

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Cuando se desea construir un proyecto vial, un factor importante a considerar es el tipo de suelo en el que se va a desarrollar la carretera y los factores que afectan en su resistencia, porque distintos tipos de suelos tienen distintos valores de C.B.R. de acuerdo a estos valores, se determinará si el suelo cumple con las especificaciones técnicas que requiere una subrasante para un proyecto de carretera.

El aporte realizado en el presente proyecto es realizar una evaluación del C.B.R. in situ y el C.B.R. de laboratorio sumergido, permitiendo mostrar con claridad los índices de calidad de los suelos basados en su resistencia, en un suelo compactados en laboratorio y otro en condiciones naturales y las relaciones que presentan con otras variables en este caso con la densidad in situ.

hoy en día es importante hacer estudios de suelos a nivel de subrasantes para conocer la resistencia de los suelos y si estos cumplen con las especificaciones técnicas, es fructífero evaluar por lo que no se cuenta con estudios y debido al crecimiento poblacional en el Distrito 12 lo cual se convierte en una problemática social donde existen calles en mal estado.

El ensayo aplicado será, el método de prueba estándar para C.B.R. de suelos en el lugar (C.B.R. in situ) y C.B.R. en laboratorio que fue utilizado para determinar el C.B.R. para evaluar la capacidad de soporte del suelo en subrasantes. El valor de C.B.R. obtenido en estos ensayos forman una parte integral de varios métodos de diseño de pavimentos flexibles para el cual el presente estudio será un referente para proyectos futuros.

El ensayo de densidad in situ mediante el cono de arena permitirá determinar la densidad in situ de suelos de subrasante del Distrito 12, para así poder conocer la calidad del suelo, el grado de compactación, relacionando la densidad máxima seca de la curva de

compactación. El ensayo aplicado será el cono de arena, el cual determina el volumen de un agujero utilizando una arena estandarizada de granulometría redondeada y partículas no cementadas.

El presente proyecto se realizó en 30 diferentes puntos en subrasantes del Distrito 12, en los cuales los resultados obtenidos con el C.B.R. in situ son en menor tiempo que el obtenido en laboratorio, esto ayuda a optimizar los tiempos en obra. Así mismo estos mismos puntos fueron analizados en laboratorio determinando los C.B.R. en laboratorio.

También el presente trabajo tiene la finalidad de dar mayor confiabilidad al uso del C.B.R. in situ para la evaluación de subrasantes y determinar si estos cumplen para el uso de subrasante y unas de las ventajas de este método es que se optimiza el tiempo y costo en obra, una vez realizado el ensayo en campo ahí mismo podemos conocer el valor de C.B.R. lo cual ahorra el trabajo de obtener muestras y llevar a laboratorio y que estos sufran modificaciones por el tiempo y distancia que se encuentre al proyecto.

1.2 Situación problemática

En los últimos meses se notó las fallas que se presentan en subrasantes del Distrito 12, ocasionados por vehículos pesados y por condiciones de humedad producto de las lluvias y la falta de mantenimiento y en algunos casos no presentan ni material de revestimiento es por eso que se plantea una evaluación del C.B.R. in situ y el C.B.R. de laboratorio sumergido, permitiendo mostrar con claridad los índices de calidad de los suelos basados en su resistencia, en un suelo compactado en laboratorio y otro en condiciones naturales y las relaciones que presentan con otras variables en este caso con la densidad in situ.

Existen estudios como el de Ichazo Llanos, (2009) que hace un análisis de subrasantes en suelos arcillosos mediante la correlación empírica sensibilidad y C.B.R. que menciona la importancia de realizar buenos estudios de suelos para reducir el problema de costosos mantenimientos de las carreteras, con el objeto de buscar alternativas de mejoramiento de suelos basados en estudios más detallados en laboratorio llegando a resultados dentro de los parámetros mínimos establecidos en las especificaciones técnicas en consecuencia los terraplenes tienen condiciones de funcionamiento mínimas aceptables, es necesario una

mejora de sus características mecánicas ya sea estabilizando o cambiando el material de las subrasantes.

El estudio de suelos a nivel de subrasantes en suelos finos es de gran importancia ya que este tipo de suelos no es apto por no cumplir las especificaciones técnicas que rigen las normas de diseño de carreteras, si hay algo que nos enseña los métodos de diseño es que suelos granulares son los que mejor resisten a esfuerzos, hoy en día es importante hacer estudios de suelos a nivel de subrasantes para conocer la resistencia de los suelos y si estos cumplen con las especificaciones técnicas o hay que cambiar el material o estabilizar el suelo.

Las exigencias o el control de calidad en lo que se refiere a la construcción de las subrasantes de caminos municipales, es menor en relación a otro tipo de caminos como los interprovinciales e interdepartamentales. Lo que ocasiona que los caminos municipales tengan ciertas deficiencias y una vida útil corta debido a que se producen deformaciones en las subrasantes y por ende también en la capa de rodadura provocando en muchos casos cortes en el tránsito vehicular y peatonal.

Por tal motivo es importante evaluar la capacidad soporte del suelo en las distintas subrasantes del Distrito 12 con estos datos y resultados se conoce el tipo de suelo y su capacidad soporte para usos de carreteras para resolver varios problemas de mal estado de carreteras y que sea un punto de referencia para nuevos proyectos.

1.2.1 Problema

¿Cuál es la ventaja de conocer las propiedades índices, la clasificación y las propiedades mecánicas de los suelos, que intervienen en la capacidad soporte del suelo, para determinar si es apta para el uso de subrasante, que podrían aplicarse en la iniciación de un pavimento en el Distrito 12?

1.2.2 Relevancia y factibilidad del problema

Es importante estudiar este problema para evaluar los resultados de un C.B.R. In Situ y los resultados de un C.B.R. en laboratorio en subrasantes.

En nuestro medio, aún no es muy frecuente el ensayo de C.B.R. In Situ, porque no hay la confiabilidad de sus resultados, sin embargo, el Laboratorio de Suelos de la U.A.J.M.S. cuenta a disposición dicho equipo.

Por lo tanto, el equipo de C.B.R. In Situ puede ser utilizado directamente en obra para los estudios de C.B.R. que se realicen en subrasantes, capas sub-base y base de un paquete estructural de pavimento.

1.2.3 Delimitación temporal y espacial del problema

El presente estudio se realizó dentro del Distrito 12 de la ciudad de Tarija, en subrasantes que no fueron mejoradas, ni contaban con paquete estructural.

Por las condiciones del estudio, se realizaron ensayos in situ y en laboratorio. Los ensayos in situ fueron: C.B.R. In Situ, densidad In Situ, y extracción de muestras de suelo, los mismos que se realizaron en un tiempo de 3 meses. Los ensayos en laboratorio fueron: C.B.R. convencional, compactación, humedad natural, granulometría, límites de consistencia Atterberg y clasificación, los mismos que fueron realizados en un tiempo aproximado de 9 meses.

1.3 Justificación

El presente estudio de evaluación de la capacidad soporte del suelo para usos de carreteras va a contribuir con aporte de datos y resultados obtenidos en 30 diferentes puntos del Distrito 12, el cual en este distrito se ha identificado que en estos últimos años tiene un alto crecimiento poblacional con diferentes centros deportivos en el barrio San Blas, en el que concentrará población cuando se realice eventos deportivos, también así mismos centros turísticos y de hospedaje en el barrio Aranjuez y una amplia zona residencial en el barrio Miraflores. A través del presente estudio se conocerá los tipos de suelos, la capacidad soporte del suelo y si estas cumplen como subrasantes y podrá resolver parte de los problemas sociales, empresariales.

Este estudio aportará información sobre la evaluación de la capacidad soporte del suelo, si cumplen como el uso de subrasantes, asimismo se tendrá información del grado de

compactación, la humedad óptima, brindará aportes para poder prever calles en mal estado, planificar mantenimiento de carreteras, los que se beneficiarán con el proyecto serán la alcaldía ya que les ayuda a resolver un problema práctico y con estos datos poder planificar mejor con la labor del mantenimiento de las calles, los resultados no se podrán generalizar porque cada punto estudiado tiene diferente comportamiento del suelo, pero sin embargo se podrá agrupar de acuerdo a los grupos de suelos según la clasificación AASHTO.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Evaluar la capacidad soporte del suelo, in situ y en laboratorio, en subrasantes del Distrito 12 de la ciudad de Tarija.

1.4.2 Objetivos específicos

- Caracterizar los suelos mediante los ensayos de contenido de humedad, análisis granulométrico por tamizado, determinación del límite líquido, determinación del límite plástico e índice de plasticidad.
- Realizar los ensayos de resistencia y deformación de los suelos tales como; relación de peso unitario – humedad en los suelos por el método modificado y determinación de la capacidad soporte del suelo en laboratorio.
- Realizar los ensayos in situ tales como; peso unitario por el método del cono de arena y relación de soporte de suelo in situ.
- Evaluar la capacidad soporte del suelo (C.B.R.) in situ y de laboratorio.
- Elaborar un mapa con los resultados obtenidos.

1.5 Hipótesis

Los C.B.R. in situ son menores que los C.B.R. en laboratorio.

1.6 Operacionalización de las Variables

1.6.1 Variables independientes

- Índice de capacidad soporte del suelo.

1.6.2 Variable dependiente

- Contenido de humedad.
- Análisis granulométrico por tamizado.
- Peso específico.
- Granulometría por Hidrómetro.
- Límite líquido.
- Límite plástico e índice de plasticidad.
- Humedad óptima.
- C.B.R. en laboratorio.
- Densidad in situ.
- C.B.R. in situ.

1.7 Identificación del tipo de investigación

Investigación descriptiva comparativa. - Tienen como objetivo lograr la identificación de diferencias o semejanzas con respecto la capacidad soporte de suelos en campo como en laboratorio del Distrito 12. Comparan características y variables entre dos o más datos.

1.8 Unidades de estudio y decisión muestral

1.8.1 Unidades de estudio

La unidad de estudio es única y es el suelo en subrasantes de 30 puntos distribuidos en el Distrito 12 de la ciudad de Tarija.

La unidad o área de estudio es la de identificar el índice de capacidad soporte del suelo in situ y en laboratorio de las diferentes subrasantes del Distrito 12.

1.8.2 Población

La población del proyecto es subrasantes en el Distrito 12 de la ciudad de Tarija, comprende 5 barrios: San Blas, Miraflores, German Bush, San Martín y Aranjuez.

1.8.3 Muestra

Se extraerá suelo de 30 diferentes puntos de subrasantes del Distrito 12 para la caracterización y análisis en laboratorio también se realizará los ensayos de C.B.R. in situ y densidad in situ en cada punto.

1.8.4 Selección de las técnicas de muestreo

La técnica de muestreo que se utiliza es: muestreo no probabilístico aplicando el muestreo por criterio. Se eligió una muestra de 30 puntos teniendo en cuenta calles a nivel de subrasante y parqueo, distribuidas de acuerdo al área de cada barrio del Distrito 12 que se encuentran georreferenciadas en el capítulo III.

1.9 Método y técnicas empleada

1.9.1 Métodos

Para realizar el presente estudio se aplicaron dos métodos fundamentales:

Método en laboratorio. – Este método de estudio se caracteriza por contar con medios necesarios para realizar investigaciones, experimentos, prácticas y trabajos de carácter científico, tecnológico o técnico; está equipado con instrumentos específicos de medida o equipos especializados y calibrados, con los que se realizan experimentos, investigaciones y prácticas diversas.

Estos laboratorios se encuentran dentro de una estructura cerrada, proporcionando un ambiente ideal climatológicamente y en óptimas condiciones de limpieza. En estos espacios, las condiciones ambientales se controlan y se normalizan para evitar que se produzcan influencias extrañas a las previstas, con la consecuente alteración de las mediciones, y para permitir que las pruebas sean repetibles.

Las pruebas en laboratorio, también funcionan como complemento para un estudio in situ, y varía según la investigación.

Método in situ. – Este método de estudio designa el análisis de un fenómeno exactamente en el lugar y condiciones donde el mismo se desarrolla (sin desplazamiento a un medio o lugar especial, y sin modificación de las condicionantes usuales o naturales).

Las investigaciones in situ son esenciales para obtener parámetros y propiedades geológicas-geotécnicas que constituyen el terreno donde se va realizar el estudio.

Los equipos son diseñados para trabajar en campo, soportar las inclemencias climatológicas, y tienen características diferentes a los equipos de laboratorio.

1.9.2 Técnicas

Según el método empleado, se utilizaron las siguientes técnicas:

C.B.R. en laboratorio. – El ensayo C.B.R. (California Bearing Ratio: Ensayo de Relación de Soporte de California), según la norma ASTM D1883, se lo realiza en laboratorio y mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo y para poder evaluar la calidad del terreno para subrasante, sub base y base de pavimentos. Se efectúa bajo condiciones controladas de humedad y densidad.

Este es uno de los parámetros necesarios obtenidos en los estudios geotécnicos previos a la construcción, como también lo son el ensayo proctor y los análisis granulométricos del terreno.

C.B.R. in situ. – El Ensayo C.B.R. In Situ (California Bearing Ratio In Place: Ensayo de Relación de Soporte de California en el Sitio), según la norma ASTM D4429, se lo realiza en el lugar y mide la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo. Este ensayo se usa para la evaluación de la calidad de las subrasantes, pero también es aplicable a materiales de subbase y base.

Se utiliza el ensayo in situ para determinar su C.B.R. con el fin de evaluar. Los parámetros que contribuyen a los resultados son la humedad natural y la densidad in situ.

Densidad in situ. – Esta técnica nos permite conocer la densidad que posee un suelo en terreno o en su estado natural, según la norma ASTM D1556, se realiza para comprobar el grado de compactación en suelos naturales, subrasantes, sub-bases, bases y otros tipos de rellenos compactados artificialmente.

Entre los métodos utilizados, se encuentran el método del cono de arena, el del balón de caucho e instrumentos nucleares entre otros. Para la presente investigación se utilizó del cono de arena. Este ensayo representa una forma indirecta de obtener el volumen del agujero utilizando para ello, una arena estandarizada.

1.9.3 Organización

Se dio a conocer a los presidentes de barrio del proyecto que se está realizando en el Distrito 12.

Se realizó un cronograma de actividades para la extracción de muestras y la realización de los ensayos en campo.

1.10 Procedimiento para recolectar la información

La recolección de muestras se realizó de acuerdo a la norma establecida en el manual de carreteras de la A.B.C. el cual establece los procedimientos para la preparación, toma y transporte de muestras.

1.10.1 Sistematización

La sistematización de los datos se realizó en el software Excel, Word, Google Earth, Arc Gis, Civil 3D.

1.10.2 Recursos

- Humano: Elaborado por el investigador.
- Materiales: Papel, lapiceros, borradores y lápices.
- Equipos: Volqueta de 2 ejes de peso de 8 Toneladas y equipo de laboratorio.

- Herramientas: Pico, pala, martillo, cuchara, espátula, brocha y cincel.
- Financieros: Financiado por el investigador.
- Tecnológicos: Microsoft office, AutoCAD, Civil3D, Arc Gis, Google Earth y Zoom.

1.11 Alcance de la investigación

El ensayo del C.B.R. “in situ”, tiene como propósito de obtener valores sobre el material existente. Además, cabe notar que este ensayo evita la obtención de muestras, lo que es una gran ventaja ahorrando tiempo y costos en obras viales.

El ensayo de cono de arena, este método se emplea para la determinación de la densidad de suelos en el lugar (in situ). Este método de ensayo se aplica a suelos que no contengan una cantidad excesiva de roca o materiales gruesos con un diámetro mayor a 2 pulgadas (50 mm).

El alcance de la investigación es descriptivo se enfoca en describir la capacidad soporte de suelos en campo como en laboratorio y la densidad en las diferentes subrasantes del Distrito 12.

Se tiene 30 diferentes subrasantes bien ubicadas con una distribución de acuerdo al área de cada barrio que componen el Distrito 12, 8 puntos en el barrio San Blas, 7 puntos en el barrio Miraflores, 4 puntos en el barrio German Bush, 2 puntos en el Barrio San Martín y 9 puntos en el barrio Aranjuez.

CAPÍTULO II

C.B.R. IN SITU Y C.B.R. EN LABORATORIO EN
SUBRASANTES DE SUELOS FINOS Y
GRANULARES

CAPÍTULO II

C.B.R. IN SITU Y C.B.R. EN LABORATORIO EN SUBRASANTES DE SUELOS FINOS Y GRANULARES

2.1 Introducción

Para conocer a mayor profundidad la importancia del C.B.R., es necesario tener en claro los conceptos básicos de lo que es un suelo, sus características y evaluar la capacidad soporte en C.B.R. realizado en laboratorio y el C.B.R. In Situ, de los suelos de las subrasantes en estado natural.

Para ello es necesario conocer algunos conceptos relevantes con este proyecto.

2.2 Subrasante

Subrasante se denomina al suelo que sirve como fundación para todo el paquete estructural de un pavimento. En la década del 40, el concepto de diseño de pavimentos estaba basado en las propiedades ingenieriles de la subrasante. Estas propiedades eran la clasificación de suelos, plasticidad, resistencia al corte, susceptibilidad a las heladas y drenaje. Desde las postrimerías de la década del 50, se puso más énfasis en las propiedades fundamentales de la subrasante y se idearon ensayos para caracterizar mejor a estos suelos. Ensayos usando cargas estáticas o de baja velocidad de deformación tales como el C.B.R., compresión simple son reemplazados por ensayos dinámicos y de repetición de cargas, que representan mucho mejor lo que sucede bajo un pavimento en lo concerniente a tensiones y deformaciones.

Las propiedades de los suelos pueden dividirse en dos categorías:

- **Propiedades físicas.** - Son usadas para selección de materiales, especificaciones constructivas y control de calidad.
- **Propiedades ingenieriles.** - Dan una estimación de la calidad de los materiales para caminos. La calidad de los suelos para subrasantes se puede relacionar con el

valor soporte del suelo (C.B.R.), el módulo resiliente, el módulo de Poisson y el módulo de reacción de la subrasante.

2.3 Características de los suelos.

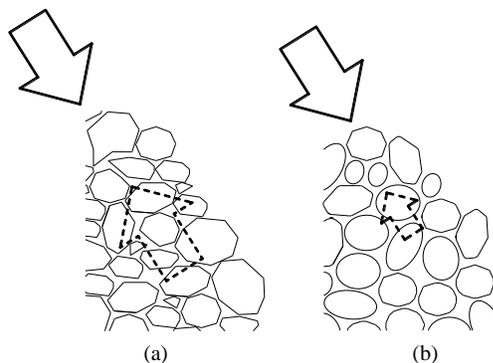
Existe una gran variedad de suelos con características diferentes, por lo que se los clasifica en diferentes categorías y tipos. Las propiedades índices del suelo, se refiere a las características particulares que identifican a un suelo de una misma categoría, estas son: *granulometría, consistencia, cohesión y estructura*. Conociendo toda esta información del suelo, se puede anticipar su comportamiento y la metodología que se seguirá al tratar con aquel tipo de suelo, CAMPOS (2005).

2.3.1 Estructura y cohesión del suelo.

Se define estructura del suelo como al arreglo geométrico de las partículas del suelo respecto unas de otras. Existen varios factores que influyen en la estructura de suelo como ser: la textura, tamaño, composición mineralógica de las partículas y el contenido de agua del suelo.

La cohesión del suelo se refiere a la capacidad que tienen las partículas del suelo de permanecer unidas como conjunto, como resultado de la trabazón conjunta o las microestructuras existentes en el suelo.

Figura 2.1 Estructuras que dan cohesión a los suelos granulares.



(a) Partículas con textura angular. (b) Partículas con textura redondeada.

Fuente: Das B. M., 1999

Para el caso de suelos compuestos de partículas con forma granular, la trabazón entre partículas origina estructuras granulares simples y la fricción que se origina entre ellas contrarresta el deslizamiento de unas respecto a otras, como se muestra en la Figura 2.1. A este comportamiento se lo identifica como la cohesión para el caso de suelos granulares, donde el suelo presenta resistencia contra su disgregación ocasionada por un agente externo.

El grado de cohesión que presentan los suelos granulares, está en función a la textura de las partículas de forma granular. Las partículas con textura angular (Figura 2.1.a) logran que el suelo tenga cohesión, mientras que las partículas con textura redondeada (Figura 2.1.b) no contribuyen a la cohesión del suelo.

La forma de hojuela, el tamaño y la carga eléctrica negativa superficial de las partículas compuestas de minerales de arcilla, da lugar a que estas partículas generen fuerzas de atracción y repulsión entre ellas, originando estructuras que se muestran en la Figura 2.2.

Figura 2.2 Estructura de las partículas de arcilla sedimentadas



(a) Partículas floculadas. (b) Partículas dispersas.

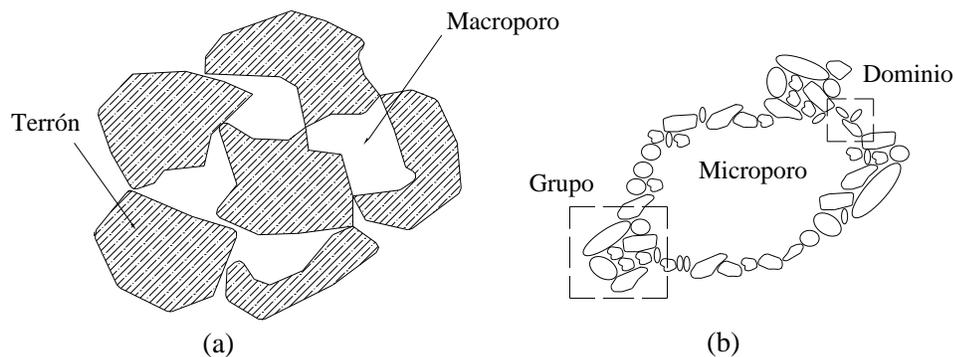
Fuente: Whitlow, 1994

Los iones que forman la superficie en hojuelas de los minerales de arcilla son O^- y $(OH)^-$ por lo que estas superficies tienen una carga eléctrica negativa. Puesto que las moléculas de agua son bipolares, es decir que tienen un extremo positivo y negativo, la superficie negativa del mineral de arcilla atrae a las moléculas de agua, por lo que se forma una capa de agua que queda unida a la superficie del mineral por medio de un enlace de hidrógeno $(H_3O)^+$.

La fuerza de atracción denominada fuerza de Van der Waals, se incrementa cuando el espesor de la capa de agua absorbida disminuye por un proceso de intercambio básico, lo

que origina que las partículas suspendidas en agua se acerquen cada vez más. Cuando la capa absorbida es lo suficientemente delgada para que dominen las fuerzas de atracción, al sedimentarse se forman grupos de partículas con sus superficies en contacto entre extremo positivo–negativo (Figura 2.3.a), lo que se llama *floculación*. Este comportamiento de las partículas de minerales de arcilla da cohesión a la masa de suelo, manteniéndola unida.

Figura 2.3 Estructuras microscópicas que dan cohesión al suelo.



(a) Macroestructura. (b) Microestructura

Fuente: Das B. M., 1998

En un depósito de sedimento compuesto de partículas floculadas de minerales de arcilla, se observa en la Figura 2.3, que se forman diferentes unidades estructurales microscópicas.

En la Figura 2.3.b, se ve que la unión de una cantidad pequeña de partículas de minerales de arcilla es llamada: *dominios*, un conjunto de dominios agrupado por las fuerzas interparticulares es llamado *grupo*, un grupo de dominios y racimos establecen una microestructura que encierran vacíos llamados microporos. Los racimos en grandes grupos forman un *terrón* (Figura 2.3.a) que son las unidades más grandes y pueden ser vistos sin un microscopio, estos agrupados en conjunto establecen una macroestructura que forma vacíos llamados macroporos. Por lo general la relación de vacíos con respecto a sólidos en un suelo compuesto de partículas arcillosas es mayor que en el caso de suelos con partículas granulares.

