. El término R cuadrado es una cantidad que puede interpretarse como un factor (porcentaje) de reducción de la incertidumbre cuando son conocidas las variables independientes. Cuanto más se acerque a uno, más poder explicativo tendrá el modelo. Pero esto esconde una trampa. Cada vez que introducimos una nueva variable independiente en el modelo, R cuadrado no puede hacer otra cosa que aumentar. Si introducimos un número artificialmente grande de ellas, podremos llegar a acercarla a uno tanto como queramos.

El programa estadístico utilizado (SSPS) nos muestra un Término R cuadrado corregido, que puede interpretarse como una corrección de honestidad. Nos castigará disminuyendo cuando introduzcamos variables innecesarias. Si al ir complicando el modelo este término aumenta una cantidad "razonable", podemos considerarlo posiblemente una variable de interés, pero si disminuye, deberíamos pensar dos veces si nos merece la pena la complejidad del modelo para tan poco beneficio.

Cuadro - 23**Coefficiente de correlación y determinación suelo A-4****Resumen del modelo**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,897(a)	,805	,791	,54184

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO

Cuadro - 24**Coefficiente de correlación y determinación suelo A-6****Resumen del modelo**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,922(a)	,849	,839	,692939

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO, LIMITE LIQUIDO

Cuadro - 25**Coefficiente de correlación y determinación suelo A-2-4****Resumen del modelo**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,914(a)	,835	,823	,53911

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO, LIMITE LIQUIDO

Cuadro - 26**Coefficiente de correlación y determinación suelo A-2-6****Resumen del modelo**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,941(a)	,885	,876	,68256

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO, LIMITE LIQUIDO

En función al cuadro - 23, y lo citado anterior mente; para medir la bondad del ajuste tenemos el término R cuadrado y R cuadrado corregida. Que R cuadrado sea igual a 0.805 se puede interpretar de la siguiente forma: Elegido una clase de suelo al

azar del que no sabemos nada, tenemos una cierta incertidumbre (varianza) de cual será el valor de la variable respuesta. Si disponemos de información adicional sobre las variables independientes (límite líquido y límite plástico del suelo), gracias al modelo de regresión, podemos hacer una predicción donde la incertidumbre (varianza) esta disminuida en un 80.5% con respecto a la original.

El error típico de la estimación que se presenta en el cuadro XI- 6 (a) es la desviación típica de los residuos, es decir, la desviación típica, de las distancias existentes entre las puntuaciones en la variable dependiente y los pronósticos efectuados con la recta de regresión. Representa una medida de la parte de variabilidad de la variable dependiente que no es explicada por el plano de regresión. En general, cuanto mejor es el ajuste, mas pequeño es este error típico.

3.1.3.3.6. INTERVALOS DE CONFIANZA

Estos intervalos nos informan sobre los límites entre los que podemos esperar que se encuentre el valor poblacional de cada coeficiente de regresión. Estos límites se obtienen con un nivel de confianza de 0.95. Intervalos de confianza muy amplios indican que las estimaciones obtenidas son poco precisas y probablemente inestables (cosa que sabe ocurrir cuando existen problemas de colinealidad)

Cuadro - 27

Intervalos de confianza suelo A-4 **Coefficientes^a**

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Intervalo de confianza para B al 95%	
	B	Error típ.	Límite inferior	Límite superior
1 (Constante)	5,225	,657	3,882	6,568
LÍMITE PLÁSTICO	,157	,049	,056	,258
LÍMITE LÍQUIDO	,174	,034	,104	,244

a. Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Cuadro - 28
Intervalos de confianza suelo A-6

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients no estandarizados		Intervalo de confianza para B al 95%	
		B	Error típ.	Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	5,645	,979	3,640	7,650
	LÍMITE LIQUIDO	,065	,054	,045	,176
	LÍMITE PLASTICO	,390	,068	,250	,529

a. Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Cuadro - 29
Intervalos de confianza suelo A-2-4

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients no estandarizados		Intervalo de confianza para B al 95%	
		B	Error típ.	Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	4,987	,865	3,211	6,762
	LÍMITE LIQUIDO	,041	,049	,059	,141
	LÍMITE PLASTICO	,392	,047	,295	,489

a. Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Cuadro - 30
Intervalos de confianza suelo A-2-6

Coefficientes^a

Modelo		Coefficients no estandarizados		Intervalo de confianza para B al 95%	
		B	Error típ.	Límite inferior	Límite superior
1	(Constante)	3,838	,900	1,996	5,681
	LÍMITE LIQUIDO	,124	,057	,008	,241
	LÍMITE PLASTICO	,351	,072	,204	,499

a. Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Todo intervalo de confianza que incluya al cero, quiere decir que puede ser eliminado por simplicidad.