Las partículas de arcilla pueden tener una fuerza repulsiva si presentan cargas positivas en su superficie, por lo que sus bordes cargados se alejaran (Figura 2.2.b). Debido a la abundante presencia de carbonatos y algunos minerales como el sodio o cuando se agrega una solución salina, las partículas cuya capa de agua adsorbida es doble (guesa) se repelerán con mayor magnitud. Este comportamiento de las partículas de minerales de arcilla no contribuye a que la masa de suelo tenga cohesión.

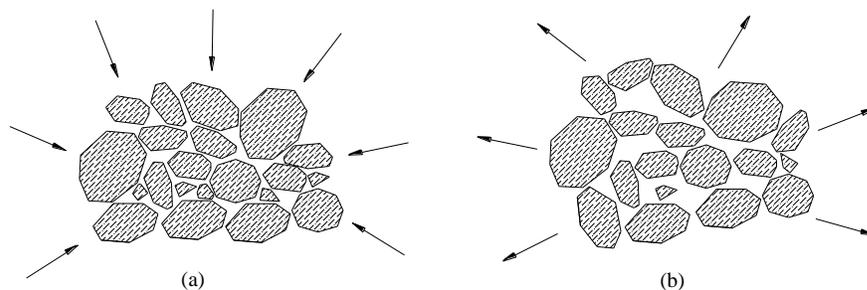
2.3.2 Consistencia del suelo.

La consistencia se define como la firmeza o solidez que presenta la masa de suelo, esta característica particular del suelo está estrechamente relacionada a las estructuras que las partículas del suelo forman entre sí. Para el caso de suelos de grano grueso la textura y la forma de ubicación de las partículas dentro la masa de suelo determina la consistencia, mientras que en los suelos finos el contenido de humedad define la consistencia ya que el agua contribuye a la cohesión, debido a las propiedades eléctricas de los minerales de arcilla.

2.3.3 Densidad relativa de los suelos (D_r).

Debido a la variedad de formas que tienen las partículas de textura granular en suelos de grano grueso, estas pueden acomodarse de diversas maneras en la masa de suelo, donde para cada caso variará el índice de vacíos. La Figura 2.4, muestra una porción de suelo con diferentes formas de empaquetamiento de sus partículas.

Figura 2.4 Formas de empaquetamiento de las partículas del suelo.



(a) Densa. (b) Suelta.

Fuente: Das B. M., 1998

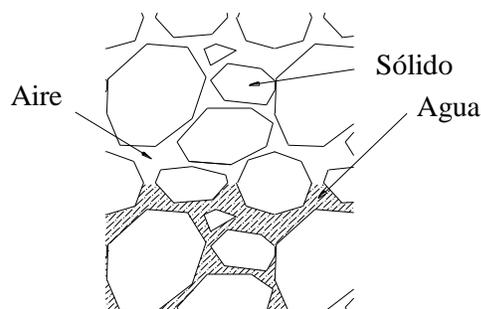
En la Figura 2.4.a, las partículas están acomodadas de tal manera que la cantidad de vacíos es mínima, a diferencia de la forma de empaquetamiento en la Figura 2.4.b que tiene una mayor cantidad de vacíos. Se llama compactación a la forma de empaquetamiento que tienen las partículas del suelo dentro su masa lo cual determinará el índice de vacíos del suelo, este concepto de compactación solo será aplicable a suelos con partículas de textura granular.

Cada suelo tiene una compactación de tal manera que el índice de vacíos sea el mínimo, logrando un suelo denso (Figura 2.4.a) o caso contrario un suelo suelto que tendrá un índice de vacíos máximo (Figura 2.4.b).

2.3.4 Fases del suelo.

En la Figura 2.5, se muestra una fracción de suelo agrandada de tal manera que pueden observarse los espacios vacíos entre partículas. De acuerdo a la definición de suelo desde el punto de vista ingenieril, se concluye que éste principalmente está compuesto por: materia sólida, líquida y gaseosa, a cada uno de estos componentes principales se denomina fase del suelo. El comportamiento del suelo depende de la cantidad relativa de cada una de estas tres fases, ya que estas interactúan entre sí.

Figura 2.5 Composición del suelo

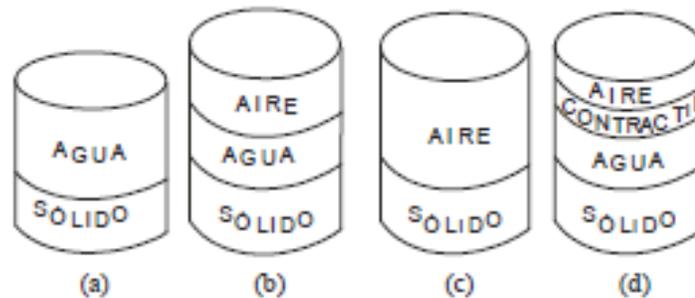


Fuente: Das B. M., 1998

La fase sólida está compuesta de partículas diminutas derivadas de la roca o sedimento producto de la meteorización o incluso materia orgánica. La fase líquida, corresponde al

agua que se ubica en los espacios vacíos entre partículas. La fase gaseosa corresponde al aire, los espacios vacíos los restantes que no ocupa el agua son ocupados por el aire.

Figura 2.6 Estados del suelo.



(a) Saturado. (b) No saturado. (c) Seco. (d) No saturado contráctil.

Fuente: Elaboración Propia

- **Suelo saturado.** - La Figura 2.6.a, corresponde al estado del *suelo saturado*. Este estado del suelo contiene únicamente dos fases: la fase sólida y líquida. Se lo llama saturado, porque todos los espacios vacíos están llenos de agua.
- **Suelo no saturado.** - El estado de suelo de la Figura 2.6.b, corresponde al suelo no saturado, llamado también húmedo. Posee: la fase sólida, líquida y gaseosa simultáneamente. Los vacíos están ocupados por aire y agua.
- **Suelo seco.** - Este estado de suelo mostrado en la Figura 2.6.c, incluye solo dos fases: la fase sólida y la gaseosa, es decir que el suelo no contiene agua.
- **Suelo no saturado contráctil.** - El estado de suelo de la Figura 2.6.d, incluye las tres fases de suelo, además de una cuarta fase denominada contráctil. Esta cuarta fase es independiente y llega originarse como resultado de la interfase aire-agua, su problema predominante es su expansión y contracción, por lo que su estudio entra en otra categoría de la mecánica de suelos.

2.4 Distribución del tamaño de partículas.

De acuerdo al tamaño predominante de partículas que contenga el suelo, los suelos generalmente son llamados: grava, arena, limo, arcilla o una mezcla de ellos.

Tabla 2.1 Sistemas para identificar el tamaño de partículas del suelo

| Nombre de la organización | Tamaño de partículas en mm | | | |
|---|----------------------------|--------------|--------------------------------|---------|
| | Grava | Arena | Limo | Arcilla |
| Massachusetts Institute of Technology (MIT) | >2 | 2 a 0.06 | 0.006 a 0.002 | <0.002 |
| U.S. Department of Agriculture (USDA) | >2 | 2 a 0.05 | 0.05 a 0.002 | <0.003 |
| American Association of State Highway and Transportation (AASHTO) | 76.2 a 2 | 2 a 0.075 | 0.075 a 0.002 | <0.004 |
| Unified Soil Classification System (US) | 75 a 4.75 | 4.75 a 0.075 | Finos(limos y arcillas) <0.075 | |

Fuente: Das B. M., 1998

Diversas organizaciones que estudian aspectos relacionados con el suelo han elaborado sistemas de clasificación para identificar el tamaño de las partículas de un suelo para sus propósitos específicos. En la Tabla 2.1, se muestra algunos de los sistemas más conocidos empleados por estas organizaciones para identificar las partículas del suelo.

El sistema de clasificación unificado (USCS) ha sido adoptado como el estándar por la ASTM (American Society for Testing and Materials) y el reglamento que esta sociedad ha desarrollado para el análisis y estudio del suelo es aceptado a nivel internacional.

Grava.

Según la norma ASTM D2487 el tamaño de estas partículas varía de 75 a 4.75 mm, estas a su vez están divididas en dos categorías: *grava gruesa* que está comprendida entre 75 y 19 mm y *grava fina* que está comprendida entre 19 y 4.75 mm.

Las gravas son acumulaciones sueltas de fragmentos de roca de textura redondeada, debido al desgaste que sufren las partículas al ser transportadas por las corrientes de los ríos. Como material suelto suele encontrarse en los lechos, márgenes, en los conos de deyección de los ríos y suele encontrarse depósitos con grandes cantidades.

Arena.

Se llama arena a las partículas granulares de textura variada procedentes de la desintegración de las rocas o de su trituración artificial y cuyo tamaño según la norma ASTM D2487 varía entre 4.75 a 0.075 mm, la arena está clasificada en tres categorías: *arena gruesa* que tiene un tamaño de 4.75 a 2 mm, la *arena mediana* de un tamaño comprendido entre 2 y 0.425 mm y *la arena fina* comprendida entre 0.425 y 0.075 mm.

El origen y la existencia de la arena es análoga a la de la grava, comunmente las dos suelen encontrarse juntas en el mismo depósito. Principalmente está compuesta de cuarzo y otros minerales que dan resistencia mecánica a las partículas.

Limo.

El limo es una partícula mineral pequeña de textura granular o escamosa, que suele encontrarse en las canteras y en los ríos. El tamaño de las partículas de limo según la norma ASTM D2487 es menor a 0.075 mm. Su color varía desde gris claro a muy oscuro. El suelo compuesto por limo es relativamente impermeable, fácilmente erosionable.

Arcilla.

Se da el nombre de arcilla a las partículas sólidas de textura escamosa, compuestas de minerales de arcilla con un tamaño diminuto mucho menor a 0.075 mm. La arcilla químicamente es un silicato hidratado de: aluminio, hierro o magnesio. Las microestructuras que forman las partículas diminutas que componen la arcilla ocasionan que esta sea poco permeable y el contenido de humedad comunica a la masa de suelo la propiedad plástica.

Guijarro y canto rodado.

Existen partículas de mayor tamaño que la grava, según la norma ASTM D2487 a las partículas con tamaño comprendido entre 75 a 350 mm se las llama guijarro o bolón y a las que superan los 350 mm se las denomina canto rodado. Por lo general estos dos tipos de partículas son fragmentos de roca, constituyen ser componentes aislados del suelo y suelen aparecer sobre o por debajo de la superficie terrestre.

2.5 Propiedades índices de suelos.

El estudio del suelo, implica: determinar su propiedad índice, clasificarlo, conocer el comportamiento del agua en éste, su resistencia a esfuerzos externos y los límites respecto a su cambio de volumen. Una vez conocidas sus propiedades y comportamiento, pueden diseñarse estructuras que se ajusten a las condiciones específicas de cada suelo.

2.5.1 Contenido de humedad.

Esta propiedad física del suelo es de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están regidos, por la cantidad de agua que contienen. El contenido de humedad de un suelo es la relación del cociente del peso de las partículas sólidas y el peso del agua que guarda, esto se expresa en términos de porcentaje.

Es un ensayo usual de laboratorio para determinar la cantidad de agua presente en una cantidad de suelo en términos de su peso en seco. Si la determinación de este se hace en un suelo tal como se obtuvo en el terreno, se denomina humedad natural.

Las gravas y suelos arenosos pueden tener valores de humedad natural de 15 a 20%. Los suelos limosos y arcillosos sobre el 50 a 80% y no es raro tener humedades naturales del 500% en turbas y suelos orgánicos. En Japón se han registrado contenidos de humedad de más de mil por ciento, esto indica grandes problemas de suelo debido a que el peso del agua supera quince veces el peso del material sólido.

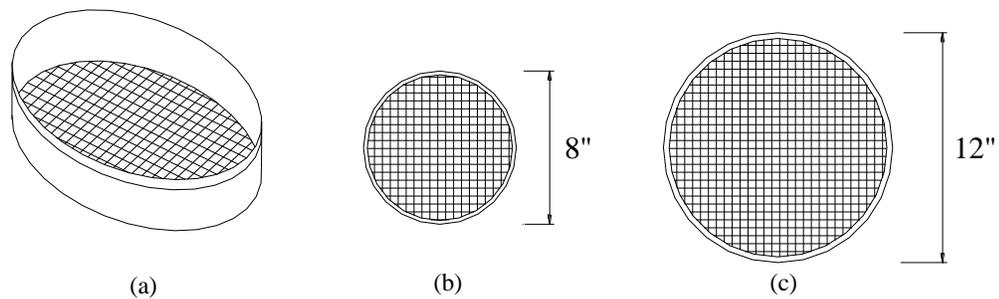
Algunos suelos orgánicos pueden descomponerse durante el secado al horno a la temperatura de 110°C. De acuerdo a la AASHTO 265, un secado a 60°C es más apropiado para dichos suelos.

2.5.2 Análisis mecánico por tamices.

Debido al tamaño de las partículas y la forma granular que presentan estos suelos, fácilmente puede clasificarse los distintos tamaños de las partículas que lo constituyen mediante tamices con diferentes aberturas. A este análisis se lo llama: análisis granulométrico del suelo.

El tamiz o criba que se muestra en la Figura 2.7.a, consiste de un plato de acero inoxidable con una malla metálica adherida en la parte inferior con aberturas de tamaño uniforme. Existen dos tamaños estándar de tamices los de 8 y 12", mostrados en la Figura 2.7.b y c, respectivamente.

Figura 2.7 Tamices para el análisis mecánico del suelo de grano grueso



Fuente: ASTM D422 y E100, 2003

(a) Tamiz. (b) Tamiz de 8". (c) Tamiz de 12".

La Tabla 2.2. muestra la serie ASTM de tamices de 8" y 12" disponibles en el mercado para el análisis mecánico del suelo, el tamaño de la abertura de la malla (expresado en milímetros) esta identificada por un número de tamiz.

No es necesario tener todos los tamices para realizar un análisis granulométrico del suelo, simplemente bastan algunos tamaños que están en función al sistema de clasificación del tamaño de partículas que se esté empleando. En el sistema de clasificación unificado (USCS) las partículas consideradas grano grueso tienen un tamaño mayor a 0.075 mm, por lo tanto, el tamiz: N° 200 retiene las partículas de grano grueso y deja pasar las partículas finas del suelo, por lo que el tamiz N° 200 clasifica las partículas de grano grueso de las finas.

Dentro las partículas de grano grueso el tamaño de la arena está comprendido entre 4.75 y 0.075 mm, el tamiz: N° 4 retiene los tamaños mayores a 4.75 mm y deja pasar los de menor tamaño que son retenidos en el tamiz N° 200. La grava tiene un tamaño comprendido entre 76.2 y 4.75 mm, el tamiz de 3" retiene partículas mayores a 76.2 mm y deja pasar partículas de menor tamaño que se retendrán en el tamiz N° 4 o en el N° 200.

Para el sistema de clasificación unificado es indispensable tener los tamices N° 200, 4 y el de 3", sin embargo, si se utilizan tamices intermedios a estos tamaños se tendrá un análisis granulométrico más preciso.

Tabla 2.2 Serie ASTM de tamices

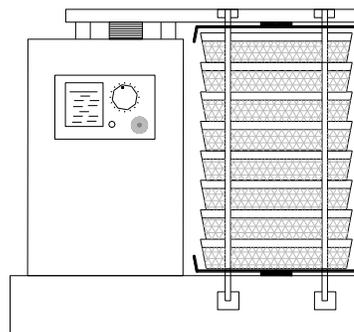
| Tamices serie ASTM | | | | | | | | | | | |
|--------------------|----------|--------|----------|--------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|
| Nro. | Abertura | Nro. | Abertura | Nro. | Abertura | Nro. | Abertura | Nro. | Abertura | Nro. | Abertura |
| 5" | 127,00 | 1 1/2" | 38,10 | 3/8" | 9,53 | 12 | 1,70 | 60 | 0,250 | 325 | 0,041 |
| 4.24" | 107,70 | 1 1/4" | 31,75 | 5/16" | 7,94 | 14 | 1,40 | 70 | 0,212 | 400 | 0,035 |
| 4" | 101,60 | 1.06" | 26,92 | 0.265" | 6,73 | 16 | 1,18 | 80 | 0,180 | 450 | 0,031 |
| 3 1/2" | 88,90 | 1" | 25,40 | 1/4" | 6,35 | 18 | 1,00 | 100 | 0,150 | 500 | 0,028 |
| 13/4" | 82,55 | 7/8" | 22,23 | 4 | 4,75 | 20 | 0,85 | 120 | 0,125 | 635 | 0,021 |
| 3" | 76,20 | 3/4" | 19,05 | 5 | 4,00 | 25 | 0,71 | 140 | 0,106 | | |
| 2 1/2" | 63,50 | 5/8" | 15,88 | 6 | 3,35 | 30 | 0,60 | 170 | 0,090 | | |
| 2.12" | 53,85 | 0.53" | 13,46 | 7 | 2,80 | 35 | 0,50 | 200 | 0,075 | | |
| 2" | 50,80 | 1/2" | 12,70 | 8 | 2,36 | 40 | 0,43 | 230 | 0,065 | | |
| 1 3/4" | 44,45 | 7/16" | 11,11 | 10 | 2,00 | 50 | 0,36 | 270 | 0,053 | | |

Fuente: ASTM D422 y E100, 2003

En la Figura 2.8. se muestra un tamizador, que es un equipo de laboratorio donde se instalan las diferentes medidas de tamices, este agita todo el conjunto de tal manera que el suelo puede descender por todos los tamices que clasifican el tamaño de las partículas.

Se instalan los tamices en forma descendente, el de mayor abertura en la parte superior y el de menor abertura en la parte inferior, el suelo es colocado en el tamiz superior y también se coloca un plato en la parte inferior del último tamiz para recibir la fracción más fina de suelo. Deben seleccionarse con cuidado los tamices que se van a instalar, el tamizador permite regular la intensidad y el tiempo del tamizado.

Figura 2.8 Tamizador de laboratorio



Fuente: ASTM D422 y E100, 2003

Antes de tamizar la muestra de suelo, esta debe ser lavada desmenuzando todos los terrones que existan y luego ser secada en horno por 24 horas a 105 °C. Durante el lavado y tamizado se perderán partículas de suelo esta pérdida no debe superar el 2% de la masa total.

2.5.2.1 Curva de distribución del tamaño de partículas.

La muestra de suelo debe ser tamizada por lo menos 15 minutos, donde cada tamiz retendrá una fracción de masa de suelo y el plato inferior retendrá las partículas más finas del suelo menores a 0.075 mm para otros propósitos.

- La masa de la fracción de masa de suelo retenida en cada tamiz será: $M_1, M_2, M_3, \dots, M_i$.
- La masa de la fracción fina de suelo en el platillo será: M_p .
- El total de la masa de suelo será: $M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_i + M_p = \sum M$.

Se determina la masa acumulada de suelo retenida para cada tamiz, para un tamiz i será:

$$M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_i$$

Se determina la masa de suelo que deja pasar cada tamiz. La masa de suelo que deja pasar el tamiz i será:

$$\sum M - (M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_i)$$

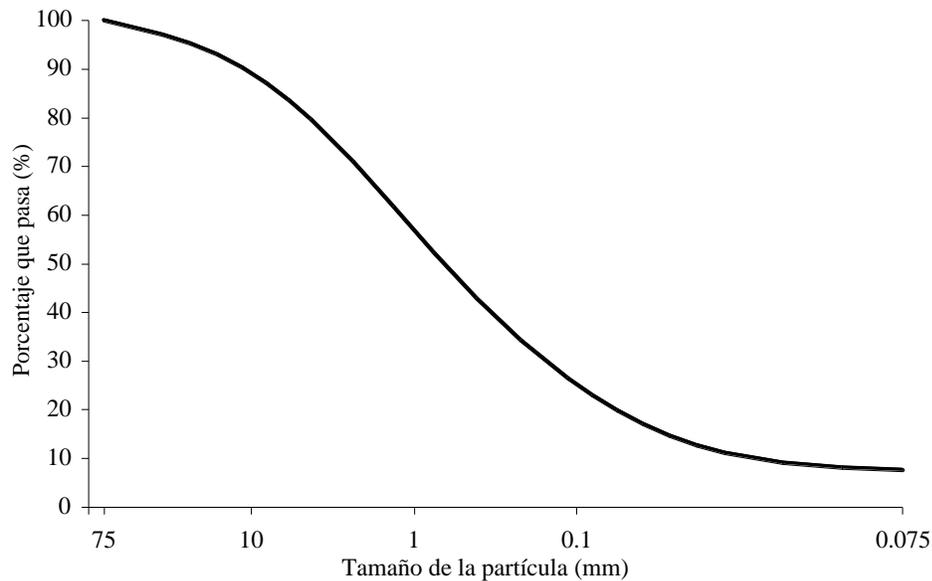
Se determina el porcentaje de suelo que deja pasar cada tamiz. El porcentaje de suelo que pasar el tamiz i será:

$$P(\%)_i = \frac{\sum M - (M_1 + M_2 + M_3 + \dots + M_i)}{\sum M} \times 100$$

Todos los resultados son registrados ordenadamente en una Tabla. Con los valores del tamaño de las aberturas del tamiz en milímetros ubicados en orden inverso en el eje de las abscisas en escala logarítmica y el porcentaje de la masa de suelo que pasa ubicada en el

eje de las ordenadas, se traza la curva de distribución del tamaño de partículas como se muestra en la Figura 2.9.

Figura 2.9 Curva de distribución del tamaño de partículas

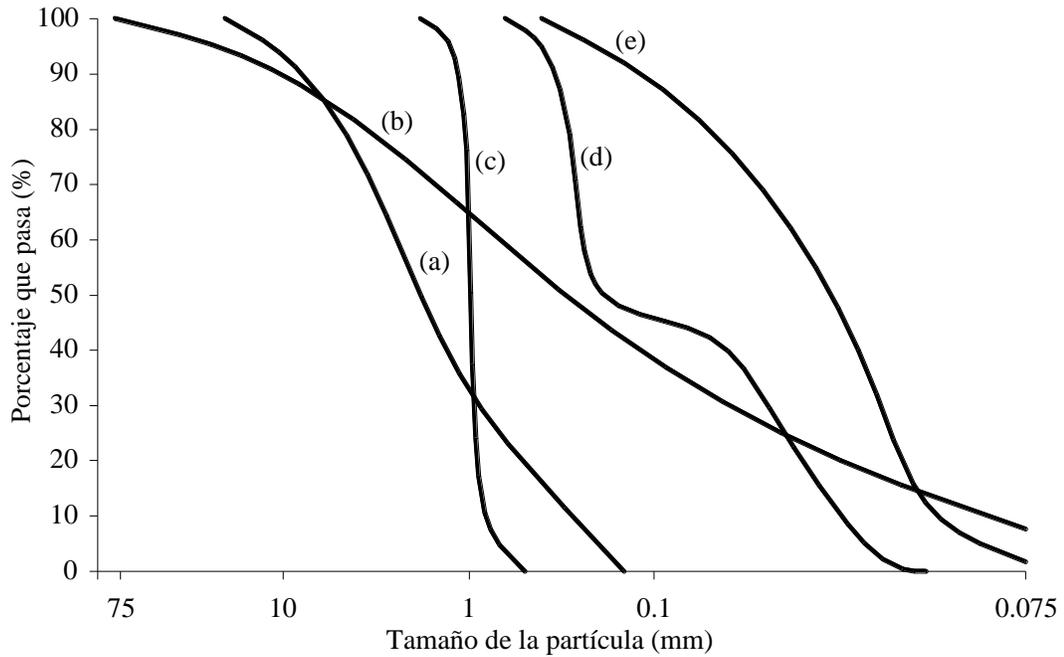


Fuente: Coduto, 1999

2.5.2.2 Parámetros de la Curva de distribución del tamaño de partículas.

A partir de la curva de distribución del tamaño de partículas, se puede obtener cantidades en porcentaje de un tamaño de partículas especial que contenga el suelo. El diámetro de la partícula (D_i) se refiere al tamaño del grano o diámetro aparente de una partícula de suelo y el subíndice que lo acompaña indica la cantidad de partículas en porcentaje más pequeñas que esta. Por ejemplo: $D_{10} = 2 \text{ mm}$, significa que el 10% de los granos de la muestra son menores en diámetro que 2 mm. El diámetro D_{10} es llamado diámetro o tamaño efectivo del suelo, este al igual que el: D_{60} , D_{30} , D_{25} y D_{75} , son tamaños especiales de las partículas que contiene el suelo para evaluar la distribución del tamaño de partículas del suelo.

Figura 2.10 Curvas de distribución del tamaño de partículas de cinco suelos



Fuente: Coduto, 1999

(a) Suelo de grano grueso (grava y arena). (b) Suelo bien gradado con una amplia variedad de tamaños de partícula. (c) Suelo de grano grueso con una reducida variedad de tamaños de partícula. (d) Suelo con gradación hueca, no contiene un cierto rango de tamaños de partícula. (e) Suelo compuesto de partículas finas (limo y arcilla).

2.5.2.2.1 Coeficiente de uniformidad (CU).

Este parámetro evalúa el grado de similitud en tamaño de las partículas del suelo, que será:

Ecuación 2.1 Coeficiente de uniformidad (CU).

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

Un valor grande de este parámetro indica que las partículas entre D60 y D10 difieren en gran manera de tamaño, lo que indica desuniformidad en relación al tamaño. Un suelo con una distribución uniforme hará que la curva de distribución tienda a ser vertical como en

la Figura 2.10.c, mientras que la desuniformidad la hará más horizontal como en la Figura 2.10.b.

2.5.2.2.2 Coeficiente de gradación (CC).

Este parámetro evalúa la progresión de la variación en tamaño de las partículas del suelo, que será:

Ecuación 2.2 Coeficiente de gradación (CC).

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

Los valores de CC muy alejados a la unidad indican la falta o la poca cantidad de una serie de tamaños de partículas. Una distribución bien gradada hará que la curva de distribución se asemeje a una recta (Figura 2.10.a, b) y una mala gradación la hará sinuosa o uniforme (Figura 2.10.c y d).

2.5.2.2.3 Coeficiente de clasificación (So).

Este parámetro es otra alternativa poco conocida para evaluar la uniformidad y se escribe:

Ecuación 2.3 Coeficiente de clasificación (So).

$$S_o = \sqrt{\frac{D_{75}}{D_{25}}}$$

2.5.3 Análisis mecánico por hidrómetro.

Aunque existen tamices con aberturas de malla menores a 0.075 mm, no es apropiado su uso para determinar la distribución del tamaño de partículas de la fracción de suelo fino, debido a que las partículas del suelo fino no siempre tienen textura granular sino en hojuelas y estas últimas poseen propiedades eléctricas importantes que dificultarían el tamizado.

Stokes (1850) desarrolló una ecuación que relaciona la velocidad de descenso de una partícula esférica en un fluido con respecto al tamaño de esta, que es:

$$v = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{18 \cdot \eta} \cdot D^2$$

Donde:

v = Velocidad de descenso de la partícula.

γ_s = Peso unitario de los sólidos del suelo

γ_w = Peso unitario del agua.

η = Viscosidad dinámica del fluido.

D = Diámetro de la partícula con forma esférica

Con el concepto que encierra la ecuación 2.4, conocida también como la ley de Stokes, puede determinarse el tamaño del más del 90% de las partículas del suelo fino. El hidrómetro del tipo ASTM 152H que se muestra en la Figura 2.11.a, es un instrumento de laboratorio para medir la gravedad específica de un líquido (Figura 2.11.b).

El análisis mecánico por hidrómetro está basado en el principio de sedimentación de las partículas del suelo fino en suspensión. Cuando un suelo fino es dispersado en agua, las partículas sedimentarán a diferentes velocidades, dependiendo de su textura, tamaño y masa, además de la viscosidad del agua. Para simplificar el análisis, se asume que las partículas tienen forma esférica de tal manera que puede utilizarse la ley de Stokes para describir su comportamiento. El diámetro de la partícula según la ecuación 2.4, será:

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot v}{\gamma_s - \gamma_w}}$$

La velocidad “ v ” de esta ecuación puede escribirse como:

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{\gamma_s - \gamma_w}} \cdot \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Donde:

L = Es la distancia que recorre la partícula al sedimentarse.

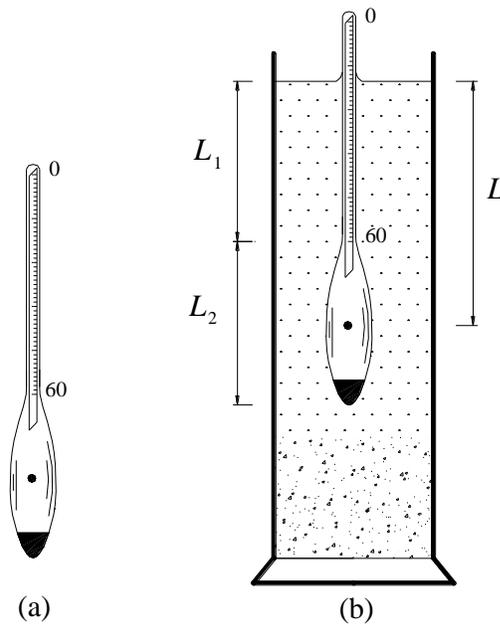
t = Es el tiempo que tarda en recorrer esa distancia.

Reemplazando: en esta ecuación y factorizando se tendrá que:

$$D = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta}{(G_s - 1) \cdot \gamma_w}} \cdot \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Donde: G_s = Gravedad específica del suelo fino.

Figura 2.11 Hidrómetro



(a) Hidrómetro tipo ASTM 152H. (b) Determinación de la gravedad específica.

Fuente: Das B. M., 1998

Debe tenerse cuidado al manejar las unidades de los diferentes valores que incluye esta ecuación. El diámetro de la partícula por ser un valor pequeño conviene manejarlo en mm, la viscosidad del agua se mide en $\text{g} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$, el peso unitario del agua en g/cm^3 , la distancia L que recorre la partícula conviene medirla en cm y el tiempo de la sedimentación es muy lento por lo que debe medirse en minutos. Compatibilizando unidades se tendrá que:

$$\frac{D[\text{mm}]}{10} = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta [\text{gr} \cdot \text{sec}/\text{cm}^2]}{(G_s - 1) \cdot \gamma_w [\text{gr}/\text{cm}^3]}} \cdot \sqrt{\frac{L[\text{cm}]}{t[\text{min}] \times 60}}$$

Por lo que se tendrá que:

Ecuación 2.4

$$D = \sqrt{\frac{30 \cdot \eta}{(G_s - 1) \cdot \gamma_w}} \cdot \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Sin embargo, para determinar fácilmente del diámetro de la partícula, la ecuación 2.4, puede escribirse:

Ecuación 2.5

$$D = K \cdot \sqrt{\frac{L}{t}}$$

$$\text{Donde: } K = \sqrt{\frac{30 \cdot \eta}{(G_s - 1) \cdot \gamma_w}}$$

Tanto la gravedad específica como la viscosidad del agua dependen de la temperatura, por lo cual la norma ASTM D422 ha tabulado valores para el coeficiente K en función a la temperatura y la gravedad específica, que se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Valores de K

| Temperatura °C | Gravedad específica (G _s) | | | | | | |
|-------------------|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 2.5 | 2.55 | 2.6 | 2.65 | 2.7 | 2.75 | 2.8 |
| 17 | 0.0149 | 0.0146 | 0.0144 | 0.0142 | 0.014 | 0.0138 | 0.0136 |
| 18 | 0.0147 | 0.0144 | 0.0142 | 0.014 | 0.0138 | 0.0136 | 0.0134 |
| 19 | 0.0145 | 0.0143 | 0.0140 | 0.0138 | 0.0136 | 0.0134 | 0.0132 |
| 20 | 0.0143 | 0.0141 | 0.0139 | 0.0137 | 0.0134 | 0.0133 | 0.0131 |
| 21 | 0.0141 | 0.0139 | 0.0137 | 0.0135 | 0.0133 | 0.0131 | 0.0129 |
| 22 | 0.0140 | 0.0137 | 0.0135 | 0.0133 | 0.0131 | 0.0129 | 0.0128 |
| 23 | 0.0138 | 0.0136 | 0.0134 | 0.0132 | 0.013 | 0.0128 | 0.0126 |
| 24 | 0.0137 | 0.0134 | 0.0132 | 0.0130 | 0.0128 | 0.0126 | 0.0125 |
| 25 | 0.0135 | 0.0133 | 0.0131 | 0.0129 | 0.0127 | 0.0125 | 0.0123 |
| 26 | 0.0133 | 0.0131 | 0.0129 | 0.0127 | 0.0125 | 0.0124 | 0.0122 |
| 27 | 0.0132 | 0.0130 | 0.0128 | 0.0126 | 0.0124 | 0.0122 | 0.0120 |
| 28 | 0.0130 | 0.0128 | 0.0126 | 0.0124 | 0.0123 | 0.0121 | 0.0119 |
| 29 | 0.0129 | 0.0127 | 0.0125 | 0.0123 | 0.0121 | 0.0120 | 0.0118 |
| 30 | 0.0128 | 0.0126 | 0.0124 | 0.0122 | 0.012 | 0.0118 | 0.0117 |

Fuente: ASTM D422, 2003

En laboratorio el análisis mecánico por hidrómetro, se realiza en un cilindro (18" x 2.5") con agua mantenida a temperatura constante donde es introducida una cantidad apropiada de suelo. Para dispersar las partículas en todo el fluido y acelerar la sedimentación, se introduce defloculador que por lo general es hexametáfosfato de sodio. La solución debe ser mezclada enérgicamente para homogenizar el fluido, es recomendable que la cantidad total de fluido sea de 1000 ml, por lo que talvez deba añadirse agua destilada.

Cuando el hidrómetro es colocado en el cilindro (Figura 2.11b) este queda suspendido a cierta profundidad, a medida que las partículas en suspensión sedimenten el hidrómetro se hundirá consecuentemente, ya que la gravedad específica del fluido está en función al contenido de partículas por unidad de volumen en suspensión. La lectura del hidrómetro se realiza del punto que está en el centro del bulbo del hidrómetro hasta la medida que marca el nivel superior de agua en la regla graduada, esta distancia es L en la Figura 2.11b. Este valor puede obtenerse de la siguiente expresión:

$$L = L_1 + \frac{1}{2} \cdot \left(L_2 - \frac{V_B}{A} \right)$$

Donde:

L = Profundidad sumergida del bulbo del hidrómetro.

L₁ = Medida de la profundidad sumergida de la parte superior del bulbo.

L₂ = Longitud del bulbo (14 cm para hidrómetro ASTM 152H).

V_B = Volumen del bulbo del hidrómetro (67 cm³ para hidrómetro ASTM 152H).

A = Área de la sección transversal del cilindro (27.8 cm² si es de 18" x 2.5").

Tabla 2.4 Valores de L para distintas lecturas (R) del hidrómetro

| Lectura R | L cm | Lectura R | L cm |
|-----------|------|-----------|------|
| 0 | 16,3 | 26 | 12 |
| 1 | 16,1 | 27 | 11,9 |
| 2 | 16 | 28 | 11,7 |
| 3 | 15,8 | 29 | 11,5 |
| 4 | 15,6 | 30 | 11,4 |
| 5 | 15,5 | 31 | 11,2 |
| 6 | 15,3 | 32 | 11,1 |
| 7 | 15,2 | 33 | 10,9 |
| 8 | 15 | 34 | 10,7 |
| 9 | 14,8 | 35 | 10,6 |
| 10 | 14,7 | 36 | 10,4 |
| 11 | 14,5 | 37 | 10,2 |
| 12 | 14,3 | 38 | 10,1 |
| 13 | 14,2 | 39 | 9,9 |
| 14 | 14 | 40 | 9,7 |
| 15 | 13,8 | 41 | 9,6 |
| 16 | 13,7 | 42 | 9,4 |
| 17 | 13,5 | 43 | 9,2 |
| 18 | 13,3 | 44 | 9,1 |
| 19 | 13,2 | 45 | 8,9 |
| 20 | 13 | 46 | 8,8 |
| 21 | 12,9 | 47 | 8,6 |
| 22 | 12,7 | 48 | 8,4 |
| 23 | 12,5 | 49 | 8,3 |
| 24 | 12,4 | 50 | 8,1 |
| 25 | 12,2 | 51 | 7,9 |

Fuente: ASTM D422. 2003

Para un hidrómetro del tipo ASTM 152H y un cilindro de sedimentación de 18” x 2.5”, se tendrá que:

$$L = L_1 + 5.8$$

Para obtener el valor de L_1 no se toma en cuenta el menisco que se forma entre la superficie del agua y el hidrómetro, por lo que la lectura L_1 corregida del menisco será: R. Midiendo el valor de R en la regla graduada se determina la longitud L, que es el valor de la longitud en la ecuación 2.4. La norma ASTM D422 presenta valores tabulados para la variación de L respecto a R válidos para el equipo de laboratorio anteriormente descrito, que se muestran en la Tabla 2.4.

Se toman lecturas con el hidrómetro de la densidad del fluido para diferentes intervalos de tiempo, que por lo general son:

$t_1 = 15$ seg, $t_2 = 30$ seg, $t_3 = 1$ min, $t_4 = 2$ min, $t_5 = 4$ min, ... , $t_{14} = 24$ horas y $t_{15} = 48$ horas.

Con los valores de “L” y “t” para los diferentes intervalos de tiempo en la ecuación 2.5, se obtienen los diversos tamaños de partículas del suelo fino.

2.5.3.1 Curva de distribución del tamaño de partículas.

Al igual que el análisis mecánico por tamices se puede trazar la curva de distribución del tamaño de partículas para el suelo fino. Con la ecuación 2.5, se determina el tamaño de las partículas del suelo, pero el porcentaje de estas que pasan un tamaño de aberturas de un tamiz imaginario se puede determinar con la ecuación:

Ecuación 2.6

$$P(\%)_i = \frac{a \cdot R}{M_s} \cdot 100$$

Donde el valor de a es una corrección para la gravedad específica, que será:

Ecuación 2.7

$$a = \frac{G_s \cdot 1.65}{(G_s - 1) \cdot 2.65}$$

Este valor de corrección también puede ser obtenido de la tabla 2.5.

Tabla 2.5 Valores de a

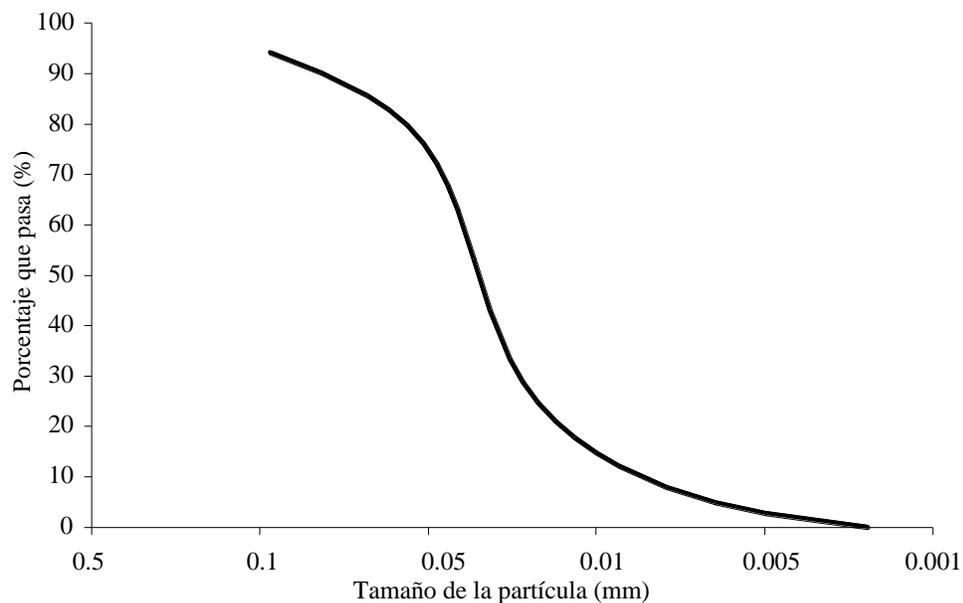
| G_s | a |
|-------|------|
| 2,50 | 1,04 |
| 2,55 | 1,02 |
| 2,60 | 1,01 |
| 2,65 | 1,00 |
| 2,70 | 0,99 |
| 2,75 | 0,98 |
| 2,80 | 0,97 |

Fuente: ASTM D422, 2003

Es muy importante que la temperatura se mantenga constante durante todo el ensayo, para lograr esto en la práctica se sumerge el cilindro de sedimentación en un baño maría que mantiene el agua a temperatura constante. Sin embargo, también deben aplicarse factores de corrección por temperatura y viscosidad del fluido al valor de R en la ecuación 2.6, donde la forma de aplicar todos estos se describe ampliamente en un manual especializado de laboratorio.

Todos los resultados son registrados ordenadamente en una tabla al igual que en el caso del suelo de grano grueso. Con los valores del tamaño de partículas en milímetros obtenidos de la ecuación 2.5, ubicados en orden inverso en el eje de las abscisas en escala logarítmica y el porcentaje de las partículas que pasan un tamiz imaginario obtenido de la ecuación 2.6, ubicada en el eje de las ordenadas, se traza la curva de distribución del tamaño de partículas como se observa en la Figura 2.12. Esta curva es la continuación de la curva de distribución del tamaño de partículas del suelo de grano grueso. En el sector donde se conectan estas dos curvas existe una ligera discontinuidad que por lo general se debe a las diferentes texturas de las partículas, esta debe corregirse manualmente para mantener la continuidad de las dos curvas, como se muestra en las curvas de la Figura 2.10b, d y e.

Figura 2.12 Curva de distribución del tamaño de partículas

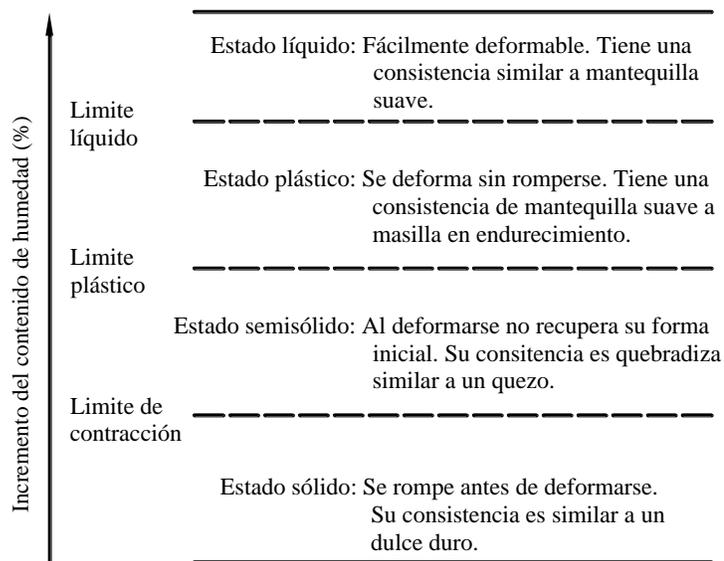


Fuente: Coduto, 1999

2.5.4 Límites de Atterberg.

Atterberg (1911) realizó una serie de experimentos con suelos finos haciendo variar su contenido de humedad, con el objetivo de encontrar la relación que existe entre el contenido de humedad y la consistencia del suelo. Este investigador observó que para ciertos contenidos de humedad el suelo presentaba uno de los cuatro estados distintos de consistencia, que son: sólido, semisólido, plástico y líquido.

Figura 2.13 Consistencia del suelo según al contenido de humedad



Fuente: Coduto, 1999

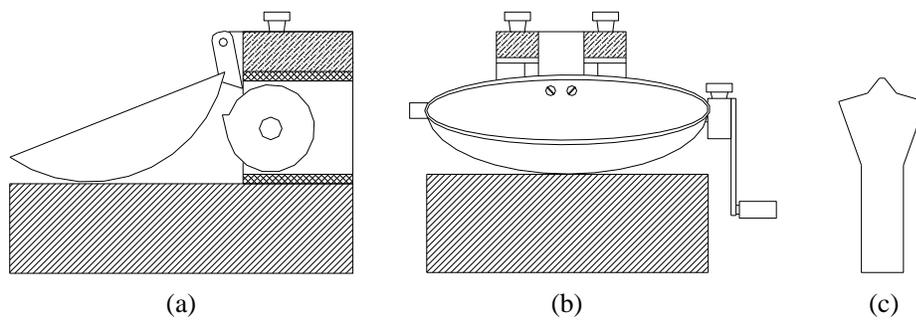
Posteriormente Terzaghi y Casagrande idearon métodos para determinar estos contenidos de humedad específicos para los distintos estados de consistencia, descritos en la norma ASTM D427 y D4318, en la actualidad a estos contenidos de humedad especiales se los conoce como límites de Atterberg o de consistencia. Puede hablarse de los límites de Atterberg en suelos que tienen un tamaño de partículas que pasan por el tamiz N° 40. Para un bajo contenido de humedad el suelo tendrá una consistencia sólida a semisólida, a medida que se va incrementando el contenido de humedad el suelo progresivamente tomará una consistencia plástica y finalmente para un contenido de humedad muy alto el suelo tendrá una consistencia líquida. La Figura 2.13, muestra las diferentes consistencias del suelo en función al incremento del contenido de humedad.

Los límites de Atterberg son contenidos de humedad específicos en los cuales el suelo se encuentra en etapa de transición, de un estado de una consistencia a otro.

2.5.4.1 Determinación del límite líquido (LL).

El límite líquido es un contenido de humedad específico que divide la consistencia plástica de la líquida del suelo. Casagrande (1975) desarrolló un método en laboratorio para determinar el límite líquido del suelo, con un aparato similar al que se muestra en la Figura 2.14, conocido como la cuchara de Casagrande.

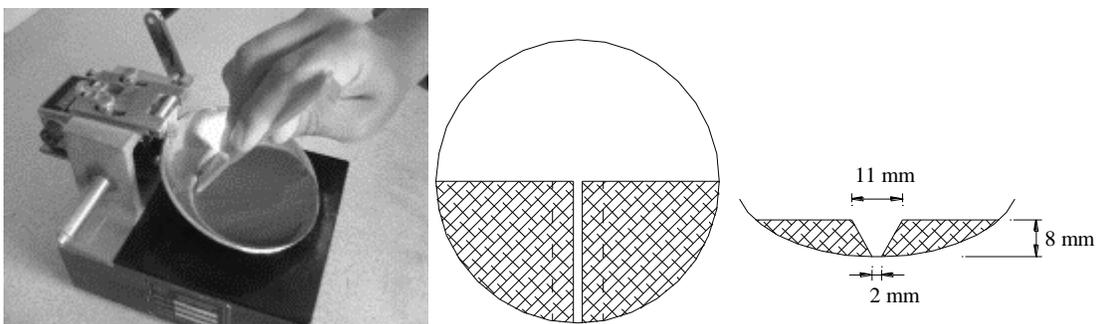
Figura 2.14 Cuchara de Casagrande para determinar el límite líquido del suelo



(a) Vista lateral. (b) Vista frontal. (c) Espátula.

Fuente: Casagrande, 1975

Figura 2.15 División de la pasta de suelo



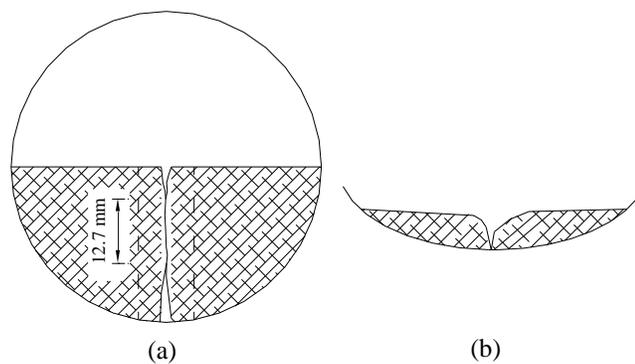
(a) Raspado del suelo (Laboratorio de geotecnia, UMSS). (b) Vista superior. (c) Vista frontal.