3.1.3.3.7. SUPUESTOS O CONDICIONES DEL MODELO DE REGRESIÓN

Los supuestos del modelo estadístico asumido se refieren a una serie de condiciones que deben darse para garantizar la validez del modelo. Al efectuar aplicaciones prácticas del modelo de regresión, nos veremos en la necesidad de examinar muchos de estos supuestos o condiciones

El modelo estadístico asumido para garantizar su validez debe cumplir las siguientes condiciones:

3.1.3.3.7. 1 LINEALIDAD:

Sobre el cumplimiento del primer supuesto puede obtenerse información a partir de una inspección del diagrama de dispersión: si tenemos intención de utilizar el modelo de regresión lineal, lo razonable es que la relación entre la variable dependiente y las independientes sea de tipo lineal, como se puede apreciar en las figuras XI-3.

El incumplimiento del supuesto de linealidad suele denominarse error de especificación. Algunos ejemplos son: omisión de variables independientes importantes, inclusión de variables independientes irrelevantes, no linealidad (la relación entre las variables independientes y la dependiente no es lineal); parámetros cambiantes (los parámetros no permanecen constantes durante el tiempo que dura la recogida de datos), no aditividad (el efecto de alguna variable independiente es sensible a los niveles de alguna otra variable independiente), como se puede comprobar el modelo elegido cumple con esta condición de linealidad.

Figura - 25
Relación entre variable dependiente y cada una
de las variables independientes suelo A - 4

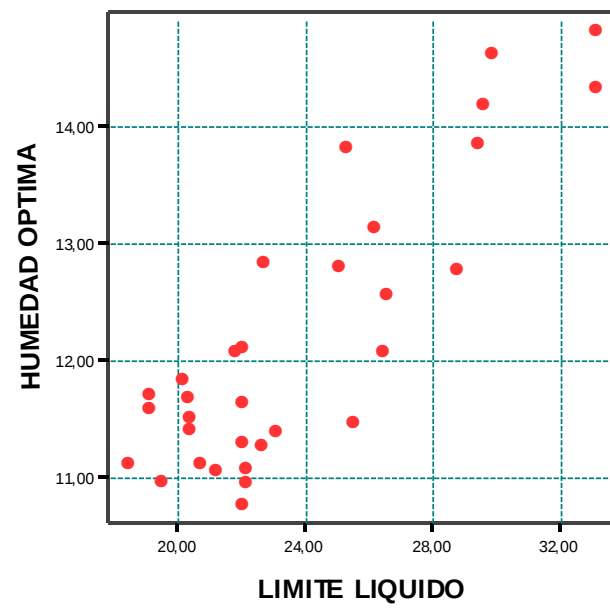
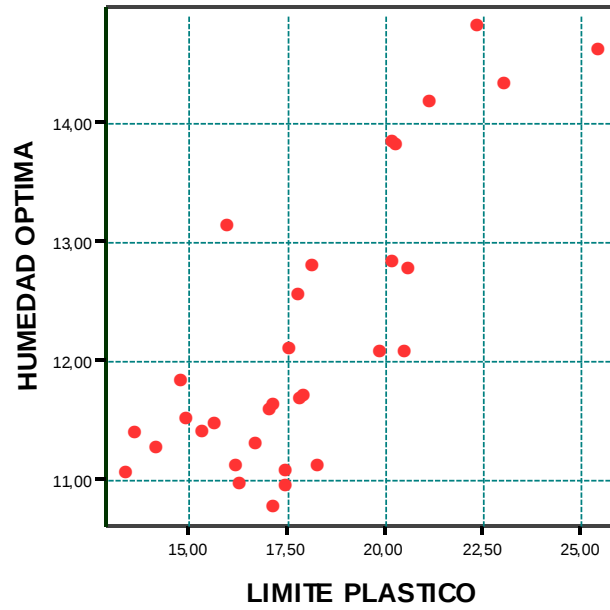