Fuente: Casagrande, 1975

Con la cuchara de Casagrande puede determinarse el límite líquido del suelo para un tamaño de partículas que pasan por el tamiz N° 40 (0.425 mm). En primer lugar, la muestra de suelo debe ser humedecida hasta que se alcance una consistencia líquida, después, esta es esparcida uniformemente como una pasta en la cuchara del aparato, entonces se raspa la parte central de la pasta con la espátula que se muestra en la Figura 2.14.c, de tal forma que esta queda dividida en dos partes como se observa en la Figura 2.15.a y b.

La abertura que se hace en la pasta debe ser recta y uniforme, de tal manera que cumpla con ciertas dimensiones establecidas que se muestran en la Figura 2.15.c. Luego se mueve la manivela que acciona un mecanismo que da golpes a la cuchara, estos ocasionan que la abertura se cierre progresivamente. Se dan golpes hasta que la abertura se cierre en $\frac{1}{2}$ pulgada (12.7 mm) del largo total de ésta, como se ve en la Figura 2.16.

Figura 2.16 Cierre de la pasta de suelo



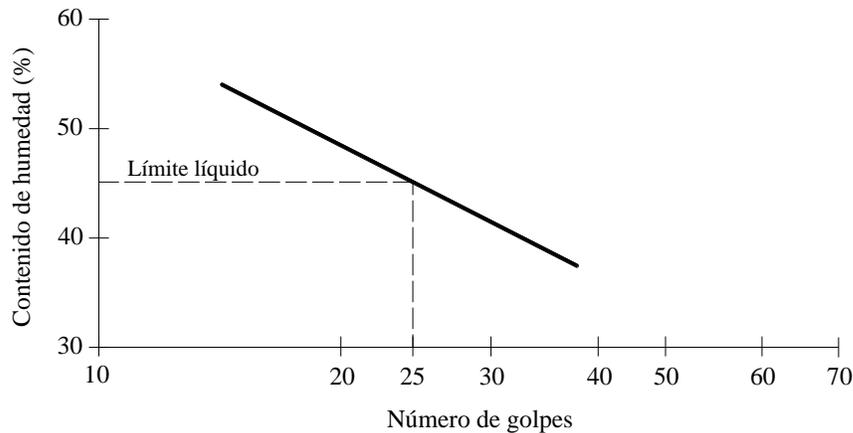
(a) Vista superior. (b) Vista frontal.

Fuente: Casagrande, 1975

Casagrande, tras realizar varios ensayos con diversos suelos, determinó empíricamente que para un contenido de humedad correspondiente al del límite líquido solo hacen falta 25 golpes para cerrar la abertura en la distancia especificada. Debido a que no es posible humedecer el suelo hasta alcanzar exactamente el límite líquido, se realizan varios ensayos con el mismo suelo y se registran ordenadamente los resultados en una Tabla. La Figura 2.17, muestra la ubicación de los resultados (mediante puntos) de cuatro ensayos para un mismo suelo, con los valores del contenido de humedad ubicados en el eje de las ordenadas y los valores del número de golpes en escala logarítmica en el eje de las

abscisas, luego se ha ajustado una curva que relaciona estos puntos. El límite líquido del suelo será el contenido de humedad que corresponde a los 25 golpes.

Figura 2.17 Determinación del límite líquido del suelo



Fuente: ASTM D4318, 2003

El U.S. Corps of Engineers y el Waterways Experiment Station, elaboraron una ecuación empírica para determinar el límite líquido del suelo en función al número de golpes y el contenido de humedad del suelo, que será:

Ecuación 2.8 Determinación del límite líquido (LL).

$$LL = w_N \cdot \left(\frac{N}{25} \right)^{\tan \beta}$$

Donde:

LL = Límite líquido.

w_N = Contenido de humedad natural.

N = Número de golpes.

$\tan \beta$ = Pendiente de la línea de flujo (0.121 es una buena aproximación).

Con la ecuación 2.8, se obtienen buenas aproximaciones del límite líquido realizando un solo ensayo, la norma ASTM D4318 recomienda que esta ecuación deba usarse para un

número de golpes comprendidos entre 20 y 30. La Tabla 2.6, muestra valores de la relación $(N/25)^{0.121}$ de acuerdo al número de golpes.

Tabla 2.6 Valores para la relación $(N/25)^{0.121}$

| N | $\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$ | N | $\left(\frac{N}{25}\right)^{0.121}$ |
|-----|-------------------------------------|-----|-------------------------------------|
| 20 | 0,973 | 26 | 1,005 |
| 21 | 0,979 | 27 | 1,009 |
| 22 | 0,985 | 28 | 1,014 |
| 23 | 0,990 | 29 | 1,018 |
| 24 | 0,995 | 30 | 1,022 |
| 25 | 1,000 | | |

Fuente: ASTM D4318, 2003

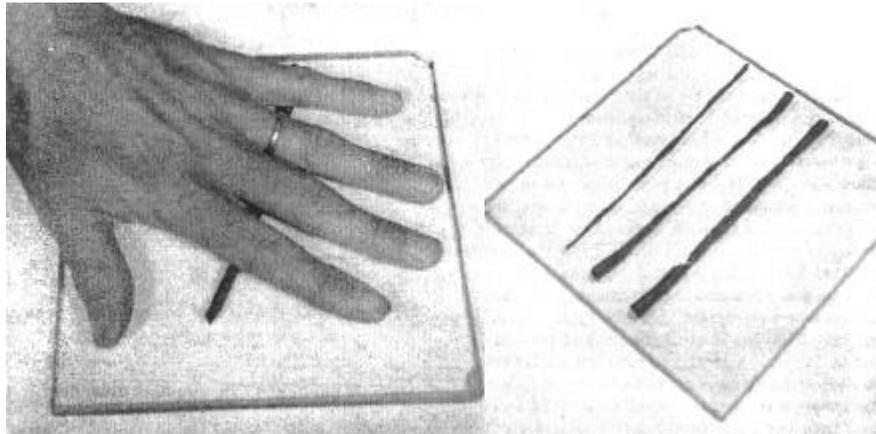
2.5.4.2 Plasticidad.

La plasticidad es una propiedad característica de los suelos finos, donde el contenido de humedad del suelo está comprendido entre el límite líquido y plástico. En este estado el suelo permite ser moldeado de manera similar a la masa o la plastilina, debido a que el contenido de humedad del suelo contiene la cantidad ideal de moléculas de agua para que la fuerza de atracción entre las partículas compuestas de minerales de arcilla sea la mayor.

2.5.4.3 Determinación del límite plástico (LP).

Puede determinarse el límite plástico para un suelo con un tamaño de partículas que pasan el tamiz N°40, para lo cual debe humedecerse el suelo lo suficiente como para poder amasarlo, entonces sobre un papel seco en una superficie plana o encima de un vidrio deben formarse rollitos de unos 3 mm de diámetro como muestra la Figura 2.18.a. Posteriormente los rollitos deben ser juntados en uno para ser amasados y nuevamente formar rollitos, a medida que se formen los rollitos el suelo progresivamente perderá humedad debido al papel y la mano, entonces llegará un momento cuando al formar el rollito el suelo empiece a disgregarse en su superficie y luego a fragmentarse (Figura 2.18.b). En este estado cuando el suelo empieza a perder su consistencia plástica, se procede inmediatamente a determinar su contenido de humedad que este a la vez será el límite plástico del suelo, que es un contenido de humedad específico que divide la consistencia semisólida de la plástica del suelo.

Figura 2.18 Determinación del límite plástico



(a) Realizando el rollito. (b) Rollitos de suelo empezando a fragmentarse.

Fuente: Laboratorio de geotecnia, UMSS

2.5.4.4 Índice de plasticidad (IP).

Con el índice de plasticidad puede evaluarse el grado de amasado que permite el suelo mientras se encuentre en su consistencia plástica, este índice se define como:

Ecuación 2.9 Índice de plasticidad (IP).

$$IP = LL - LP$$

En la Tabla 2.7, se presentan valores del índice de plasticidad para evaluar la plasticidad del suelo.

Tabla 2.7 Grado de plasticidad del suelo

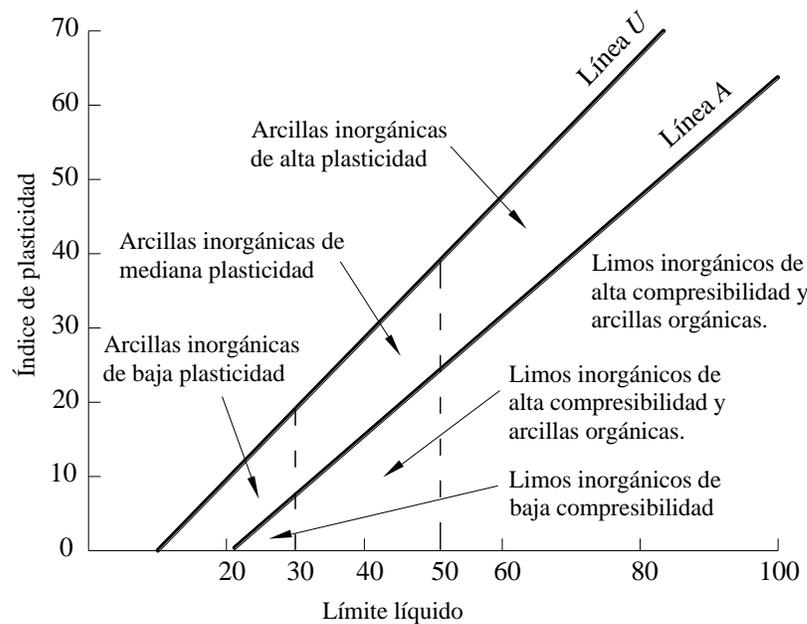
| <i>IP</i> | Descripción |
|------------------|----------------------|
| 0 - 3 | No plástico |
| 3 - 15 | Ligeramente plástico |
| 15-30 | Baja plasticidad |
| > 30 | Alta plasticidad |

Fuente: Sowers, 1979

2.5.4.5 Carta de plasticidad.

Casagrande (1932) estudió la relación que existe entre el índice de plasticidad y el límite líquido para una gran variedad de suelos y construyó la carta de plasticidad que se ve en la Figura 2.19, en este observó que las distintas variedades de suelos se agrupan ordenadamente en diversos sectores del gráfico. Empíricamente obtuvo las ecuaciones de las líneas que dividen el gráfico en las regiones donde se agrupan los tipos de suelo.

Figura 2.19 Carta de plasticidad



Fuente: Casagrande, 1932

La línea A separa las arcillas inorgánicas de los limos inorgánicos, las arcillas inorgánicas se encuentran por encima de esta línea y los limos inorgánicos por debajo de esta. Los limos orgánicos están situados por debajo de esta línea en el intervalo de 30 a 50 del límite líquido, las arcillas orgánicas se ubican por debajo de esta línea con un límite líquido mayor a 50. La ecuación de la línea A es:

Ecuación 2.10 Línea A

$$IP = 0.73 (LL - 20)$$

La línea U se ubica por encima de la línea A, esta línea es aproximadamente el límite superior de la relación del índice de plasticidad y el límite líquido para cualquier tipo de suelo conocido, aunque rara vez se ubica un suelo por encima de línea U, que tiene la ecuación:

Ecuación 2.11 Línea U

$$IP = 0.9 (LL - 8)$$

La información que provee el gráfico de plasticidad es de gran valor para clasificar los suelos finos y poder identificarlos con facilidad.

En la Tabla 2.8, se muestran valores característicos de los límites de Atterberg para algunos minerales de arcilla comúnmente encontrados en los suelos finos.

Tabla 2.8 Valores de los límites de Atterberg para los minerales de arcilla

| Mineral | Límite líquido | Límite plástico | Límite de contracción |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------------|
| Montmorilonita | 100 - 900 | 50 - 100 | 8.5 - 15 |
| Nontronita | 37 - 72 | 19 - 27 | |
| Illita | 60 - 120 | 35 - 60 | 15 - 17 |
| Caolinita | 30 - 110 | 25 - 40 | 25 - 29 |
| Halosita hidratada | 50 - 70 | 47 - 60 | |
| Halosita no hidratada | 35 - 55 | 30 - 45 | |
| Atapulgita | 160 - 230 | 100 - 120 | |
| Clorita | 44 - 47 | 36 - 40 | |
| Alofano | 200 - 250 | 130 - 140 | |

Fuente: Mitchell, 1976

2.6 Clasificación de suelos.

Debido a la gran variedad de suelos que pueden encontrarse en la corteza terrestre es que se han desarrollado varios sistemas de clasificación para poder identificarlos, elaborados de acuerdo a la aplicación que se les da a los mismos. El clasificar un suelo consiste en agrupar al mismo en grupos y/o subgrupos de suelos que presentan un comportamiento semejante con propiedades ingenieriles similares.

En este capítulo se analizó el sistema de clasificación Unificado USCS y el sistema de clasificación AASHTO, que son los sistemas de clasificación más utilizados por la mayor parte de los ingenieros de todo el mundo.

El sistema de clasificación AASHTO está especialmente hecho para la construcción de carreteras, en cambio el sistema de clasificación Unificado USCS, no está limitado a ninguna clase de proyectos en particular y es usado para toda la gama de obras civiles.

Tanto el sistema de clasificación Unificado como el AASHTO consideran como suelo (conjunto de partículas sólidas, con líquido y agua en sus poros) a la parte que pasa por el tamiz de 3" (75 mm.), ya que las partículas más grandes a este diámetro son consideradas como partículas aisladas que ya no forman parte del suelo.

2.6.1 Sistema de clasificación unificado (USCS).

El sistema de clasificación unificado USCS (Unified Soil Classification System), designación ASTM D2487, originalmente fue desarrollado por A. Casagrande (1948) para la construcción de aeródromos durante la segunda guerra mundial. Este sistema de clasificación fue posteriormente modificado en 1952 por el mismo autor y el cuerpo de ingenieros de la armada de los Estados Unidos quienes hicieron que este sistema sea más aplicable a los propósitos ingenieriles, es decir que ya no era solo aplicable al campo de la aviación. Este sistema de clasificación actualmente goza de amplia aceptación y es el preferido por la mayor parte de los ingenieros en todo el mundo.

El sistema de clasificación USCS está basado en la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el índice de plasticidad. Este sistema de clasificación también se basa en la gráfica de plasticidad, que fue obtenida por medio de investigaciones realizadas en laboratorio por A. Casagrande (1932).

Este sistema de clasificación presenta las siguientes características, clasifica a los suelos en cuatro principales categorías, cada una de estas categorías usa un símbolo que define la naturaleza del suelo:

- **Suelos de grano grueso.** Son de naturaleza tipo grava y arena con menos del 50% pasando por el tamiz N° 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G para la grava o suelo gravoso del inglés “Gravel” y S para la arena o suelo arenoso del inglés “Sand”.
- **Suelos de grano fino.** Son aquellos que tienen 50% o más pasando por el tamiz N° 200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo M para limo inorgánico del sueco “mo y mjala”, C para arcilla inorgánica del inglés “Clay”.
- **Suelos orgánicos.** Son limos y arcillas que contienen materia orgánica importante, a estos se los denomina con el prefijo O del inglés “Organic”.
- **Turbas.** El símbolo Pt se usa para turbas del inglés “peat”, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Presenta las siguientes definiciones, según el tamaño y naturaleza de las partículas del suelo:

- **Cantos rodados.** Partículas de roca que no pasan una malla con abertura cuadrada de 12” (300 mm).
- **Guijarros.** Partículas de roca que pasan una malla con abertura cuadrada de 12” (300 mm) y quedan retenidas en un tamiz de 3” (75 mm).
- **Grava.** Partículas de roca que pasan el tamiz de 3” (75 mm) y quedan retenidas en el tamiz N°4 (4.75 mm), con las siguientes subdivisiones:
 - **Gruesa.** Partículas que pasan el tamiz de 3” (75 mm) y quedan retenidas en el tamiz de $\frac{3}{4}$ ” (19 mm.).
 - **Fina.** Partículas que pasan el tamiz de $\frac{3}{4}$ ” (19 mm) y quedan retenidas en el tamiz N°4 (4.75 mm).
- **Arena.** Partículas de roca que pasan el tamiz N°4 (4.75 mm) y son retenidas en el tamiz N°200 (0.075mm), con las siguientes subdivisiones:
 - **Gruesa.** Partículas que pasan el tamiz N°4 (4.75 mm) y son retenidas en el tamiz N°10 (2 mm).
 - **Media.** Partículas que pasan al tamiz N°10 (2 mm) y son retenidas en el tamiz N°40 (0.425 mm).

— **Fina.** Partículas que pasan el tamiz N°40 (0.425 mm) y son retenidas en el tamiz N°200 (0.075 mm).

- **Arcilla.** Suelo que pasa por el tamiz N°200 (0.075 mm), el cual exhibe plasticidad dentro de un cierto intervalo de humedad, pero que muestra considerable resistencia cuando se seca al aire. Para su clasificación, una arcilla es un suelo de grano fino, o la porción fina de un determinado suelo, con propiedades plásticas.
- **Limo.** Suelo que pasa el tamiz N°200 (0.075 mm), de naturaleza no-plástica o ligeramente plástica y que exhibe poca o ninguna resistencia cuando se seca al aire. Para su clasificación, un limo es un suelo de grano fino o la porción fina de un determinado suelo, con ninguna o muy poca plasticidad.
- **Arcilla Orgánica.** Es una arcilla con suficiente contenido de materia orgánica como para influir en las propiedades del suelo. Para su clasificación, una arcilla orgánica es un suelo que es clasificado como arcilla, excepto que el valor de su límite líquido después de secado en el horno es menor que el 75% de este valor antes de ser secado.
- **Limo Orgánico.** Es un limo con suficiente contenido de materia orgánica como para influir en las propiedades del suelo. Para su clasificación, un limo orgánico es un suelo que es clasificado como limo, excepto que el valor de su límite líquido después de secado en el horno es menor que el 75% de este valor antes de ser secado.
- **Turba.** Es un suelo compuesto principalmente de materia vegetal en diferentes estados de descomposición, usualmente con olor orgánico, color entre marrón oscuro a negro, consistencia esponjosa, y textura que varía de fibrosa hasta amorfa.

Para este sistema de clasificación son también usados sufijos que identifican algunas características particulares del suelo:

W. Bien gradado del inglés “Well graded”.

P. Mal gradado del inglés “Poorly graded”.

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

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

Con los prefijos y sufijos anteriormente mencionados se pueden hacer combinaciones que ayudan a describir de mejor manera el suelo en cuestión, por ejemplo, a una arena S, si tuviera la característica de estar bien gradada será SW, de la misma manera un limo M, con una alta plasticidad se simbolizará MH.

Un símbolo doble. Corresponde a dos símbolos separados por un guión, ejm. GP-GM, SW-SC, CL-ML, los cuales se usan para indicar que el suelo tiene propiedades de dos grupos. Estos se obtienen cuando el suelo tiene finos entre 5 y 12% o cuando las coordenadas del límite líquido y el índice de plasticidad caen en el área sombreada CL-ML de la carta de plasticidad. La primera parte del doble símbolo indica si la fracción gruesa es pobremente o bien gradada. La segunda parte describe la naturaleza de los finos. Por ejemplo, un suelo clasificado como un SP-SM significa que se trata de una arena pobremente gradada con finos limosos entre 5 y 12%. Similarmente un GW-GC es una grava bien gradada con algo de finos arcillosos que caen encima la línea A.

Un símbolo de frontera. Corresponde a dos símbolos separados por el símbolo divisorio (/) y deberá usarse para indicar que el suelo cae muy cerca de la línea de división entre dos símbolos de grupo. En estos casos es aceptable el uso de ambos símbolos en la clasificación, con el símbolo de grupo “correcto” por delante seguido del símbolo de grupo “casi correcto”. Por ejemplo, una combinación de arena – arcilla con ligeramente un poco menos del 50% de arcilla podría ser identificada como SC/CL, de la misma manera pasa con otros tipos de suelos como por ejemplo CL/CH, GM/SM.

La línea “U”. Mostrada en la Figura 2.19. ha sido determinada empíricamente en base a análisis de suelos extremos, para ser el “límite superior” de suelos naturales, por lo que no deberían obtenerse resultados por encima de esta línea. Esta línea es una buena manera de comprobar que los datos no sean erróneos y algunos resultados de ensayos que caigan arriba o a la izquierda deben ser verificados.

En casos donde el límite líquido excede de 110% o el índice de plasticidad excede de 60%, la gráfica de plasticidad puede ser expandida, pero manteniendo igual escala en ambos ejes y extendiendo la línea “A” con la misma pendiente, ver Figura 2.19.

Este sistema de clasificación solo considera la porción que pasa a través del tamiz de 3” (75 mm) para la realización de los ensayos de clasificación en laboratorio. Las partículas mayores a este diámetro deberán ser retiradas de la muestra a ensayar en laboratorio, pero el porcentaje de estas partículas debe ser anotado y colocado en los resultados finales de la clasificación.

El índice de plasticidad y el límite líquido son determinados con material que pasa el tamiz de N°40 (0.425 mm).

La línea de división entre el bajo y alto límite líquido es tomada arbitrariamente como 50%, ver Figura 2.19.

Puede ser necesario una extrapolación lineal en la curva de distribución de tamaño de partículas para obtener el diámetro efectivo, D10.

2.6.1.1 Procedimiento para la clasificación de suelos.

Para clasificar un suelo por el sistema unificado se tiene que proceder de la siguiente manera:

1. Determinar si el suelo es altamente orgánico (turba), en tal caso es clasificado por inspección visual como Pt (Tabla 2.9.). Este tipo de suelo trae muchos problemas a los ingenieros, por su alta compresibilidad y muy baja resistencia al corte, pero es muy fácil de identificar según a sus siguientes características notorias:

- Compuesto principalmente de material orgánico (material fibroso).
- Color café oscuro, gris oscuro, o color negro.
- Olor orgánico, especialmente cuando este húmedo.
- Consistencia suave.

Para todos los demás suelos se procede de la siguiente manera:

2. Determinar los ensayos en laboratorio de tamizado, límite líquido e índice de plasticidad.

3. Del análisis granulométrico se debe determinar el porcentaje que pasa por los tamices de 3" (75 mm), N°4 (4.75 mm) y N°200 (0.075 mm).

4. A partir de los porcentajes que pasan por los tamices, se puede hallar el porcentaje retenido en cada tamiz de la siguiente manera:

- $R_{200} = 100 - F_{200}$
- $R_4 = 100 - F_4$
- $R_{3''} = 100 - F_{3''}$

5. Si el 100% del total de la muestra pasa por el tamiz de 3" (75 mm), ir al paso 6, caso contrario calcular el porcentaje de material retenido o con diámetro mayor a este tamiz y al final del ensayo de clasificación anotar junto al resultado el porcentaje de este material retenido (cantos rodados y/o guijarros) incluyendo el tamaño máximo de partícula.

6. Determinar si el peso retenido en el tamiz N°200 (R_{200}) es mayor, menor o igual al 50% del peso total de la muestra seca:

- Si: $R_{200} > 50$ Entonces se tiene un suelo de grano grueso, ir al paso 7.
- $R_{200} \leq 50$ Entonces se tiene un suelo de grano fino, ir al paso 9.

7. Si el suelo es de grano grueso, se debe determinar si la relación entre el porcentaje de suelo retenido en el tamiz N°4 y el tamiz N°200 es mayor, menor o igual a 0.5:

Si:

- $\frac{R_4}{R_{200}} > 0.5$ El suelo es gravoso.
- $\frac{R_4}{R_{200}} \leq 0.5$ El suelo es arenoso.

8. A partir de los resultados de laboratorio se determinan todos los valores de los parámetros requeridos en la Tabla 2.9, para poder clasificar el suelo, como por ejemplo el coeficiente de gradación, coeficiente de uniformidad, límite líquido e índice de plasticidad y en el suelo que se ajuste a todos los criterios es el símbolo de grupo correcto.

9. Si el suelo es de grano fino a partir de los resultados en laboratorio del límite líquido e índice de plasticidad se procede a clasificar el suelo según la Tabla 2.9, y en el suelo que se ajuste a todos los criterios es el símbolo de grupo correcto.

La designación ASTM D-2487 además creó un sistema para asignar *nombres de grupo* a los suelos, esto con el fin de dar una identificación más precisa a los suelos clasificados. Estos nombres de grupo están reunidos en las Tablas 2.10, 2.11, 2.12 y 2.13. y son explicadas a continuación:

- Para **suelos gravosos**, ir a la Tabla 2.10, para encontrar el nombre de grupo.

Donde:

SF = fracción de arena = R_{200} - GF

GF = fracción de grava = R_4

- Para **suelos arenosos**, ir a la Tabla 2.11, para encontrar el nombre de grupo.
- Para **suelos finos inorgánicos**, ir a la Tabla 2.12, para encontrar el nombre de grupo.
- Para **suelos finos orgánicos**, ir a la Tabla 2.13, para encontrar el nombre de grupo.

Una vez ya clasificado el suelo, es decir ya hallado el símbolo y nombre de grupo adecuados, el reporte debe incluir el nombre de grupo, símbolo de grupo y los resultados de los ensayos de laboratorio. En la distribución del tamaño de partículas deben estar los porcentajes de grava, arena y finos. El informe se coloca de la siguiente manera, primero se pone el símbolo de grupo correspondiente al suelo entre del paréntesis, seguido del nombre de grupo y demás resultados, como por ejemplo para un suelo clasificado con un símbolo de grupo GC, y un nombre de grupo, grava arcillosa con arena, pero con una considerable cantidad de guijarros en la muestra de suelo inicial, se escribirá de la siguiente manera:

Suelo (GW) Grava arcillosa con arena y guijarros.

Tabla 2.9 Símbolos de grupo para la clasificación de suelos según el sistema Unificado.

| División Principal | Criterios | Símbolo de Grupo |
|--|--|--|
| Suelo de grano grueso, $R_{200} > 50$ | | |
| Suelo gravoso $R_4 > 0.5 R_{200}$ | $F_{200} < 5, C_U \geq 4, 1 \leq C_Z \leq 3$ | GW |
| | $F_{200} < 5, C_U < 4$ y/o C_Z no entre 1 y 3. | GP |
| | $F_{200} > 12, IP < 4$, o Límites de Atterberg debajo de la línea A (Figura 20) | GM |
| | $F_{200} > 12, IP > 7$, y Límites de Atterberg en o arriba de la línea A (Figura 20) | GC |
| | $F_{200} > 12, LL < 50, 4 \leq IP \leq 7$ y Límites de Atterberg en o arriba de la línea A (Figura 20) | GC-GM ^a |
| | $5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de gradación de GW y los criterios de plasticidad de GM. | GW-GM ^a |
| | $5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de gradación de GW y los criterios de plasticidad de GC. | GW-GC ^a |
| | $5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de gradación de GP y los criterios de plasticidad de GM. | GP-GM ^a |
| | $5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de gradación de GP y los criterios de plasticidad de GC. | GP-GC ^a |
| | Suelo arenoso, $R_4 \leq 0.5 R_{200}$ | $F_{200} < 5, C_U \geq 6, 1 \leq C_Z \leq 3$ |
| $F_{200} < 5, C_U \geq 4$ y/o C_Z no entre 1 y 3. | | SP |
| $F_{200} > 12, IP < 4$, o Límites de Atterberg debajo de la línea A (Figura 20) | | SM |
| $F_{200} > 12, IP > 7$, y Límites de Atterberg en o arriba de la línea A (Figura 20) | | SC |
| $F_{200} > 12, LL < 50, 4 \leq IP \leq 7$ y Límites de Atterberg en o arriba de la línea A. | | SC-SM ^a |
| $5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de gradación de SW y los criterios de plasticidad de SM. | | SW-SM ^a |
| $5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de gradación de SW y los criterios de plasticidad de SC. | | SW-SC ^a |
| $5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de gradación de SP y los criterios de plasticidad de SM. | | SP-SM ^a |
| $5 \leq F_{200} \leq 12$; cumple los criterios de gradación de SP y los criterios de plasticidad de SC. | | SP-SC ^a |
| Suelo de grano fino (inorgánico), $R_{200} \leq 50$ | | |
| Suelo limoso y arcilloso, $LL < 50$ | $IP < 4$, o Límites de Atterberg debajo de la línea A (Figura 20.) | ML |
| | $IP > 7$, y Límites de Atterberg en o arriba de la línea A (Figura 20.) | CL |
| Suelo limoso y arcilloso, $LL \geq 50$ | $4 \leq IP \leq 7$ y Límites de Atterberg arriba de la línea A (Figura 20.) | CL-ML ^a |
| | Límites de Atterberg debajo de la línea A (Figura 120.) | MH |
| | Límites de Atterberg en o arriba de la línea A (Figura 20.) | CH |
| Suelo de grano fino (orgánico) | | |
| Limo orgánico y arcilla, $LL < 50$ | $\frac{LL_{\text{no secado en horno}}}{LL_{\text{secado en horno}}} < 0.75$ | OL |
| | $\frac{LL_{\text{no secado en horno}}}{LL_{\text{secado en horno}}} < 0.75$ | OH |
| Limo orgánico y arcilla, $LL \geq 50$ | Turba, loos y otros suelos altamente orgánicos. | Pt |
| <p>Nota: F_{200} = Por ciento que pasa por el tamiz N° 200; R_{200} = Por ciento retenido en el tamiz N° 200 ($R_{200} = 100 - F_{200}$); R_4 = Por ciento retenido en el tamiz N° 4 ($R_4 = 100 - F_4$); C_U = Coeficiente de uniformidad (D_{60} / D_{10}); C_Z = Coeficiente de gradación ($D_{30}^2 / D_{60} \cdot D_{10}$); LL = Límite líquido; IP = Índice de plasticidad ($IP = LL - LP$), LP = Límite plástico.</p> <p>^a Casos de frontera y de clasificación doble.</p> | | |

Tabla 2.10 Nombres de grupo para suelos gravosos, Norma ASTM D-2487

| Símbolo de grupo | Criterio | Nombre de grupo |
|------------------|----------|--|
| | SF (%) | |
| GW | < 15 | Grava bien gradada |
| | ≥ 15 | Grava bien gradada con arena |
| GP | < 15 | Grava pobremente gradada |
| | ≥ 15 | Grava pobremente gradada con arena |
| GM | < 15 | Grava limosa |
| | ≥ 15 | Grava limosa con arena |
| GC | < 15 | Grava arcillosa |
| | ≥ 15 | Grava arcillosa con arena |
| GC-GM | < 15 | Grava limo arcillosa |
| | ≥ 15 | Grava limo arcillosa con arena |
| GW-GM | < 15 | Grava bien gradada con limo |
| | ≥ 15 | Grava bien gradada con limo y arena |
| GW-GC | < 15 | Grava bien gradada con arcilla |
| | ≥ 15 | Grava bien gradada con arcilla y arena |
| GP-GM | < 15 | Grava pobremente gradada con limo |
| | ≥ 15 | Grava pobremente gradada con limo y arena |
| GP-GC | < 15 | Grava pobremente gradada con arcilla |
| | ≥ 15 | Grava pobremente gradada con arcilla y arena |

Nota: Fracción de arena = porcentaje del suelo que pasa el tamiz No. 4 pero es retenido por el tamiz N° 200 = $R_{200} - R_4$; fracción de grava = porcentaje de suelo que pasa el tamiz de 3 [in]. Pero es retenido por el tamiz No. 4 = R_4 .

Tabla 2.11 Nombres de grupo para suelos arenosos según la ASTM D-2487

| Símbolo de grupo | Criterio | Nombre de grupo |
|------------------|----------|--|
| | GF (%) | |
| SW | < 15 | Arena bien gradada |
| | ≥ 15 | Arena bien gradada con grava |
| SP | < 15 | Arena pobremente gradada |
| | ≥ 15 | Arena pobremente gradada con grava |
| SM | < 15 | Arena limosa |
| | ≥ 15 | Arena limosa con grava |
| SC | < 15 | Arena arcillosa |
| | ≥ 15 | Arena arcillosa con grava |
| SM-SC | < 15 | Arena limosa arcillosa |
| | ≥ 15 | Arena limosa arcillosa con grava |
| SW-SM | < 15 | Arena bien gradada con limo |
| | ≥ 15 | Arena bien gradada con limo y grava |
| SW-SC | < 15 | Arena bien gradada con arcilla |
| | ≥ 15 | Arena bien gradada con arcilla y grava |
| SP-SM | < 15 | Arena pobremente gradada con limo |
| | ≥ 15 | Arena pobremente gradada con limo y grava |
| SP-SC | < 15 | Arena pobremente gradada con arcilla |
| | ≥ 15 | Arena pobremente gradada con arcilla y grava |

Tabla 2.12 Nombres de grupo para suelos finos inorgánicos, Norma ASTM D-2487

| Símbolo de Grupo | R₂₀₀ | SF/GF | GF | SF | Nombre de Grupo |
|-------------------------|------------------------|--------------|-----------|-----------|----------------------------------|
| CL | | | | | Arcilla magra |
| | 15 a 29 | ≥1 | | | Arcilla magra con arena |
| | | <1 | | | Arcilla magra con grava |
| | ≥30 | ≥1 | <15 | | Arcilla magra arenosa |
| | | ≥1 | ≥15 | | Arcilla magra arenosa con grava |
| | | <1 | | <15 | Arcilla magra gravosa |
| ML | | <1 | | ≥15 | Arcilla magra gravosa con arena |
| | <15 | | | | Limo |
| | 15 a 29 | ≥1 | | | Limo con arena |
| | | <1 | | | Limo con grava |
| | ≥30 | ≥1 | <15 | | Limo arenoso |
| | | ≥1 | ≥15 | | Limo arenoso con grava |
| CL-ML | | <1 | | <15 | Limo gravoso |
| | | <1 | | ≥15 | Limo gravoso con arena |
| | <15 | | | | Arcilla limosa |
| | 15 a 29 | ≥1 | | | Arcilla limosa con arena |
| | | <1 | | | Arcilla limosa con grava |
| | ≥30 | ≥1 | <15 | | Arcilla limosa arenosa |
| CH | | ≥1 | ≥15 | | Arcilla limosa arenosa con grava |
| | | <1 | | <15 | Arcilla limosa gravosa |
| | | <1 | | ≥15 | Arcilla limosa gravosa con arena |
| | <15 | | | | Arcilla grasa |
| | 15 a 29 | ≥1 | | | Arcilla grasa con arena |
| | | <1 | | | Arcilla grasa con grava |
| MH | | ≥1 | <15 | | Arcilla grasa arenosa |
| | | ≥1 | ≥15 | | Arcilla grasa arenosa con grava |
| | | <1 | | <15 | Arcilla grasa gravosa |
| | | <1 | | ≥15 | Arcilla grasa gravosa con arena |
| | <15 | | | | Limo elástico |
| | 15 a 29 | ≥1 | | | Limo elástico con arena |
| | | <1 | | | Limo elástico con grava |
| | ≥30 | ≥1 | <15 | | Limo elástico arenoso |
| | | ≥1 | ≥15 | | Limo elástico arenoso con grava |
| | | <1 | | <15 | Limo elástico gravoso |
| | | <1 | | ≥15 | Limo elástico gravoso con arena |

Nota: R₂₀₀ = porcentaje de suelo retenido sobre el tamiz No. 200; fracción de arena = porcentaje del suelo que pasa el tamiz N° 4 pero retenidos sobre el tamiz N° 200 = R₂₀₀ - R₄; fracción de grava = porcentaje del suelo que pasa el tamiz de 3-in. pero retenido sobre el tamiz No. 4 = R₄.

Tabla 2.13 Nombres de grupo para suelos finos orgánicos, Norma ASTM D-2487

| Símbolo de grupo | Criterio | | | | | Nombre de Grupo |
|------------------|---|------------------|-------|--------|--------|------------------------------------|
| | Plasticidad | R ₂₀₀ | SF/GF | GF (%) | SF (%) | |
| OL | IP _{NOD} ≥ 4 | <15 | | | | Arcilla orgánica |
| | IP _{NOD} ≥ 0,73x(LL _{NOD} - 20) | 15 a 29 | ≥1 | | | Arcilla orgánica con arena |
| | | | <1 | | | Arcilla orgánica con grava |
| | | ≥30 | ≥1 | <15 | | Arcilla orgánica arenosa |
| | | | ≥1 | ≥15 | | Arcilla orgánica arenosa con grava |
| | | | <1 | | <15 | Arcilla orgánica gravosa |
| | | | <1 | | ≥15 | Arcilla orgánica gravosa con arena |
| OL | IP _{NOD} < 4 | <15 | | | | Limo orgánico |
| | IP _{NOD} < 0,73x(LL _{NOD} - 20) | 15 a 29 | ≥1 | | | Limo orgánico con arena |
| | | | <1 | | | Limo orgánico con grava |
| | | ≥30 | ≥1 | <15 | | Limo orgánico arenoso |
| | | | ≥1 | ≥15 | | Limo orgánico arenoso con grava |
| | | | <1 | | <15 | Limo orgánico gravoso |
| | | | <1 | | ≥15 | Limo orgánico gravoso con arena |
| OH | IP _{NOD} ≥ 0,73x(LL _{NOD} - 20) | <15 | | | | Arcilla orgánica |
| | | 15 a 29 | ≥1 | | | Arcilla orgánica con arena |
| | | | <1 | | | Arcilla orgánica con grava |
| | | ≥30 | ≥1 | <15 | | Arcilla orgánica arenosa |
| | | | ≥1 | ≥15 | | Arcilla orgánica arenosa con grava |
| | | | <1 | | <15 | Arcilla orgánica gravosa |
| | | | <1 | | ≥15 | Arcilla orgánica gravosa con arena |
| OH | IP _{NOD} < 0,73x(LL _{NOD} - 20) | <15 | | | | Limo orgánico |
| | | 15 a 29 | ≥1 | | | Limo orgánico con arena |
| | | | <1 | | | Limo orgánico con grava |
| | | ≥30 | ≥1 | <15 | | Limo orgánico arenoso |
| | | | ≥1 | ≥15 | | Limo orgánico arenoso con grava |
| | | | <1 | | <15 | Limo orgánico gravoso |
| | | | <1 | | ≥15 | Limo orgánico gravoso con arena |

El subíndice NOD significa "no secado".

Tabla 2.14 Evaluación de las propiedades del suelo en base al símbolo de grupo, Coduto, 1999

| Símbolo de grupo | Características de compactación | Compresión y expansión | Drenaje y conductividad hidráulica | Valor como material de relleno | Valor como un pavimento, subrasante cuando no hay heladas | Valor como una base granular para pavimento |
|------------------|---------------------------------|------------------------|------------------------------------|---|---|--|
| GW | Bueno | Casi nada | Buen drenaje; permeable | Muy estable | Excelente | Bueno |
| GP | Bueno | Casi nada | Buen drenaje; permeable | Razonablemente estable | Excelente a bueno | Pobre a regular |
| GM | Bueno | Pequeño | Pobre drenaje, semipermeable | Razonablemente estable | Excelente a bueno | Regular a pobre |
| GC | Bueno a regular | Pequeño | Pobre drenaje, semipermeable | Razonablemente estable | Bueno | Bueno a regular No conveniente si está sujeto a heladas |
| SW | Bueno | Casi nada | Buen drenaje; permeable | Muy estable | Bueno | Regular a pobre |
| SP | Bueno | Casi nada | Buen drenaje; permeable | Razonablemente estable cuando denso | Bueno a regular | Pobre |
| SM | Bueno | Pequeño | Poco drenaje; impermeable | Razonablemente estable cuando denso | Bueno a regular | Pobre |
| SC | Bueno a regular | Pequeño a mediano | Poco drenaje; impermeable | Razonablemente estable | Bueno a regular | Regular a pobre No conveniente si está sujeto a heladas |
| ML | Bueno a pobre | Pequeño a mediano | Poco drenaje; impermeable | Estabilidad regular Se requiere buena compactación | Regular a pobre | No conveniente |
| CL | Bueno a regular | Mediano | No hay drenaje; impermeable | Estabilidad buena | Regular a pobre | No conveniente |
| OL | Bueno a pobre | Mediano a alto | Poco drenaje; impermeable | Inestable No se debería usar | Pobre, no conveniente | No conveniente |
| MH | Regular a pobre | Alto | Poco drenaje; impermeable | Estabilidad de regular a pobre Se requiere buena compactación | Pobre | No conveniente |
| CH | Regular a pobre | Muy alto | No hay drenaje; impermeable | Estabilidad regular Expansiones, debilitamientos, contracciones, roturas | Pobre a muy pobre | No conveniente |
| OH | Regular a pobre | Alto | No hay drenaje; impermeable | Inestable No debería ser usado | Muy pobre | No conveniente |
| Pt | No conveniente | Muy alto | Regular a pobre drenaje | No debería ser usado | No conveniente | No conveniente |

2.6.2 Sistema de clasificación AASHTO.

El sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) (Designación ASTM D-3282; método AASHTO M145) es uno de los primeros sistemas de clasificación de suelos, desarrollado por Terzaghi y Hogentogler en 1928. Este sistema pasó por varias revisiones y actualmente es usado para propósitos ingenieriles enfocados más en el campo de las carreteras como la construcción de los terraplenes, subrasantes, subbases y bases de las carreteras. Sin embargo, es necesario recordar que un suelo que es bueno para el uso de subrasantes de carreteras puede ser muy pobre para otros propósitos.

Este sistema de clasificación está basado en los resultados de la determinación en laboratorio de la distribución del tamaño de partículas, el límite líquido y el límite plástico.

La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un índice de grupo, que es un valor calculado a partir de una ecuación empírica. El comportamiento geotécnico de un suelo varía inversamente con su índice de grupo, es decir que un suelo con índice de grupo igual a cero indica que es material “bueno” para la construcción de carreteras, y un índice de grupo igual a 20 o mayor, indica un material “muy malo” para la construcción de carreteras.

Los suelos clasificados dentro los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares de los cuales 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz N°200. Los suelos que tienen más del 35% de partículas que pasan a través del tamiz N°200 se clasifican dentro de los grupos de material fino A-4, A-5, A-6 y A-7. Estos suelos son principalmente limo y materiales de tipo arcilla.

El sistema de clasificación AASHTO presenta las siguientes características:

2.6.2.1 Características del sistema de clasificación AASHTO (ASTM D-3282).

1. Clasifica a los suelos en tres principales categorías:

- **Suelos granulares.** Son suelos cuyo porcentaje que pasa el tamiz N°200 es menor o igual al 35% del total de la muestra. Estos suelos constituyen los grupos A-1, A-2 y A-3.
- **Suelos limo-arcilla** o material fino. Son suelos cuyo porcentaje que pasa el tamiz N°200 es mayor al 35% del total de la muestra. Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7.
- **Suelos orgánicos.** Son los suelos que están constituidos principalmente por materia orgánica. Este tipo de suelos constituye el grupo A-8.

2. Adopta el siguiente rango de tamaño de partículas:

- **Cantos rodados.** Son fragmentos de roca, usualmente redondeados por abrasión, que son retenidos en el tamiz de 3" (75 mm).
- **Grava.** Es la fracción que pasa el tamiz de 3" (75 mm) y es retenido en el tamiz N°10 (2 mm).
- **Arena.** Es la fracción que pasa el tamiz N°10 (2 mm) y es retenido en el tamiz N°200 (0.075 mm).
- **El limo y la arcilla.** Son partículas que pasan el tamiz N°200 (0.075 mm).

3. Establece un rango del índice de plasticidad que diferencia a los suelos limosos de los suelos arcillosos.

- El término **limoso** es aplicado a la fracción fina del suelo que tiene un índice de plasticidad de 10 o menos.
- El término **arcilloso** es aplicado cuando la fracción fina tiene un índice de plasticidad de 11 o más.

4. Considera solo la porción de suelo que pasa a través del tamiz de 75 mm. Si existieran partículas mayores (guijarros y cantos rodados), estas son excluidas de la muestra de suelo que será clasificado, sin embargo, el porcentaje de ese material debe ser medido y anotado junto con el resultado de la clasificación.

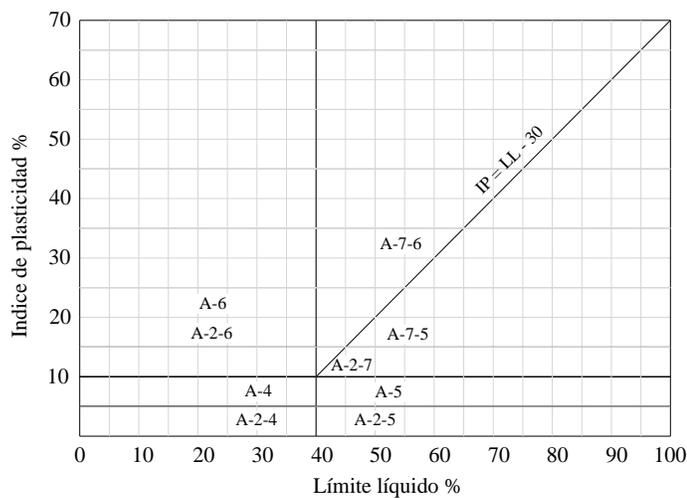
2.6.2.2 Procedimiento de clasificación.

1. Clasificar el suelo en un grupo o subgrupo, apropiado, o en ambos, de acuerdo con las Tablas 2.15.(a) y 2.15.(b), a partir de los resultados de los ensayos determinados. Para saber que tabla usar, se necesita conocer, que porcentaje de suelo de la muestra pasa a través del tamiz N°200, en la parte superior de cada tabla se especifica un porcentaje, que es un requisito que debe cumplir la muestra de suelo para poder utilizar la tabla.

2. Una vez elegida la tabla correcta se deben aplicar los datos de los ensayos requeridos de izquierda a derecha mediante un proceso de eliminación, el primer grupo en que los datos se ajusten adecuadamente es la clasificación correcta. Debido a esto es que en la Tabla 2.15.(a), el grupo A-3 va primero que el A-2, esto no quiere decir que el grupo A-3 sea mejor que el A-2.

La Figura 2.21, es una forma más fácil y rápida de clasificar aproximadamente los materiales limo-arcillas, en base a los valores de LL y de IP. Todos los valores de los límites de consistencia se presentan como números enteros. Si aparecen números fraccionarios en los informes del ensayo, aproxímelos al número entero más próximo para utilizarlo en la clasificación.