Figura - 26
Relación entre variable dependiente y cada una de las variables independientes suelo A - 6

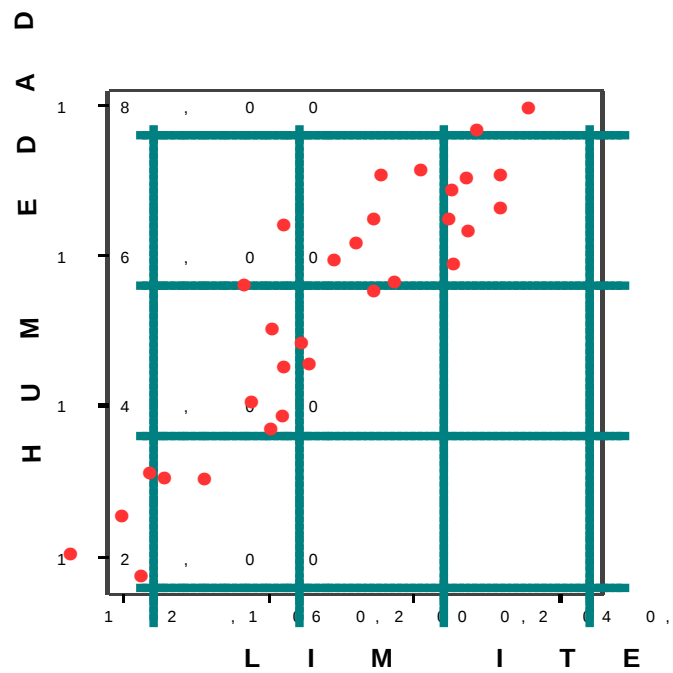
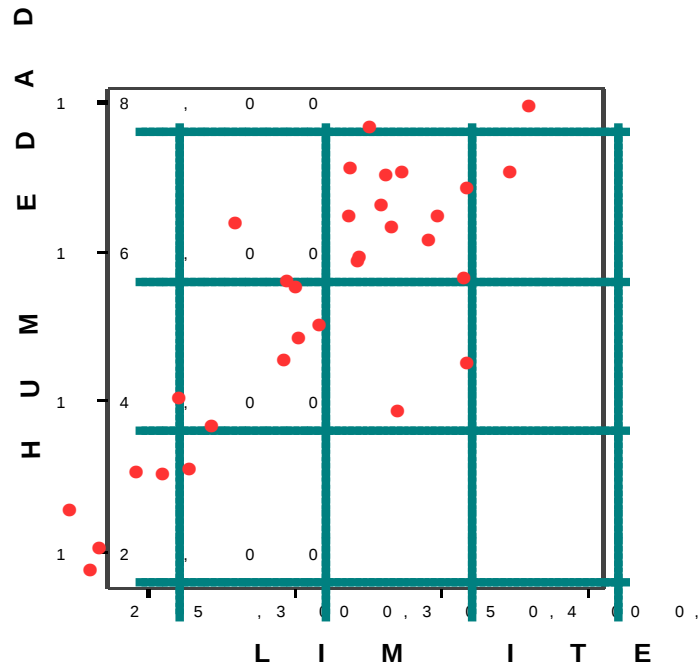


Figura - 27
Relación entre variable dependiente y cada una
de las variables independientes suelo A-2-4