Figura 2.21 Variación del límite líquido e índice de plasticidad para los suelos de los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7



Fuente: Norma ASTM, 2003

Tabla 2.15 Clasificación de suelos sistema AASHTO. (a) Material granular; (b) Material fino.

| Clasificación general | Materiales Granulares 35% o menos del total de la muestra pasa el tamiz N° 200 | | | | | | |
|---|---|--------|------------|--------------------------------|--|--------|--------|
| | A-1 | | | A-2 | | | |
| Clasificación de grupo | A-1-a | A-1-b | A-3 | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 |
| Análisis por tamices (Porcentaje que pasa por los tamices): | | | | | | | |
| N° 10 (2.00 mm.) | 50 max | | | | | | |
| N° 40 (0.425 mm.) | 30 max | 50 max | 51 min | | | | |
| N° 200 (0.075 mm.) | 15 max | 25 max | 10 max | 35 max | 35 max | 35 max | 35 max |
| Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40 | | | | | | | |
| Límite líquido | | | | 40 max | 41 min | 40 max | 41 min |
| Índice de plasticidad | 7 max | | NP | 10 max | 10 max | 11 min | 11 min |
| Tipos de materiales significativos constituyentes | Fragmentos de piedra, grava y arena | | Arena fina | Grava o arena limosa o arcilla | | | |
| Clasificación general | Materiales limo - arcilla Mas del 35% del total de la muestra pasa por el tamiz N° 200 | | | | | | |
| Clasificación de grupo | A-4 | | A-5 | A-6 | A - 7 A - 7 - 5 ^a A - 7- 6 ^b | | |
| Análisis por tamices (porcentaje que pasa por el tamiz N°200 (0.075 mm.)) | 36 min. | | 36 min. | 36 min. | 36 min. | | |
| Características de fracción que pasa por N°40 (0.425 mm.) | | | | | | | |
| Límite líquido | 40 máx. | | 41 min. | 40 máx. | 41 min. | | |
| Índice de plasticidad | 10 máx. | | 10 máx. | 11 min | 11 min. | | |
| Tipos de materiales constituyentes significativos | Suelos limoso | | | Suelo arcillo | | | |
| Relación general como subgrado | Regular a pobre | | | | | | |
| ^a Para A-7-5, $I_p \leq L_L - 30$ | | | | | | | |
| ^b Para A-7-6, $I_p > L_L - 30$ | | | | | | | |

En la Figura 2.21. se muestra el gráfico del rango de límite líquido y el índice de plasticidad para suelos que caen dentro de los grupos A-2, A-4, A-5, A-6 y A-7, esto da una aproximación importante para clasificar el suelo. No hay que olvidar que el Suelo A-2 contiene menos del 35% de finos que pasan por el tamiz N°200, es decir que esta tabla no es solo para material fino.

3. Cálculo del índice de grupo.

Para evaluar la calidad de un suelo como material para terraplenes, subrasantes, subbases y bases de las carreteras, se debe añadir índices de grupo (IG). Este índice es escrito entre paréntesis después de la designación del grupo o subgrupo, como por ejemplo A-2-6 (3), A-4 (5), A-6 (12), A-7-5 (17), etc. A continuación, se detalla la forma de cálculo del índice de grupo y de las consideraciones que se deben tomar en cuenta.

1.- El índice de grupo es calculado a partir de la siguiente ecuación empírica:

Ecuación 2.12 índice de grupo

$$IG = (F_{200} - 35) \cdot [0.2 + 0.005 \cdot (LL - 40)] + 0.01 \cdot (F_{200} - 15) \cdot (IP - 10)$$

Donde:

F_{200} = Porcentaje que pasa a través del tamiz N°200, expresado como número entero.

LL = Límite líquido.

IP = Índice de plasticidad.

2.- El primer término de la ecuación: “ $IG = (F_{200} - 35) \cdot [0.2 + 0.005 \cdot (LL - 40)]$ ” es el índice parcial de grupo determinado con el límite líquido. El segundo término: $0.01 \cdot (F_{200} - 15) \cdot (IP - 10)$ es el índice parcial de grupo determinado con el índice de plasticidad.

3.- Si el resultado del índice de grupo calculado es un valor negativo, entonces el índice de grupo (IG) será: $IG = 0$.

4.- Si el suelo no es plástico y no se puede determinar el Límite líquido, entonces el índice de grupo (IG) será: $IG = 0$. Este es el caso de los de los suelos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5 y A-3, en donde su índice de grupo siempre es cero.

5.- Si el valor del índice de grupo calculado resulta ser un número decimal, se redondea al número entero más cercano según los siguientes criterios matemáticos.

- Si la parte decimal es menor que 0.5 entonces se elimina, ej. si $IG = 3.4$ se redondea a 3.
- Si la parte decimal es mayor que 0.5 entonces se aumenta en una unidad al número entero, ej. si $IG = 3.6$ se redondea a 4.
- Si la parte decimal es igual a 0.5 entonces se redondea al número entero par más próximo, ej. si $IG = 3.5$ se redondea a 4 y si $IG = 4.5$ se redondea a 4.

El índice de grupo de los suelos A-2-6 y A-2-7 debe calcularse utilizando solo la porción del IP:

Ecuación 2.13 El índice de grupo de los suelos A-2-6 y A-2-7

$$IG = 0.01 \cdot (F_{200} - 15) \cdot (IP - 10)$$

2.6.2.3 Propiedades de los suelos en el uso de carreteras.

En la Tabla 2.16. se hace un resumen de las características y propiedades físicas de cada uno de estos suelos, estas características son la permeabilidad, capilaridad, elasticidad, cambios de volumen, para cada tipo uso que se le vaya a dar al suelo. Estas características dan una pauta de cuan beneficioso o no es un suelo en determinadas localizaciones de una carretera, ya sea en base, subbase, etc.

Mientras que en la Tabla 2.17. se hace un resumen de la compactación y tipo de pavimento recomendado para cada uno de estos suelos. Este resumen ayuda de manera notable a los ingenieros civiles, a poder distinguir después de tener el resultado de la clasificación qué medidas se deben tomar para el posterior uso de estos suelos, además de ser una ayuda en

la elección misma del equipo recomendable para un mejor compactado y de la elección del tipo de pavimento recomendable.

Tabla 2.16 Propiedades y características físicas. en suelos Granulares y suelos Finos, Valle Rodas, 1976
Suelos Granulares. (35% o menos pasa el tamiz N°200)

| Grupo | Descripción del material | Sub-grupo | Descripción del material | Permeabilidad | Capilaridad | Elasticidad | Cambios volumen | Para Subbase | Para Base | Terreno fundación | Para terraplén |
|-------|--|---------------|---|-------------------|--------------------------------|----------------|-------------------|---------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| A-1 | Mezclas bien gradadas compuestas de fragmentos de piedra, grava, arena gruesa, arena fina y material ligante de suelo poco plástico o de baja plasticidad. Se incluyen también en este grupo fragmentos de roca, grava, arena gruesa, cenizas volcánicas, etc. sin un ligante de suelo | A-1-a | - Materiales formados por fragmentos de roca y grava, con o sin material ligante bien gradado de material fino. | Baja | Baja | Muy Baja | Muy pequeños | Bueno a excelente | Bueno a excelente | Bueno a excelente | Bueno a excelente |
| | | A-1-b | - Materiales formados por arena gruesa con o sin material ligante bien gradado | | | | | | | | |
| A-2 | Mezclas mal proporcionadas de grava, arena, limo y arcilla. Tienen material fino (limo y arcilla) en exceso a los límites establecidos por los suelos A-1 y A-3. | A-2-4 y A-2-5 | - Materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35% y cuya fracción que pasa el tamiz N° 40 tiene las mismas características de los suelos A-4 y A-5, respectivamente, es decir mismos rangos en el límite líquido e índice de plasticidad. Estos grupos incluyen aquellos suelos gravosos y arenosos (arena gruesa), que tengan un contenido de limo, o índices de grupo por encima de los indicados para el grupo A-1. Así mismo incluyen a las arenas finas con un contenido de limo no plástico por encima de las limitaciones del grupo A-3. | Baja a Mediana | Mediana A veces perjudicial | Baja a elevada | Mediana a elevada | Regular | Malo a regular | Bueno a excelente | Regular a bueno |
| | | A-2-6 y A-2-7 | - Los materiales de estos subgrupos son semejantes a los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5, excepto en que la fracción fina que pasa el tamiz N° 40 contiene arcilla plástica que tiene las mismas características de los suelos A-6 y A-7, respectivamente, es decir mismos rangos en el límite líquido e índice de plasticidad. | | | | | | | | |
| A-3 | Arenas finas, de playa o la arena fina de desierto, sin finos de arcilla, limo o con una pequeña cantidad de limo no plástico. Este grupo incluye también las mezclas aluviales de arena fina o de río mal gradada con pequeñas cantidades de grava y arena gruesa. | — | — | Mediana a Elevada | Baja | | Muy pequeños | Regular a excelente | Regular a excelente | Bueno a excelente | Regular a bueno |

Suelos Finos. (Mas del 35% pasa el tamiz N° 200)

| Grupo | Descripción del material | Sub-grupo | Descripción del material | Permeabilidad | Capilaridad | Elasticidad | Cambios volumen | Para Subbase | Para Base | Terreno fundación | Para terraplén |
|-------|--|-----------|---|----------------------------------|--|-------------------|--|------------------|----------------|-------------------|----------------|
| A-4 | Suelos limosos poco o nada plásticos, que normalmente tienen un 75% o más de material fino que pasa el tamiz N° 200. Además, se incluyen en este grupo las mezclas de suelo limoso fino con hasta un 64% de grava y arena (material retenido sobre el tamiz N° 200). | — | _____ | Baja a mediana | Elevada a veces perjudicial | Baja a mediana | Pequeños a elevados. Perjudiciales en época de heladas | Malo a regular | Malo a regular | Malo a regular | Malo a bueno |
| A-5 | Material limoso semejante al A-4, generalmente de carácter micáceo o diatomáceo. Tienen mayor elasticidad. | — | _____ | Baja a mediana | Regular a elevada A veces perjudicial | Mediana a elevada | Regulares a elevados | Malo | Pésimo | Malo a pésimo | Malo a pésimo |
| A-6 | Arcillas plásticas, en las cuales el 75% o más pasa el tamiz N° 200. Además, suelos finos arcillosos que contengan hasta un 64% de arena y grava. Presentan generalmente, grandes cambios de volumen cuando absorben agua. | — | _____ | Baja a prácticamente impermeable | Regular a elevada | Pequeña a mediana | Medianos a elevados | Regular a pésimo | Malo a pésimo | Regular a bueno | Malo a regular |
| A-7 | Terrenos arcillosos, semejantes a los A-6, pero con límites líquidos elevados como los del grupo A-5. | A-7-5 | Suelos A-7 con índices de plasticidad relativamente bajos en relación a sus Límites líquidos. Pueden ser muy elásticos y experimentar grandes cambios de volumen. | Baja | Regular a elevada | Mediana a elevada | Medianos a elevados | Regular a pésimo | Malo a pésimo | Regular a pésimo | Malo a pésimo |
| | | A-7-6 | Suelos A-7 con índices de plasticidad elevados en relación a sus límites líquidos. Experimentan grandes cambios de volumen. | | | | | | | | |

| Grupo | Descripción del material | Sub-grupo | Descripción del material | Compactación | | Fallas que se registran comúnmente | Procedimientos aconsejables para mejorar el terreno | Tipo de pavimento recomendado |
|-------|--|---------------|--|--|--|--|---|---|
| | | | | Comportamiento del terreno después de compactado | Equipo recomendado para la compactación | | | |
| A-1 | Mezclas bien gradadas compuestas de fragmentos de piedra, grava, arena gruesa, arena fina y material ligante de suelo poco plástico o de baja plasticidad. Se incluyen también en este grupo fragmentos de roca, grava, arena gruesa, cenizas volcánicas, etc. sin un ligante de suelo | A-1-a | - Materiales formados por fragmentos de roca y grava, con o sin material ligante bien gradado de material fino. | Excelente. Estable en tiempo seco y húmedo. | Rodillos "pata de cabra". Aplanadoras Rodillos "pata de cabra". Aplanadoras | Ninguna | _____ | Debidamente compactado, solo requiere superficie de desgaste. Aplicaciones superficiales de mezclas bituminosas dan buenos resultados. |
| | | A-1-b | - Materiales formados por arena gruesa con o sin material ligante bien gradado | | | | | |
| A-2 | Mezclas mal proporcionadas de grava, arena, limo y arcilla. Tienen material fino (limo y arcilla) en exceso a los límites establecidos por los suelos A-1 y A-3. | A-2-4 y A-2-5 | - Materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35% y cuya fracción que pasa el tamiza N° 40 tiene las mismas características de los suelos A-4 y A-5, respectivamente, es decir mismos rangos en el límite líquido e índice de plasticidad. Estos grupos incluyen aquellos suelos gravosos y arenosos (arena gruesa), que tengan un contenido de limo, o índices de grupo por encima de los indicados para el grupo A-1. Así mismo incluyen a las arenas finas con un contenido de limo no plástico por encima de las limitaciones del grupo A-3. | Bueno a excelente. Estable en tiempo seco. A veces polvoriento. Se reblandece cuando húmedo. | Rodillos "pata de cabra". Aplanadoras Rodillos "pata de cabra". Aplanadoras | Se reblandece cuando húmedo. Se vuelve suelto y polvoriento cuando seco. | Si el terreno presenta cambios perjudiciales de volumen, capilaridad o elasticidad, añádase arena o piedra triturada en proporciones convenientes. Mejórese el drenaje del suelo añadiendo material granular. | Si el terreno ha sido mejorado se comportara como A-1. En caso contrario, empléese pavimentos delgados de concreto o pavimentos flexibles de espesor regular. |
| | | A-2-6 y A-2-7 | - Los materiales de estos subgrupos son semejantes a los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5, excepto en que la fracción fina que pasa el tamiz N° 40 contiene arcilla plástica que tiene las mismas características de los suelos A-6 y A-7, respectivamente, es decir mismos rangos en el límite líquido e índice de plasticidad. | | | | | |
| A-3 | Arenas finas, de playa o la arena fina de desierto, sin finos de arcilla, limo o con una pequeña cantidad de limo no plástico. Este grupo incluye también las mezclas aluviales de arena fina o de río mal gradada con pequeñas cantidades de grava y arena gruesa. | _____ | _____ | Bueno a excelente. Es más estable bajo ciertas condiciones de humedad. | Aplanadora tándem, de 3 rodillos y con rodillos de caucho. | Inestable cuando seco. Tiende a deslizarse cuando no está confinado. | Añádase arcilla si se desea aumentar su poder ligante. Procure que el material se encuentre debidamente confinado a fin de que no se deslice bajo la acción de las cargas aplicadas. | Lo mismo que para el caso anterior del suelo A-2. |

Tabla 2.17 Compactación y tipo de pavimento. (a) Suelos granulares, (b) Suelos Finos, Valle Rodas, 1976

| Grupo | Descripción del material | Sub-grupo | Descripción del material | Compactación | | Fallas que se registran comúnmente | Procedimientos aconsejables para mejorar el terreno | Tipo de pavimento recomendado |
|-------|--|-----------|---|---|---|---|--|--|
| | | | | Comportamiento del terreno después de compactado | Equipo recomendado para la compactación | | | |
| A-4 | Suelos limosos poco o nada plásticos, que normalmente tienen un 75% o más de material fino que pasa el tamiz N° 200. Además, se incluyen en este grupo las mezclas de suelo limoso fino con hasta un 64% de grava y arena (material retenido sobre el tamiz N° 200). | — | — | Regular cuando seco. Inestable cuando húmedo. | Rodillos “pata de cabra”. Aplanadora tándem, de 3 rodillos y con rodillo de caucho | Absorbe agua rápidamente perdiendo estabilidad. Susceptible de reacción y deslaves en épocas de lluvias. Durante las heladas aumentan de volumen, rajando los pavimentos construidos sobre ellos. | Colóquese drenes para drenar las aguas subterráneas y material granular debajo de la subrasante. | Si hay drenaje adecuado puede construirse pavimentos de concreto o de asfalto de espesor regular. Si el drenaje no es bueno deberá emplearse pavimentos de concreto de buen espesor. |
| A-5 | Material limoso semejante al A-4, generalmente de carácter micáceo o diatómico. Tienen mayor elasticidad. | — | — | Malo a pésimo | Rodillos “pata de cabra”. Aplanadora tándem, de 3 rodillos y con rodillo de caucho | Semejante al grupo A-4. Presenta además, un estabilidad perjudicial que impide una buena compactación | Colóquese drenes para drenar las aguas subterráneas y material granular debajo de la subrasante. | Si hay drenaje adecuado y el suelo ha sido estabilizado puede emplearse una superficie bituminosa. En caso contrario, deberá emplearse pavimentos de concreto sobre base granular. |
| A-6 | Arcillas plásticas, en las cuales el 75% o más pasa el tamiz N° 200. Además, suelos finos arcillosos que contengan hasta un 64% de arena y grava. Presentan generalmente, grandes cambios de volumen cuando absorben agua. | — | — | Regular a bueno cuando seco. Malo cuando lluvioso. | Rodillos “pata de cabra”. Aplanadora tándem, de 3 rodillos y con rodillo de caucho | En época de lluvias se pone resbaladizo y los pavimentos fallan por falta de base firme. Cuando se humedece o se seca, sufre hinchamiento y contracciones perjudiciales. | Se recomienda la adición de material granular y además, un buen sistema de drenaje. | Si hay drenaje adecuado y el suelo ha sido estabilizado, puede colocarse un pavimento bituminoso. En caso contrario es preferible emplear pavimentos de concreto sobre bases granulares. |
| A-7 | Terrenos arcillosos, semejantes a los A-6, pero con límites líquidos elevados como los del grupo A-5. | A-7-5 | Suelos A-7 con índices de plasticidad relativamente bajos en relación a sus Límites líquidos. Pueden ser muy elásticos y experimentar grandes cambios de volumen. | Regular a bueno cuando seco. Malo cuando húmedo. | Rodillos “pata de cabra”. Aplanadora tándem, de 3 rodillos y con rodillo de caucho | Los mismos inconvenientes que el A-6. Presenta además, una elasticidad perjudicial que impide una buena compactación. | Se recomienda procedimientos análogos a los indicados para el terreno formado por material A-6. | Si hay drenaje adecuado y el suelo ha sido estabilizado, puede colocarse un pavimento bituminoso. En caso contrario es preferible emplear pavimentos de concreto sobre bases granulares. |
| | | A-7-6 | Suelos A-7 con índices de plasticidad elevados en relación a sus límites líquidos. Experimentan grandes cambios de volumen. | | | | | |

2.6.3 Comparación entre los sistemas de clasificación Unificado y AASHTO.

La principal diferencia en los dos sistemas de clasificación es el uso que tiene cada uno de ellos, ya que el sistema AASHTO es esencialmente para la construcción de carreteras mientras que el Unificado no presenta restricciones de ningún tipo y su uso es más general.

Ambos sistemas de clasificación están basados en los mismos ensayos de laboratorio, como la distribución de tamaño de partículas, el límite líquido y plástico, con la diferencia de que cada sistema adopta distintos valores como límites entre los tipos de suelos. Por ejemplo, el sistema AASHTO considera como suelo fino si más del 35% del total de la muestra de suelo pasa por el tamiz N°200, mientras que el sistema Unificado lo hace si más del 50% de la muestra de suelo pasa por el mismo tamiz.

En el sistema AASHTO el tamiz N°10 es el que separa la grava de la arena mientras que en el unificado es el tamiz N°4.

En el sistema Unificado los suelos gravosos de los arenosos están muy claramente separados, mientras que en el sistema AASHTO no lo están. El grupo A-2 en particular contiene una amplia variedad de suelos gravosos y arenosos. En el sistema Unificado los símbolos GW, SM, CH y otros son usados para una mejor descripción de las propiedades de los suelos, mientras que los símbolos de grupo A del sistema AASHTO no son tan descriptivos en este aspecto.

En el sistema Unificado se puede clasificar a los suelos orgánicos como OL, OH y Pt; mientras que en el sistema AASHTO no se los toma en cuenta en el proceso de clasificación, y se los deja con el grupo A-8, que no figura en las tablas de clasificación.

Liu (1967) hizo investigaciones comparando los sistemas de clasificación AASHTO y Unificado, llegando a obtener los siguientes resultados que son resumidos en las Tablas 2.18 y 2.19.

Tabla 2.18 Comparación del sistema AASHTO con el sistema Unificado

| Grupo del suelo en el sistema AASHTO | Comparación de los grupos de suelos en el sistema Unificado | | |
|--------------------------------------|---|------------|-------------------------|
| | Más Probable | Posible | Posible pero improbable |
| A-1-a | GW, GP | SW, SP | GM, SM |
| A-1-b | SW, SP, GM, SM | GP | — |
| A-3 | SP | — | SW, GP |
| A-2-4 | GM, SM | GC, SC | GW, GP, SW, SP |
| A-2-5 | GM, SM | — | GW, GP, SW, SP |
| A-2-6 | GC, SC | GM, SM | GW, GP, SW, SP |
| A-2-7 | GM, GC, SM, SC | — | GW, GP, SW, SP |
| A-4 | ML, OL | CL, SM, SC | GM, GC |
| A-5 | OH, MH, ML, OL | — | SM, GM |
| A-6 | CL | ML, OL, SC | GC, GM, SM |
| A-7-5 | OH, MH | ML, OL, CH | GM, SM, GC, SC |
| A-7-6 | CH, CL | ML, OL, SC | OH, MH, GC, GM, SM |

Fuente: Liu, 1976

Tabla 2.19 Comparación del sistema Unificado con el sistema AASHTO

| Grupo del suelo en el sistema Unificado | Comparación de los grupos de suelos en el sistema AASHTO | | |
|---|--|------------------------|------------------------------------|
| | Más Probable | Posible | Posible pero improbable |
| GW | A-1-a | — | A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 |
| GP | A-1-a | A-1-b | A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 |
| GM | A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7 | A-2-6 | A-4, A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a |
| GC | A-2-6, A-2-7 | A-2-4 | A-4, A-6, A-7-6, A-7-5 |
| SW | A-1-b | A-1-a | A-3, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 |
| S P | A-3, A-1-b | A-1-a | A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-2-7 |
| SM | A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-7 | A-2-6, A-4 | A-5, A-6, A-7-5, A-7-6, A-1-a |
| SC | A-2-6, A-2-7 | A-2-4, A-6, A-4, A-7-6 | A-7-5 |
| ML | A-4, A-5 | A-6, A-7-5, A-7-6 | — |
| CL | A-6, A-7-6 | A-4 | — |
| OL | A-4, A-5 | A-6, A-7-5, A-7-6 | — |
| MH | A-7-5, A-5 | — | A-7-6 |
| CH | A-7-6 | A-7-5 | — |
| OH | A-7-5, A-5 | — | A-7-6 |
| Pt | — | — | — |

Fuente: Liu, 1976

2.7 Propiedades mecánicas de los suelos.

2.7.1 Compactación.

La compactación, en general, es la densificación del suelo por desalojo de aire, mediante la aplicación de energía mecánica. El grado de compactación de un suelo es medido en términos de su peso unitario seco.

Las variables determinantes de la compactación que se pueda lograr en un determinado material, son la humedad que posee el suelo, el tipo de suelo y el nivel de energía en la compactación.

Para el presente estudio investigativo, los ensayos de laboratorio usados para obtener la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo en la compactación son el Proctor Modificado.

La compactación de los suelos consiste en el mejoramiento de las propiedades ingenieriles del suelo por medio de energía mecánica. Esto se logra comprimiendo el suelo en un volumen más pequeño y así aumentando su peso específico seco (*densificación*). Los fundamentos de la compactación de suelos cohesivos son relativamente nuevos, R. Proctor en 1933 desarrolló los principios de la compactación en una serie de artículos. En su honor el ensayo de compactación es llamado ensayo de compactación Proctor. Proctor estableció que la compactación está en función de cuatro variables:

1. Densidad del material, ρ_d .
2. Contenido de humedad, w .
3. Esfuerzo de compactación.
4. Tipo de suelo (gradación, presencia de minerales de arcilla, etc.)

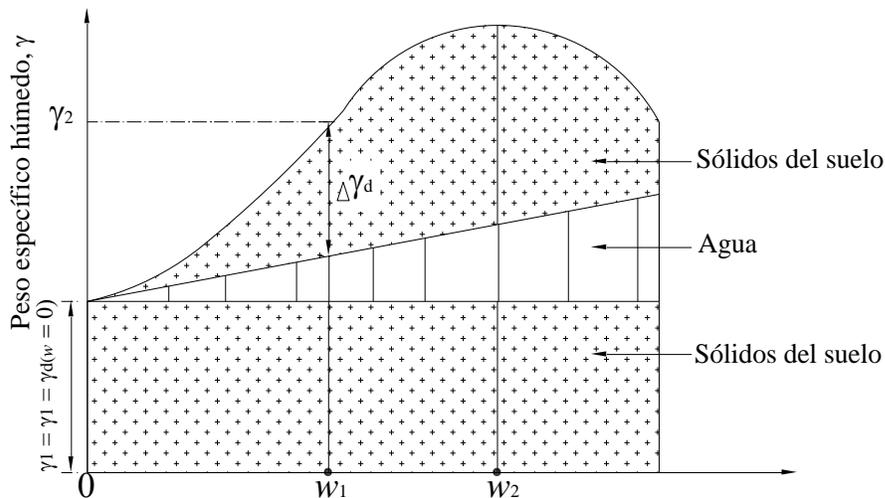
El esfuerzo de compactación es una medida de la energía mecánica aplicada a la masa del suelo. Para la compactación en campo el esfuerzo de compactación es el número de pasadas de un rodillo de cierto tipo y peso en un volumen de suelo dado.