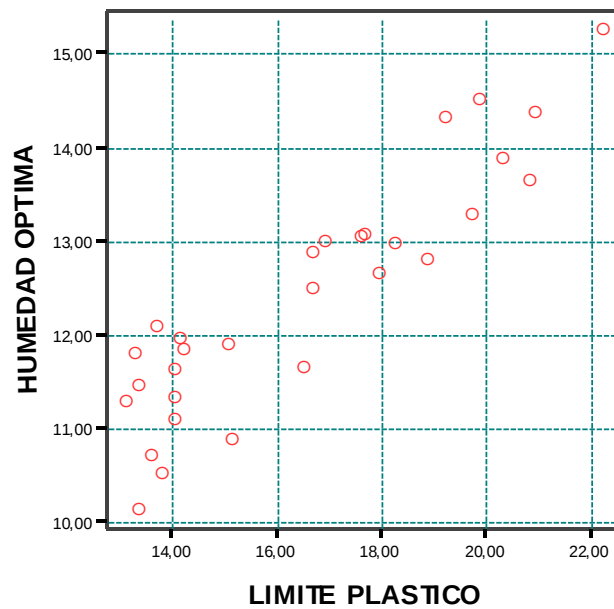
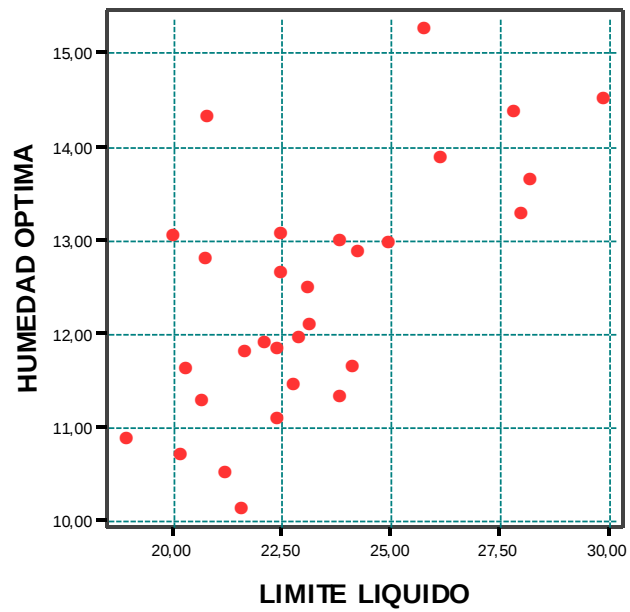
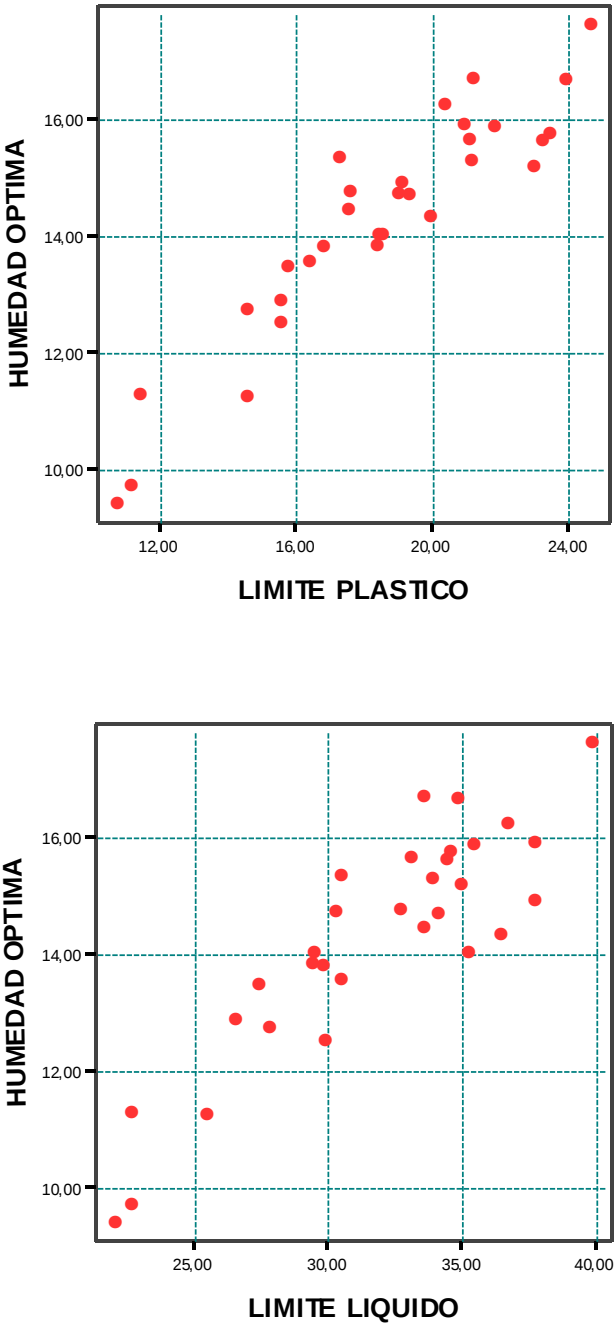


Figura - 28
Relación entre variable dependiente y cada una
de las variables independientes suelo A-2-6



3.1.3.3.7.2. INDEPENDENCIA:

Uno de las condiciones básicas del modelo de regresión lineal es el de independencia entre los residuos. El estadístico de Darwin Watson proporciona información sobre el grado de independencia existente entre ellos:

$$DW = \frac{\sum_{i=2}^n (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^n e^2}$$

(e_i se refiere a los residuos $e_i = y_i - \hat{y}_i$) el estadístico DW. oscila entre 0-4 y toma valores de 2 cuando los residuos son independientes. Los valores menores que 2 indican autocorrelación positiva los menores que 2 autocorrelación negativa. Podemos asumir independencia entre los residuos cuando DW toma valores entre 1.5 y 2.5.

Cuadro - 31

Estadístico de Darwin Watson suelo A-4

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,897(a)	,805	,791	,54184	1,609

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO

b Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Cuadro - 32

Estadístico de Darwin Watson suelo A-6

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,922(a)	,849	,839	,692939	1,886

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO, LIMITE LIQUIDO

b Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Cuadro - 33**Estadístico de Darwin Watson suelo A-2-4****Resumen del modelo**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,914(a)	,835	,823	,53911	2,376

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO, LIMITE LIQUIDO

b Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Cuadro - 34**Estadístico de Darwin Watson suelo A-2-6****Resumen del modelo(b)**

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación	Durbin-Watson
1	,941(a)	,885	,876	,68256	1,912

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO, LIMITE LIQUIDO

b Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Como se pudo apreciar en los cuadros XI-5 el estadístico de Darwin Watsonn esta dentro los rangos establecidos por lo cual podemos asumir la independencia de los residuos.

3.1.3.3.7. 3. COLINEALIDAD

Existe colinealidad perfecta cuando una de las variables independientes se relaciona en forma perfectamente lineal con una o mas del resto de las variables independientes de la ecuación.

Si las variables independientes están perfectamente relacionadas entre si en forma lineal, se dice que son lineal mente dependientes. En estos casos no se pueden obtener estimaciones de los coeficientes de la ecuación de regresión.

En la practica rara vez se encuentran casos de dependencia perfecta, sin embargo se habla de un problema de multicolinealidad cuando dos o mas variables independientes están altamente correlacionadas entre si.

Es posible detectar estas correlaciones con el coeficiente de correlación múltiple pero considerando una regresión de una de las variables independientes respecto de las otras.

Si en las correlaciones entre las variables independientes se comprobaría coeficientes de correlación próximos a 1 o estas correlaciones serian tan grandes como el coeficiente de correlación múltiple se estaría ablando de un problema de multicolinealidad.

Cuadro - 35

Coeficiente de correlación de variables independientes suelo A-4

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,711(a)	,506	,490	2,89143

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO

Cuadro - 36

Coeficiente de correlación de variables independientes suelo A-6

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,642(a)	,412	,698	2,385215

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO

Cuadro - 37

Coeficiente de correlación de variables independientes suelo A-2-4

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,654(a)	,427	,407	2,08541

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO

Cuadro - 38

Coefficiente de correlación de variables independientes suelo A-2-6

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,683(a)	,466	,772	2,22310

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO

Como se pudo comprobar con la determinación de los coeficientes de correlación entre cada una de las variables independientes de las diferentes clases de suelo no presentan problemas de multicolinealidad.

El modelo de regresión múltiple, además de las condiciones ya expuestas se deben cumplir dos condiciones más para obtener los estimadores por mínimos cuadrados.