El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco. Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, esta actúa como un agente

suavizante en las partículas del suelo (lubrica las partículas), lo que facilita que las partículas del suelo se deslicen una sobre cada otra y pasen a una configuración más densa, es decir que el peso específico seco después de la compactación al principio aumenta con el aumento del contenido de humedad como muestra la Figura 2.22. Sin embargo, llegado un momento se alcanza un contenido de humedad donde la densidad ya no aumenta. En este punto el agua comienza a sustituir los espacios que deberían ser ocupados por las partículas sólidas del suelo y como se sabe la densidad del agua es mucho menor que de las partículas sólidas, $\rho_w \ll \rho_s$ debido a esto es que la curva de la densidad seca comienza a descender. Este fenómeno es ilustrado en la Figura 2.22. No importa la cantidad de agua que se agregue, el suelo nunca se satura completamente por la compactación.

El gráfico de la Figura 2.22, está formado por tres diferentes alturas de peso específico, el peso específico de sólidos en la parte inferior del gráfico simboliza a los sólidos presentes en un volumen unitario de suelo al inicio del proceso de compactación, el peso específico del agua en la parte media simboliza el aumento de agua en el mismo volumen de suelo que se da a medida que se va compactando el suelo y por último el peso específico de los sólidos en la parte superior simboliza el aumento de sólidos que se produce en el mismo volumen de suelo durante el proceso de compactación.

Figura 2.22 Principios de compactación.



Fuente: Das, B. M., 1998

En la Figura 2.22, se ve que con un contenido de humedad $w = 0$, el peso específico húmedo γ , es igual al peso específico seco γ_d que es lógico ya que no hay agua en el suelo:

Ecuación 2.14 Peso específico húmedo

$$\gamma = \gamma_{d(w=0)} = \gamma_d$$

Cuando el contenido de humedad aumenta gradualmente y se utiliza el mismo esfuerzo para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en un volumen unitario aumenta gradualmente. Por ejemplo, en $w = w_1$:

$$\gamma = \gamma_2$$

El peso específico seco para un contenido de humedad, $w = w_1$, se obtiene sumando las alturas del peso específico de los sólidos mostrados en la Figura 2.22.

$$\gamma_{d(w=w_1)} = \gamma_{d(w=0)} + \Delta\gamma_d$$

Más allá de cierto contenido de humedad $w = w_2$, cualquier aumento en el contenido de humedad tiende a reducir el peso específico seco (Figura 2.22). Este fenómeno ocurre como ya se dijo debido a que el agua empieza a ocupar espacios que debían haber sido ocupados por las partículas sólidas.

Por lo tanto, mientras más compacto este el suelo habrá menos espacios vacíos ocupados por aire y entonces se tendrá un mayor peso específico del suelo que es lo que se prefiere. El contenido de humedad en el cual se alcanza el peso específico seco máximo se llama generalmente contenido de humedad óptimo. En la Figura 2.22. $w_2 = w_{\text{óptimo}}$.

Las principales ventajas que se producen con la compactación son:

- a) **Reducción o prevención de los asentamientos perjudiciales.** Si la estructura se construye en un suelo sin compactar o compactado con desigualdad, el suelo se hunde dando lugar a que la estructura se deforme (asentamientos). El hundimiento es más profundo generalmente en un lado o esquina, por lo que se producen grietas o un derrumbe total de la estructura.

- b) **Aumento de la resistencia del suelo y mejoramiento de la estabilidad del talud.**
Los vacíos producen debilidad al suelo e incapacidad para soportar cargas pesadas. Estando el suelo compactado, se reducen los vacíos y todas las partículas del suelo están más apretadas, por lo tanto, estas pueden soportar cargas mayores.
- c) **Reduce la expansión y contracción del suelo.** Si hay vacíos, el agua puede penetrar en el suelo y llenar estos vacíos. El resultado sería el esponjamiento del suelo durante la estación de lluvias y la contracción del mismo durante la estación seca.
- d) **Impide los daños de las heladas. El agua se expande y aumenta el volumen al congelarse.** Esta acción a menudo causa que el pavimento se hinche y a la vez, las paredes y losas del piso se agrieten. La compactación reduce estas cavidades de agua en el suelo.
- e) **Reduce el escurrimiento del agua.** Un suelo compactado reduce la penetración de agua.

2.7.1.1 Compactación en Laboratorio.

Los ensayos de compactación en campo son generalmente demasiado lentos y costosos como para poder repetirlos varias veces, cada vez que se desee estudiar cualquiera de sus detalles, debido a esto es que los ensayos de compactación se realizan principalmente en laboratorio.

El propósito de la compactación en laboratorio es al igual que en la compactación en campo determinar el peso específico o densidad seca máxima para un contenido de humedad óptimo, esto se realiza mediante pruebas que consisten en hallar la curva de compactación del suelo.

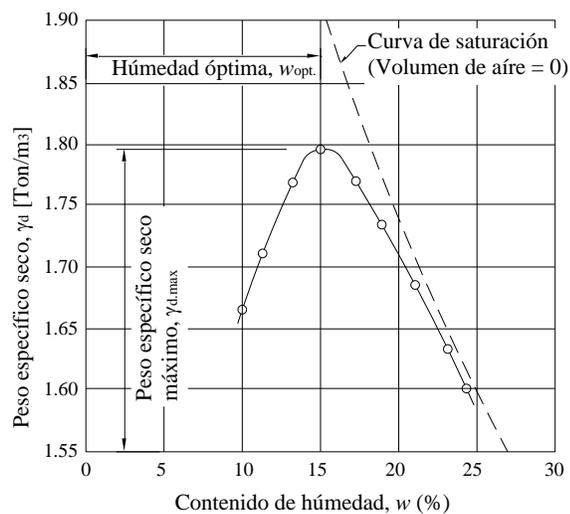
2.7.1.2 Curva de compactación.

Los procesos de compactación comenzaron a desarrollarse en campo como técnicas de construcción. Fue hasta que se trató de estudiar de un modo más riguroso los efectos de tales técnicas y de establecer procedimientos de control de calidad y verificación de resultados en campo cuando nacieron las pruebas de compactación en laboratorio, al

principio solo con base en la original desarrollada por Proctor, y después con base en toda una serie de pruebas, con variantes más o menos cercanas a la primera, que se desarrollaron con la intención de ir logrando en laboratorio mayor acercamiento a los procesos de campo, que paralelamente se ampliaron con toda una serie de equipos nuevos producidos por una tecnología cada vez más concedora y exigente.

Proctor hizo una correlación entre los resultados de un proceso de compactación y el aumento del peso específico seco del material compactado y estableció la costumbre que aun hoy se sigue, de juzgar los resultados de un proceso de compactación con base a la variación del peso específico seco que se logre, también comprendió el fundamental papel que desempeña el contenido de humedad del suelo en la compactación que de él se obtiene, con un cierto procedimiento. Juntando estos dos aspectos que considero básicos, estableció una forma de representar un proceso de compactación por medio de una gráfica en la que se haga ver el cambio del peso específico seco al compactar el suelo a distintos contenidos de agua, utilizando varias muestras de suelo, cada una de las cuales proporciona un punto de la curva. Como es lógico diferentes procesos de compactación producen al mismo suelo compactaciones distintas, por lo tanto, un mismo suelo podrá tener diversas curvas de compactación correspondientes a los diferentes modos de compactarlo que pueden usarse, sea en campo o en laboratorio.

Figura 2.23 Curva de compactación típica



Fuente: Holtz & Kovacs, 1981

Una representación de ese modo, es decir, γ_d versus w , recibe el nombre de curva de compactación. Sea cual fuere el procedimiento de compactación que se siga, la forma de la curva de compactación será parecida a la que se muestra en la Figura 2.23.

Se puede ver en la Figura 2.23, también la curva correspondiente al 100 % de saturación del suelo (cero de aire en los espacios vacíos). La condición de un suelo compactado en circunstancias normales es la de un suelo no saturado, razón por la cual la curva de compactación se desarrolla por debajo de la curva de saturación, si se comparan las dos es posible saber cuál tendría que ser el contenido de agua que saturase a una muestra que se compactara a determinado peso específico.

El procedimiento para determinar la curva de compactación en laboratorio es como sigue:

El peso específico húmedo (γ) se obtiene dividiendo el peso del material húmedo por el volumen interior del molde:

Ecuación 2.15 peso específico húmedo

$$\gamma = \frac{W}{V_{(m)}}$$

Donde:

W = Peso del suelo compactado en el molde.

$V_{(m)}$ = Volumen del molde. (Varía según el ensayo)

A partir de los datos del contenido de humedad calculados, de cada muestra compactada se determina el peso específico seco γ_d de la siguiente manera:

Ecuación 2.16 peso específico seco

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s \cdot \left(1 + \frac{W_w}{W_s}\right)}{V} = \frac{W_s \cdot (1 + w)}{V} = \gamma_d \cdot (1 + w)$$

Donde:

w = Porcentaje de contenido de humedad.

Con los valores de γ_d determinados de la ecuación 2.16. se puede construir en función de los contenidos de agua correspondientes la curva de compactación y así obtener el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptimo para el suelo. Para esto es necesario asumir algunos valores de w , como 5%, 10%, 15% y así sucesivamente.

2.7.1.3 Factores que afectan la compactación.

Anteriormente se vio la influencia que el contenido de agua tiene en el grado de compactación alcanzado por un suelo. Además de este, existen otros factores importantes que afectan en la eficacia de la compactación que se puede lograr en obra, como los siguientes:

- Naturaleza del suelo a compactar.
- Elección adecuada del equipo: tipo, peso, presión de inflado de neumáticos, área de contacto, frecuencia de vibración, etc.
- La energía específica de compactación (energía que se le entrega al suelo por unidad de volumen durante el proceso mecánico de que se trate).
- Contenido de humedad del suelo.
- Cantidad y espesor de las capas del terraplén.
- Número de pasadas del equipo de compactación.

Estos factores suelen denominarse las “variables” que rigen el proceso de compactación. De todos estos los más importantes son el tipo de suelo y la energía de compactación. La importancia de estos dos factores se describe más detalladamente a continuación.

2.7.1.4 Efecto del tipo o naturaleza del suelo.

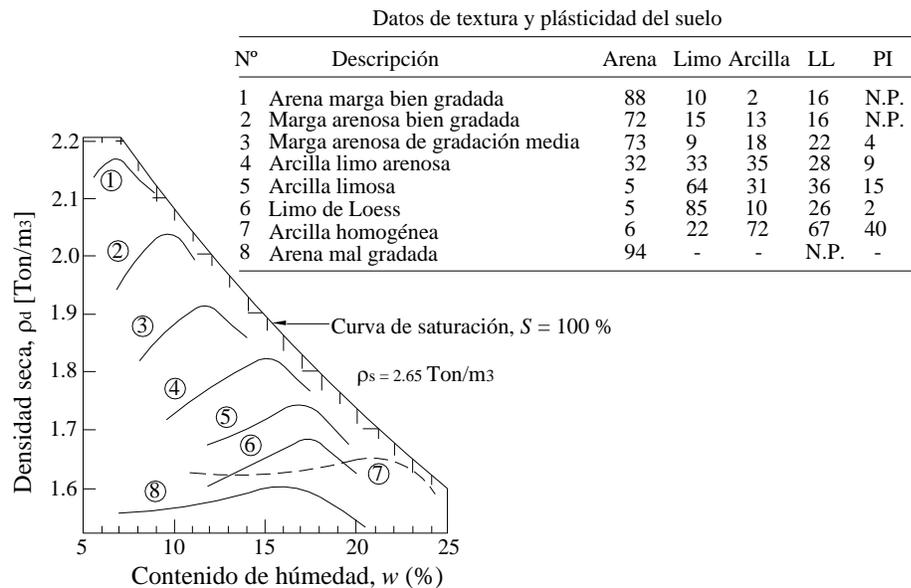
El tipo de suelo con que se trabaja influye de manera decisiva en el proceso de compactación. Se tiene que diferenciar entre los suelos finos y gruesos o entre los suelos cohesivos y friccionales, para esto es necesario analizar una serie de factores como el tipo de distribución de tamaño de partículas, forma de los granos del suelo, gravedad específica de los sólidos del suelo, cantidad y tipo de minerales de arcilla presentes en el suelo.

Los métodos usados para la compactación dependen del tipo de suelo. Los friccionales, como las arenas, se compactan eficientemente por métodos vibratorios (placas vibratorias), mientras que los suelos cohesivos como las arcillas se compactan mejor por métodos estáticos (rodillos pata de cabra, rodillos neumáticos, rodillos lisos).

El tipo de suelo tiene una gran influencia en el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptimo. En la Figura 2.24, se puede ver que en las arenas bien gradadas (Suelos SW, curva de compactación superior), tienen una densidad seca mucho más alto que el de las arenas uniformes o pobremente gradadas (Suelos SP, curva de compactación inferior).

Para los suelos arcillosos el máximo peso específico tiende a disminuir cuando aumenta la plasticidad.

Figura 2.24 Curvas de compactación para ocho suelos utilizando la prueba Proctor estándar,



Fuente: Jonson y Sallberg, 1960

2.7.1.5 Efecto de la energía de compactación.

Se entiende por energía de compactación, como la energía que se entrega al suelo por unidad de volumen, durante el proceso mecánico que se realice.

Es muy fácil evaluar la energía de compactación en una prueba de laboratorio en que se compacte al suelo por impactos dados por un pisón. La expresión para calcular esta energía de compactación está dada por:

Ecuación 2.17 Energía de compactación.

$$E = \frac{N \cdot n \cdot W \cdot h}{V}$$

Donde:

E = Energía de compactación.

N = Número de golpes del pisón compactador por cada una de las capas en que se acomoda el suelo en el molde de compactación.

n = Número de capas que se disponen hasta llenar el molde.

W = Peso del pisón compactador.

h = Altura de caída del pisón al aplicar los impactos al suelo.

V = Volumen total del molde de compactación, igual al volumen total del suelo compactado.

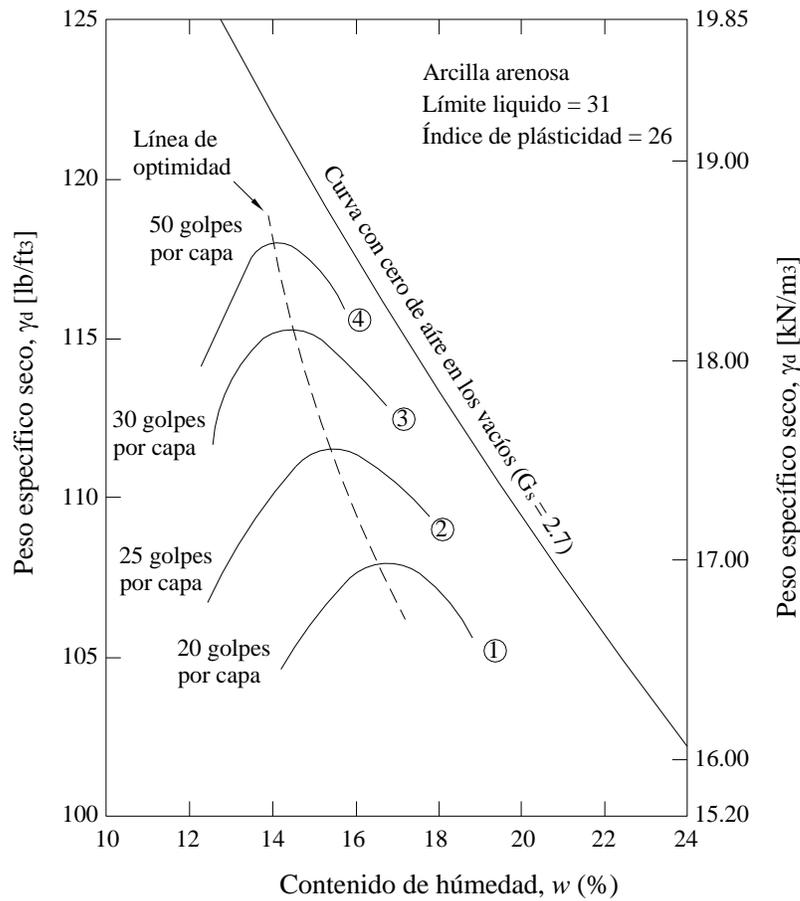
Si la energía de compactación del suelo es cambiada, la curva peso específico seco versus contenido de humedad también cambia. Este hecho se puede demostrar con ayuda de la Figura 2.25, en la que cual se muestra cuatro curvas de compactación para una arcilla arenosa. El molde y el pisón de la prueba Proctor estándar fueron utilizados para obtener estas curvas de compactación. El número de capas del suelo usadas para la compactación fue de tres para todos los casos. Sin embargo, el número de caídas del pisón por cada capa varió de 20 a 50. La energía de compactación usada por unidad de volumen de suelo para cada curva puede fácilmente ser calculada usando la ecuación 2.17. Estos valores se tabulan en la Tabla 2.20.

Tabla 2.20 Efecto de la energía de compactación con el número de caídas por capa

| Número de curva en la Figura 2.25. | Número de caídas por capa | Energía de compactación (ft-lb/ft ³) |
|------------------------------------|---------------------------|--|
| 1 | 20 | 9,900 |
| 2 | 25 | 12,375 |
| 3 | 30 | 14,850 |
| 4 | 50 | 24,750 |

Fuente: Das B. M., 1998

Figura 2.25 Efecto de la energía de compactación en la compactación de una arcilla arenosa



Fuente: Das, B. M., 1998

De la Tabla 2.20 y de la Figura 2.25, se puede ver que:

1. Mientras que se aumenta la energía de compactación, el peso específico seco máximo de la compactación también aumenta.
2. Mientras que se aumenta la energía de compactación, el contenido de humedad óptimo disminuye un poco.

Las discusiones anteriores son válidas para todos los suelos. Sin embargo, se debe tomar en cuenta, que el grado de compactación no es directamente proporcional a la energía de compactación.

Un hecho que rige de manera fundamental en las pruebas dinámicas o por impacto es que, a energía creciente, se obtiene mayor peso específico seco máximo y un contenido de humedad óptimo decreciente (puntos 1 y 2). En las pruebas de laboratorio en que se compacta el suelo con la aplicación de presión estática, en principio la energía específica se puede evaluar de manera análoga en términos del tamaño del molde, el número de capas en que se dispone el suelo, la presión que se aplique a cada capa y el tiempo de aplicación. Sin embargo, en este caso la evaluación ya no resulta tan sencilla y la energía de compactación se ve afectada por la deformabilidad del suelo y por el tiempo de aplicación de la presión.

En el caso de las pruebas en que se realiza la compactación por manipulación, es aún más compleja la evaluación de la energía de compactación, pues cada capa de suelo dentro el molde se compacta mediante un cierto número de aplicaciones de carga con pisón que produce presiones que varían gradualmente desde cero hasta un valor máximo, y luego se invierte el proceso en la descarga. La energía de compactación no se puede cuantificar de un modo sencillo, pero puede hacerse variar a voluntad si se introduce cambios en la presión de apisonado, en el número de capas, en el número de aplicaciones del pisón por capa, en el área del pisón o en el tamaño del molde.

Una vez que y se definió claramente como se determina la curva de compactación se explicara el proceso de la obtención de estas curvas por pruebas de compactación en laboratorio.

Actualmente existen muchos métodos para reproducir al menos teóricamente, en laboratorio las condiciones dadas de compactación en campo. Históricamente, la primera prueba de compactación es la realizada por R.R. Proctor y que es conocido como Prueba Proctor estándar. Hoy en día la más empleada es la prueba de compactación Proctor modificado, en la que se aplica mayor energía de compactación que la estándar.

El propósito de un ensayo de compactación en laboratorio, es determinar la correcta cantidad de agua de amasado a usar cuando se compacte el suelo en campo y el grado de compacidad que puede esperarse al compactarse el suelo en este grado de humedad óptimo. Para cumplir este propósito, un ensayo de laboratorio debe considerar una compactación comparable a la obtenida por el método que se utilizará en campo.

2.7.1.6 Prueba o ensayo Proctor modificado

Debido al rápido desarrollo en los equipos de compactación de campo, la energía 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 en la prueba, aumentando la energía de compactación, de modo que conservando el número de golpes por capa se elevó el número de capas de 3 a 5, aumentando al mismo tiempo el peso del pisón y la altura de caída del mismo, siendo el molde es el mismo que el de la prueba estándar. Esta nueva versión revisada se la llama normalmente como la prueba Proctor modificado (ASTM D-1557 y AASHTO T-180). A continuación, se describirán todas sus especificaciones y procedimiento de compactación.

La prueba Proctor modificado es la más utilizada para la compactación en laboratorio, teniendo tres variantes en el método, que varían en función del porcentaje de tamaño de partículas presentes en la muestra de suelo. Debido a esto es que se explicara en forma más detallada el procedimiento de compactación, además de todas sus especificaciones basándose en la ASTM D1557-00.

La prueba Proctor modificado al igual que la Proctor estándar se utiliza para determinar el peso específico seco máximo y el contenido de humedad óptimo. Este ensayo se aplica solamente a suelos con menos del 30 % en peso de partículas retenidas en el tamiz de 19 mm.

Para conducir la prueba Proctor modificado, se utiliza el mismo molde con un volumen de 943.3 cm³ (1/30 pie³) como en el caso de la prueba Proctor estándar. Sin embargo, el suelo es compactado en cinco capas por un pisón que pesa 4.54 ± 0.01 kg, la caída del pisón es 457.2 ± 1.6 mm, la cara de golpe del pisón tiene un diámetro de 50.8 ± 0.25 mm.

El pisón debe ser reemplazado cuando el diámetro de la cara de golpe es desgastado o expandido en 12 mm. El número de golpes del pisón para cada capa se conserva en 25 como en el caso de la prueba Proctor estándar. El pisón debe estar equipado con un tubo que le permita desplazarse en la caída con facilidad, el tubo debe tener al menos cuatro agujeros en cada extremo espaciados 90° entre sí, el diámetro mínimo de estos agujeros son de 9.5 mm Figura 2.26.

Figura 2.26 Equipo de compactación en laboratorio.



Fuente: Das, B. M., 1998

Debido a que aumenta la energía de compactación, los resultados de la prueba Proctor modificado aumentan en el peso específico seco máximo del suelo. El aumento en el peso específico seco máximo es acompañado por una disminución del contenido de humedad óptimo.

Las tres variantes en el método de compactación Proctor modificado, varían en algunas especificaciones que se resumen en la Tabla 2.20. El método de compactación se elige en función del porcentaje de tamaño de partículas presentes en la muestra de suelo. Para la selección del método de compactación el suelo debe ser tamizado a través de los tamices $\frac{3}{4}$ plg, $\frac{3}{8}$ plg y N°4.