- El numero de observaciones (n) debe de exceder por lo menos en dos al numero (k) de variables independientes, es decir se debe cumplir $n > k + 2$
- Las variables independientes que conforman el modelo de regresión tiene que ser deterministas ósea no son variables aleatorias, ya que sus valores vienen de una muestra tomada.

Condiciones que son tomadas en cuenta y cumplidas por los modelos de regresión asumidos

3.1.4. RESULTADOS OBTENIDOS

Realizado todo el calculo estadístico con los datos prelimares establecidos en una primera etapa, y siguiendo todo el procedimiento correspondiente se llega a determinar los siguientes modelos de regresión múltiple para cada una de las clases de suelo estudiadas.

3.1.4.1 MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE SUELO A-4

Coeficiente de correlación y determinación

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,897(a)	,805	,791	,54184

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE LIQUIDO, LIMITE PLASTICO

Coeficientes de regresión múltiple

Coeficientes(a)

Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
		B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	5,225	,657		7,957	,000
	LIMITE LIQUIDO	,174	,034	,595	5,098	,000
	LIMITE PLASTICO	,157	,049	,370	3,171	,004

a Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Ecuación de modelo de regresión múltiple

$$1^* (\text{Humedad Optima}) = 5.225 + 0.157 * \text{Limite Plástico} + 0.174 * \text{Limite Liquido}$$

3.1.4.2 MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE SUELO A-6

Coeficiente de correlación y determinación

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,922(a)	,849	,839	,692939

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO, LIMITE LIQUIDO

Coeficientes de regresión múltiple

Coeficientes(a)

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	5,645	,979		5,767	,000
LIMITE LIQUIDO	,065	,054	,165	1,213	,004
LIMITE PLASTICO	,390	,068	,779	5,734	,000

a Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Ecuación de modelo de regresión múltiple

$$1^* (\text{Humedad Optima}) = 5.645 + 0.390 * \text{Limite Plástico} + 0.065 * \text{Limite Liquido}$$

3.1.4.3 MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE SUELO A-2-4

Coeficiente de correlación y determinación

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,914(a)	,835	,823	,53911

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO, LIMITE LIQUIDO

Coeficientes de regresión múltiple

Coeficientes(a)

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1 (Constante)	4,987	,865		5,763	,000
LIMITE LIQUIDO	,041	,049	,086	,836	,005
LIMITE PLASTICO	,392	,047	,855	8,291	,000

a Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Ecuación de modelo de regresión múltiple

$$1^* (\text{Humedad Optima}) = 4.987 + 0.392 * \text{Limite Plástico} + 0.041 * \text{Limite Liquido}$$

3.1.4.4. MODELO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE SUELO A-2-6

Coeficiente de correlación y determinación

Resumen del modelo

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación
1	,941(a)	,885	,876	,68256

a Variables predictoras: (Constante), LIMITE PLASTICO, LIMITE LIQUIDO

Coeficientes de regresión múltiple

Coeficientes(a)

Modelo	Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	t	Sig.
	B	Error típ.	Beta		
1	(Constante)	3,838	,900	4,267	,000
	LIMITE LIQUIDO	,124	,057	,298	,003
	LIMITE PLASTICO	,351	,072	4,882	,000

a Variable dependiente: HUMEDAD OPTIMA

Ecuación de modelo de regresión múltiple

$$1 * (\text{Humedad Optima}) = 3.838 + 0.351 * \text{Limite Plástico} + 0.124 * \text{Limite Liquido}$$

En los subtítulos anteriores se realizó la interpretación de todos los valores que contienen las tablas que se muestran. También se interpretó todos los coeficientes que conforman el modelo de regresión para cada tipo de suelo.

3.1.5. APLICACIÓN PRÁCTICA

El análisis de regresión lineal múltiple realizado en el trabajo de tesis, es una técnica estadística utilizada para predecir un amplio rango de fenómenos, desde medidas

económicas, predecir eventos, caracterizar la relación entre variables o calibrar medidas, etc.

En nuestro caso el análisis de regresión realizado se utiliza para explorar y cuantificar la relación entre la variable dependiente llamada humedad óptima y las variables independientes definidas como límite líquido y límite plástico, donde se desarrollo una ecuación la cual nos sirve para predecir los valores de humedad óptima de un suelo en función a las propiedades de plasticidad. Las predicciones realizadas con los modelos de regresión definidos cumplen con una serie de reglas las cuales aseguran que la variable respuesta (humedad óptima) tenga un poder explicativo significativo, demostrando con esto el alto grado de interconexión que existen entre las propiedades de suelo estudiadas.

Como se menciona en el capítulo anterior, El análisis que se realizó para definir las clases de suelo que intervendrán en la ejecución del trabajo se lo hizo considerando los siguientes puntos:

1. La investigación planteada con el trabajo de tesis, de inicio pone una condición que deben cumplir los suelos; estos deben presentar características de plasticidad,
2. Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen de los materiales con los que se trabaje, y como el método que se utilizó en laboratorio para compactar y determinar el contenido de humedad óptima del suelo fue mediante impacto ósea utilizando equipo de Proctor Modificado, y este método no es recomendable para suelos friccionantes o granulares, esta clase de suelos por las razones ya explicadas se los omitió en la ejecución del trabajo.
3. En la zonificación realizada en la ciudad de Tarija en función al tipo de suelo se puede evidenciar la presencia de una gran variedad de suelos, estos en porcentajes pequeños con referencia a los suelos que caracterizan una cuenca sentada en el periodo cuaternario, periodo que cuenta en su estructura con los sedimentos aluviales, fluviales y lacustres; si bien como se menciona existe en

la zona en estudio diferentes tipos de suelos para el análisis, pero por razones ya explicadas solo se considero los suelos mas predominantes.

Teniendo en cuenta lo citado, las cuatro ecuaciones de los modelos de regresión múltiple establecidas solo tienen una aplicación práctica para las clases de suelos definidas que son: suelo A-4, A-6, A-2-4 y A-2-6 como se puede evidenciar los suelos utilizados deben de tener un $IP > 0$.

Para tener una buena aplicación práctica y tener una óptima estimación de la variable dependiente (humedad óptima) mediante el uso de los modelos de regresión múltiple se debe cumplir todas las restricciones y pasos establecidos en el presente trabajo.

Debemos tener en cuenta que en cada uno de los modelos de regresión establecidos, la bondad de ajuste varía, ya que los mismos poseen diferentes coeficientes de determinación (R^2) por lo cual los modelos que mayor poder explicativo son los que tienen (R^2) mas próximo a uno. Considerando los resultados de predicción mediante el uso de los modelos, se recomienda hacer uso de los resultados en anteproyectos o como datos comparativos ya que los mismos no cuentan con la exactitud requerida par un proyecto el cual demande resultados más precisos.

4.1 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

A la luz de los resultados obtenidos en este estudio e investigación sobre el grado de interconexión entre la humedad óptima y la plasticidad del suelo, los siguientes párrafos se constituyen en las conclusiones y recomendaciones más importantes derivadas del presente trabajo de investigación.

4.1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Podemos decir en función a la investigación realizada que la zona definida para el estudio, que es la parte urbana y suburbana de la ciudad de Tarija presenta en la parte superior un estrato de suelo que está compuesto de arcilla y arcilla limosa en un mayor porcentaje, encontrándose también en un buen porcentaje estratos compuestos de arenas arcillosas, arenas limosas y gravas arcillosas mezclas con limo y arena, estos últimos en un menor porcentaje.
- Tomando en cuenta las características topográficas de la zona y en función a las características de los suelos encontrados se verifico que la geomorfología y geología de la zona se identifica por pertenecer al periodo cuaternario (que tiene una edad aproximadamente de 1 millón de años) periodo que cuenta en su estructura con los sedimentos aluviales fluviales y lacustre.
- En función a la investigación realizada y considerando lo mencionado anteriormente determinamos que el principal agente generador del suelo existente en la zona en estudio es mediante una descomposición química siendo en principal agente para la generación de este suelo, el agua y los mecanismos de ataque son la oxidación, la hidratación y la carbonatacion, estos mecanismos producen arcilla como ultimo producto de descomposición.
- De los ensayos preliminares realizados y la obtención de los resultados de estos podemos concluir que los suelos en la zona urbana y suburbana de la ciudad

tienen una magnitud del campo plástico promedio de 9.8 % (solo considerando los suelos analizados) definiendo un grado de plasticidad mediana.

- Los resultados obtenidos del análisis estadístico realizado a los datos preliminares se establece que la plasticidad del suelo tiende a tener una relación lineal con la humedad óptima del suelo.
- En el proceso de clasificación del suelo, según los sistemas de clasificación AASHTO y SUCS se pudo verificar que realizada la clasificación según el sistema AASHTO a un número determinado de muestras de suelo, los cuales se clasificaron dentro del grupo de suelo A-4; estas mismas muestras clasificadas en el sistema SUCS tienen como resultado diferentes grupos de suelos, esto se presentó también en los suelos A-2-4 y A-2-6, pero no ocurrió lo mismo con el suelo A-6 ya que todos los suelos clasificados en el sistema SUCS dan como resultado un suelo CL. Por lo que se concluye que si se realiza una comparación de propiedades de grupos entre estos dos sistemas de clasificación el grupo A-6 tiene una relación perfecta con el grupo de suelo CL llegando a diferenciarse de las comparaciones realizadas entre estos dos sistemas de clasificación por diferentes autores.
- En el análisis y estudio realizado para determinar el modelo matemático en cada uno de los suelos analizados se pudo apreciar que el límite plástico es la variable independiente que tiene más importancia o peso para poder determinar el contenido óptimo de humedad del suelo, esto se puede aseverar en función al coeficientes de regresión estandarizados que se determinaron para definir cada uno de los modelos.
- Las variables independientes definidas que son límite líquido y límite plástico contribuyen en forma significativa a explicar lo que ocurre con la variable dependiente, ya que según el análisis estadístico realizado estas tienen un gran

poder explicativo en la ecuación, por lo cual se rechaza la posibilidad de que estos coeficientes puedan tener un valor de cero.

- como se demostró según la investigación realizada, el grado de interconexión o correlación empírica que existe entre la humedad optima determinada mediante ensayo de compactación T-180 y los limites de plasticidad de los suelos (limite liquido, limite plástico) es explicada y validada según los resultados obtenidos en el trabajo de tesis, los cuales se muestran en un capitulo anterior, por lo cual se pone en consideración como una alternativa de solución a los problemas de compactación de los suelos en la región.
- El análisis de regresión múltiple realizado en el trabajo de tesis, es una técnica estadística utilizada para predecir un amplio rango de fenómenos, desde medidas económicas, predecir eventos, caracterizar la relación entre variables o calibrar medidas, etc. En nuestro caso el análisis de regresión realizado se utiliza para explorar y cuantificar la relación entre la variable dependiente llamada humedad óptima y las variables independientes definidas como limite liquido y limite plástico
- Las predicciones realizadas con los modelos de regresión múltiple definidos cumplen con una serie de reglas las cuales aseguran que la variable respuesta (humedad óptima) tenga un poder explicativo significativo, demostrando con esto el alto grado de interconexión que existen entre las propiedades de suelo estudiadas.

4.2. RECOMENDACIONES

- Los modelos de ecuación de regresión múltiple definidos presentan algunas restricciones para su utilización ya que en su determinación no se considero

todos los grupos de suelos existentes en los sistemas de clasificación, también se debe tener en cuenta que se definió como zona de estudio la parte urbana y suburbana de la ciudad y se considero solo a suelos que presenten características plásticas, por lo citado es necesario considerar estos antecedentes.

- Se debe de tener mucha cautela en utilizar los modelos definidos ya que si se introducen datos que no son reales la ecuación de regresión múltiple nos arrojará datos no reales. Por esta razón se debe de tener algunos conocimientos básicos del tema antes de su utilización

- Debemos tener en cuenta que en cada uno de los modelos de regresión múltiple establecidos, la bondad de ajuste varía, ya que los mismos poseen diferentes coeficientes de determinación (R^2) por lo cual los modelos que mayor poder explicativo son los que tienen (R^2) mas próximo a uno. Considerando los resultados de predicción mediante el uso de los modelos, se recomienda hacer uso de los resultados en anteproyectos o como datos comparativos ya que los mismos no cuentan con la exactitud requerida por un proyecto el cual demande resultados más precisos.