Tabla 2.21 Especificaciones técnicas para la prueba de compactación Proctor según las especificaciones ASTM.

| Características | | Método | | |
|--|--|--------|---------|--------|
| | | A | B | C |
| Molde: | - Volumen [cm ³] | 944 | 944 | 2124 |
| | - Diámetro [mm] | 101.6 | 101.6 | 152.4 |
| Pisón | - Masa [kg] | 4.54 | 4.54 | 4.54 |
| | - Altura de caída [mm] | 457 | 457 | 457 |
| Número de capas de compactación | | 5 | 5 | 5 |
| Número de golpes por capa | | 25 | 25 | 56 |
| Energía de compactación [kN×m/m ³] | | 2700 | 2700 | 2700 |
| Suelo a usarse Criterio de selección: | - Pasa el tamiz | | | ¾ plg |
| | - Porcentaje retenido en el tamiz N° 4 | N° 4 | 3/8 plg | |
| | - Porcentaje retenido en el tamiz 3/8 plg. | < 20 % | > 20 % | > 20 % |
| | - Porcentaje retenido en el tamiz 3/4 plg. | | < 20 % | < 30 % |

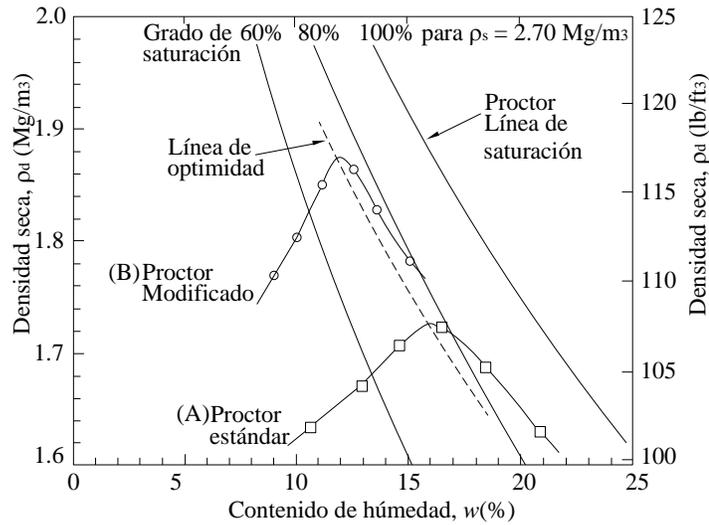
Fuente: ASTM, 2003

Método A utiliza como material de compactación el suelo que pasa por el tamiz N°4. Es aplicado a suelos con un porcentaje menor al 20 % de material retenido en el tamiz N°4.

Método B utiliza como material de compactación el suelo que pasa por el tamiz 3/8 plg. Es aplicado a muestras de suelo con un valor mayor al 20 % de material retenido en el tamiz N°4 y con un valor menor al 20 % de material retenido en el tamiz 3/8 plg.

Método C utiliza como material de compactación el suelo que pasa por el tamiz 3/4 plg. Es aplicado a muestras de suelo con un valor mayor al 20 % de material retenido en el tamiz 3/8 plg y con un valor menor al 30 % del material retenido en el tamiz 3/4 plg.

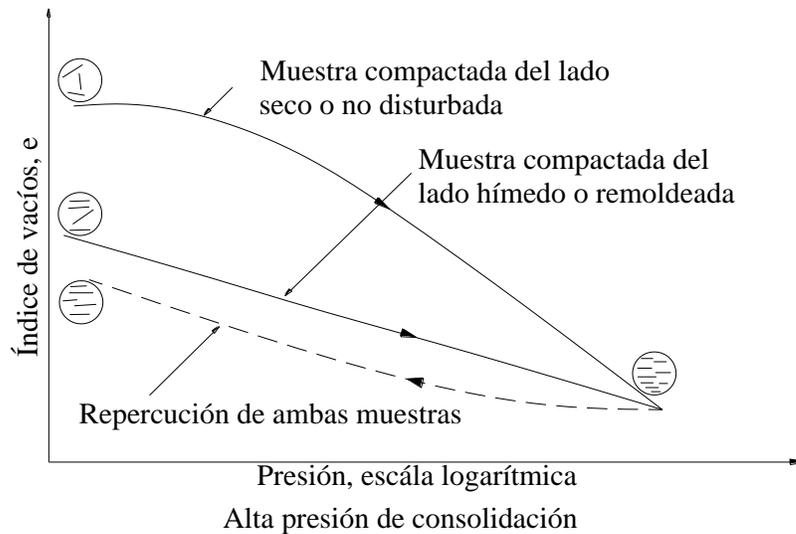
Figura 2.27 Curvas de compactación para los ensayos Proctor estándar y modificado.



Fuente: Holtz & Kovacs, 1981

2.7.1.7 Efecto de la expansión en la compactación.

Figura 2.28. Cambio en la compresibilidad con el contenido de agua del moldeado.



Fuente: Lambe & Whitman, 1976

En la muestra compactada la expansión de las arcillas es mayor para compactaciones del lado seco del óptimo que para las del lado húmedo del óptimo. Esto se debe a que las del lado seco tienen una gran deficiencia de agua y por lo tanto tienen una mayor tendencia a

adsorber agua y de este modo a hincharse más (expandirse), este fenómeno también se debe a que la distancia entre partículas del lado seco es mucho menor que las del lado húmedo, por lo tanto, las repulsiones netas resultantes son también mucho mayores. Los suelos del lado seco del óptimo son en general más sensibles al cambio ambiental tal como el cambio en el contenido de humedad. La expansibilidad también crece con la energía de compactación.

Resulta difícil decir si un suelo que se compacte de un lado del óptimo tendrá mejor o peor comportamiento, en lo que se refiere a compresibilidad, que otro que se compacte del lado opuesto.

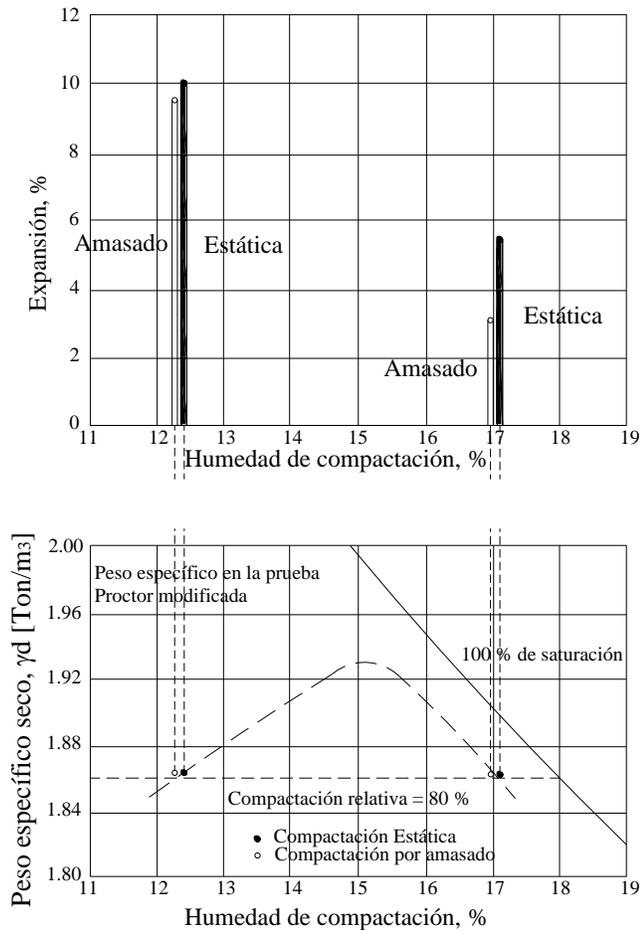
En cada caso la decisión al respecto debe basarse en las características del terraplén en que se usara el suelo. Se puede ver en la Figura 2.28, que la compresibilidad del lado seco es menor, pero la compactación del lado húmedo producirá un material más flexible, capaz de adaptarse mejor a asentamientos diferenciales, desde el punto de vista del agrietamiento son más peligrosos los suelos compactados del lado seco.

La expansión está relacionada con el grado de orientación de la estructura. El máximo peso específico seco que el suelo conserva en cualquier circunstancia se obtiene cuando se compacta cerca del contenido de humedad óptimo correspondiente al método y energía de compactación que se usen.

El potencial de expansión también varía según el método de compactación que se emplee. En la Figura 2.29, se muestra la expansión de una arcilla arenosa que se compacto por manipulación y con compactación estática, las mediciones se hicieron en una muestra con el mismo peso específico seco, del lado seco y húmedo correspondiente al contenido de humedad óptimo de compactación.

En esta figura se puede ver que con el método estático se produce una expansión mayor tanto en contenidos de humedad bajos como altos.

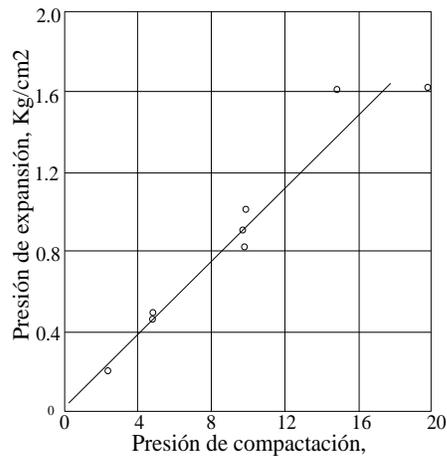
Figura 2.29 Expansión de una muestra de arcilla arenosa compactada estáticamente y por manipulación.



Fuente: Juárez & Badillo, 1973

Otro factor que también influye en la expansión es la energía de compactación, y de muchos estudios se sabe que la expansión crece con incremento de energía de compactación. En la Figura 2.30, se presenta una muestra de arcilla sometida a compactación estática bajo diferentes presiones, en ella se puede ver como la presión de expansión va aumentando linealmente a medida que se va incrementando la energía de compactación.

Figura 2.30 Relación entre la presión estática de compactación (energía de compactación) y la presión de expansión en una arcilla.



Fuente: Juárez & Badillo, 1973

2.7.1.8 Control de compactación.

Después de realizar la compactación en campo siempre es necesario verificar si con él se lograron los fines propuestos. Hoy en día existen muchos métodos para poder controlar que la compactación en campo cumpla con las especificaciones de diseño del proyecto. En la mayoría de los casos la compactación se hace a contrato por empresas especializadas, por lo tanto, la verificación mencionada, resulta ligada a problemas de pago, legales, etc. Debido a esto es que se tienen que seguir algunos pasos durante la compactación en campo.

Puesto que el objetivo de la compactación es estabilizar los suelos y mejorar su comportamiento ingenieril, es importante tener presente las propiedades ingenieriles deseadas del terraplén, no solo su densidad seca y contenido de humedad. Este punto a menudo no se lo toma en cuenta en el control de la construcción de obras de tierra. Normalmente se pone mayor énfasis en lograr el peso unitario seco especificado y se da poca consideración a las propiedades ingenieriles deseadas del terraplén compactado. El usual procedimiento de diseño y construcción es como sigue.

Primeramente, se dirigen pruebas de compactación en laboratorio en las muestras de los materiales de préstamo propuestos para alcanzar las propiedades requeridas para el diseño.

Después de que la estructura de tierra es diseñada, se escriben las especificaciones de compactación. Se especifican las pruebas de control de compactación en campo y los resultados de éstas se convierten en los valores estándar para controlar el proyecto. Los inspectores del control de la construcción entonces realizan estas pruebas para ver que las especificaciones sean alcanzadas por el contratista.

Hay básicamente dos categorías de las especificaciones de las obras de tierra:

- Especificaciones de resultado final.
- Especificaciones del método.

2.7.1.9 Especificaciones del resultado final.

En estas se especifica un grado de compactación mínimo, o un porcentaje de compactación. El grado de compactación también es conocido con el nombre de compactación relativa, y se define como el cociente de la densidad seca en campo $\rho_{d,\text{campo}}$ con la máxima densidad seca en laboratorio $\rho_{d,\text{max}}$, según una cierta prueba estándar especificada, por ejemplo, la prueba Proctor estándar o la prueba Proctor modificada, entonces según esto se tiene:

Ecuación 2.18 Grado de compactación

$$\text{Grado de compactación (R)} = \frac{\rho_{d,\text{en campo}}}{\rho_{d,\text{max en laboratorio}}} \times 100 (\%)$$

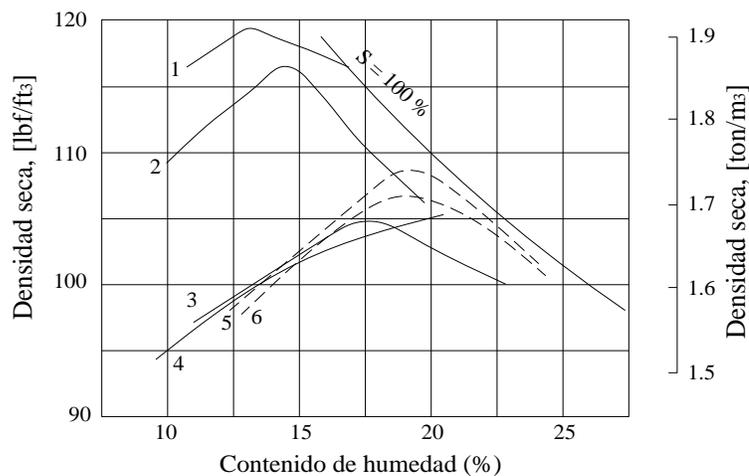
2.7.1.10 Compactación de campo

La compactación en campo se la realiza con diferentes tipos de compactadoras. Estas compactadoras tienen que realizar una compactación del terreno de tal manera que reproduzcan los valores de la compactación realizada en laboratorio. Para poder lograr esto es necesario tratar de reproducir todas las condiciones que se tendrán en campo al realizar una prueba de laboratorio. El tipo de compactadora que se utilizara juega un papel importante en esto pues cada tipo de compactadora tiene un proceso distinto de compactar el terreno, pueden ser por procesos vibratorios, manipuleo, presión estática o presión dinámica.

La Figura 2.31. compara la compactación en campo y la compactación en laboratorio para un mismo suelo. Además, muestra la dificultad de elegir una prueba de laboratorio que reproduzca un determinado método de compactación en campo. Las pruebas de laboratorio indican generalmente una humedad óptima algo inferior a la óptima en una obra real.

Variando el método de laboratorio, puede desplazarse la relación humedad-peso específico seco para conseguir una mejor correlación con un determinado método de compactación en campo. Como ya se mencionó anteriormente hay cierta evidencia de que algunos métodos de compactación en laboratorio concuerdan mejor o son de mayor representatividad con ciertos tipos de compactación en campo. Como por ejemplo la compactación por manipulación en laboratorio da muy buenos resultados con la compactación por una pata de cabra, la compactación por impactos (dinámica) en laboratorio da muy buenos resultados con los rodillos neumáticos, la compactación por métodos vibratorios en laboratorio da mejores resultados con suelos sin cohesión, y así sucesivamente cada método de compactación en laboratorio tiene una mayor representatividad con un determinado equipo de compactación de campo.

Figura 2.31 Comparación entre las compactaciones en laboratorio y en campo.



Fuente: Turnbull, 1950

(1) Compactación estática en laboratorio, 140 kg/cm², (2) Proctor modificado, (3) Proctor estándar, (4) Compactación estática en laboratorio a 14 kg/cm², (5) Compactación en campo con seis pasadas de un rodillo neumático, (6) Compactación en campo con seis pasadas de un rodillo pata de cabra.

2.7.2 Relación de soporte californiana – C.B.R.

2.7.2.1 Generalidades

El ensayo C.B.R. (California Bear Ratio) es una prueba que se originó en el Departamento de Carreteras de California en los Estados Unidos de América en el año 1929, con el objetivo de conocer los suelos donde diseñará adecuadamente los pavimentos, la ASTM denomina el ensayo simplemente un ensayo de relación de soporte.

Este ensayo mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de densidad y humedad controladas; pero también puede operarse en forma análoga sobre muestras inalteradas tomadas del terreno.

Además, el ensayo permite evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, sub-base y base. Dado que el comportamiento de los suelos varía de acuerdo a su grado de alteración, con su granulometría y sus características físicas, el método a seguir para determinar el C.B.R., es diferente en cada caso. Así tenemos:

- C.B.R.: Suelos perturbados y remoldeados
- Suelos gravosos y arenosos.
- Suelos cohesivos, poco plásticos y nada plásticos
- Suelos cohesivos y expansivos
- C.B.R. suelos inalterados.
- C.B.R. in situ.

El número C.B.R. establece una relación entre la resistencia a la penetración de un suelo y la resistencia a la misma que presenta el tipo común de piedra triturada. Estas resistencias y penetraciones estándar se muestran en la Tabla 2.22.

Tabla 2.22 Valores de Carga Unitaria Patrón

| Penetración | | Tiempo | Carga Unitaria Patrón | |
|-------------|-------|---------|----------------------------|-----------------------|
| (plg) | (mm) | | (lbs./pulg. ²) | (Kg/cm ²) |
| 0.025 | 0.63 | 0'30'' | | |
| 0.050 | 1.27 | 1'00'' | | |
| 0.075 | 1.90 | 1'30'' | | |
| 0.1 | 2.54 | 2'00'' | 1000 | 70 |
| 0.15 | 3.81 | 3'00'' | | |
| 0.2 | 5.08 | 4'00'' | 1500 | 105 |
| 0.25 | 6.35 | 5'00'' | | |
| 0.3 | 7.62 | 6'00'' | 1900 | 133 |
| 0.4* | 10.16 | 8'00'' | 2300 | 161 |
| 0.5* | 12.7 | 10'00'' | 2600 | 182 |

Fuente: Elaboración propia

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

Este procedimiento mide la carga necesaria para penetrar un pistón de dimensiones determinadas a una velocidad previamente fijada en una muestra compactada de suelo después de haberla sumergido en agua durante cuatro días a la saturación más desfavorable y luego de haber medido su hinchamiento.

La muestra se sumerge para prever la hipotética situación de acumulación de humedad en el suelo después de la construcción.

Tabla 2.23 Valores referenciales de C.B.R., usos y suelos.

| C.B.R. | Clasificación general | Usos | Sistema de Clasificación | |
|--------|-----------------------|----------------|--------------------------|-----------------------|
| | | | UNIFICADO | AASHTO |
| 0-3 | Muy pobre | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A5, A6, A7 |
| 3-7 | Muy pobre a regular | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A4, A5, A6, A7 |
| 7-20 | Regular | Subbase | OL, CL, ML, SC, SM, SP | A2, A4, A6, A7 |
| 20-50 | Bueno | Subbase y base | GM, GC, SW, SM, SP, GP | A-1b, A2-5, A-3, A2-6 |
| >50 | Excelente | Base | GW, GM | A-1a, A2-4, A-3 |

Fuente: Joseph E. Bowles, 1981

2.7.2.2 Ensayo C.B.R. en laboratorio

La relación C.B.R. generalmente se determina para 0.1” y 0.2” de penetración o sea para un esfuerzo de 1000 y 1500 libras por pulgada cuadradas en el patrón, respectivamente. De estos dos valores se usa el que sea mayor.

Con el fin de duplicar en el laboratorio la condición más crítica que se presenta en el terreno, las muestras para el ensayo del C.B.R. se sumerge en agua hasta obtener su saturación.

Los ensayos de C.B.R. se pueden efectuar sobre muestras compactadas en el laboratorio, sobre muestras inalterables obtenidas en el terreno y sobre suelo en sitio.

El valor de C.B.R. usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.5mm. Sin embargo, si el valor de C.B.R. a una penetración de 5.0 mm es mayor, el ensayo debería repetirse (ordinariamente). Si un segundo ensayo produce nuevamente un valor de C.B.R. mayor de 5.0mm de penetración, dicho valor debe aceptarse como valor final del ensayo.

Los ensayos del C.B.R. se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para el suelo específico, determinado utilizando el ensayo de compactación estándar (o modificación). Continuación utilizando los métodos 2 o 4 de las normas ASTM D698-70 o D1557-70 (para el molde de 15.2 cm de diámetro) se debe compactar las muestras utilizando las siguientes energías de compactación:

A menudo se compactan dos moldes de suelo, después dejarlo saturar por un periodo de 96 horas, con una sobre carga aproximadamente igual al peso del pavimento que se utilizará en el campo, pero en ningún caso el peso de la sobre carga será menor de 4.5 kg. Es necesario durante este periodo tomar registros de expansión para instantes escogidos arbitrariamente y al final del periodo de saturación se hace la penetración para obtener el valor de C.B.R. para el suelo en condiciones de saturación completa.

Para determinar los valores de C.B.R. se coloca una sobre carga sobre la muestra de la misma magnitud del que se utilizó durante el ensayo de expansión. El ensayo sobre la muestra saturada cumple dos propósitos.

- Dar importación sobre la expansión esperada en el suelo bajo la estructura de pavimentos cuando el suelo se satura.
- Dar indicaciones de pérdida de resistencia debido a la saturación en el campo.

2.7.2.3 Preparación de muestras

Las muestras se tomaron en una cantidad de 6000 a 7000 gramos, para su preparación se siguieron los siguientes pasos:

- Compensación del material si es necesario: Se realizó una compensación en forma similar a la que se realizó en el ensayo de compactación. Hacer pasar el material por el tamiz $\frac{3}{4}$ " y N°4, se descarta lo retenido en $\frac{3}{4}$ ", y se compensa por peso con el material intermedio de $\frac{3}{4}$ " y N°4.
- Humedad del suelo: Una vez compensado el material, se debe calcular el contenido de humedad actual del suelo. A esto se agregar agua al material hasta que este obtenga el valor de la humedad óptima, caso contrario hacer secar el material. Se supone que al tener el suelo su humedad óptima, este compactado obtendrá su densidad máxima.
- Homogenización: Una vez realizado los anteriores pasos, mezclar el material para su respectiva homogenización.

2.7.2.4 Procedimiento general

2.7.2.4.1 Compactación

- a) Se ensambla el molde a la base perforada, para luego introducir el disco espaciador y ajustar el collarín al equipo.
- b) Se coloca sobre el collarín un papel filtro, para que no se pegue el material al disco y no existan pérdidas de material fino.

- c) Introducir el material en cinco capas, en cada capa se aplicó una carga dinámica de 56 golpes, utilizando para tal operación el martillo de 10 libras y 18" de caída.
- d) Luego se quitó el collarín para el respectivo enrasado, de tal manera que quedó nivelada la cara del molde.
- e) Se afloja el molde metálico de sus soportes, se separó la base para quitar el disco espaciador, para luego voltear el mismo y volver a ajustar a su base con la cara enrasada hacia abajo, antes de esto se puso el disco en la base perforada.
- f) Se pesó el molde con la muestra más la base, para así determinar su densidad y humedad ensayadas.

2.7.2.4.2 Expansión del material

- a) Una vez pesado el material se colocó sobre este otro papel filtro, para colocar sobre este el plato perforado y vástago regulable.
- b) Sobre el plato se puso pesas igual a 10 libras.
- c) Antes de someter el molde a la saturación, se debe haber medido la altura real del espécimen.
- d) Se introdujo todo el molde dentro de un tanque o depósito con agua cuyo nivel se encuentre 1 cm por debajo del nivel superior del molde.
- e) Se montó el trípode con un extensómetro, cuyo vértice inferior se conectó con la cabeza del vástago, en ese punto se tomó la lectura inicial.
- f) Cada 24 horas por un periodo de 96 horas (4 días), se tomaron y registraron las lecturas del extensómetro.
- g) La diferencia entre la lectura final y la inicial en valor absoluto en centímetros multiplicada por 100, nos proporcionaron el valor de la expansión que sufrió el material.

2.7.2.4.3 Resistencia a la penetración

- a) Luego de 4 días de saturación, se drenó de manera inclinada durante 15 minutos aproximadamente, para instalar el molde en la prensa y asentar el pistón de penetración sobre el espécimen.

- b) Se hince el pistón manteniendo una velocidad de 0,05 pulgadas por minuto y se leen las cargas totales necesarias en 0,025", 0,05", 0,075", 0,1", 0,2", 0,3", 0,4" y 0,5".
- c) Una vez que se hincó el 0,5" del pistón, se suelta la carga, se retira el molde de la prensa y se quitan las pesas, para pesar el mismo y registrar el dato.
- d) Seguidamente se extraen tres muestras para determinar el contenido de humedad, la muestra del fondo, de la superficie y a 2" de profundidad de la superficie.

2.7.2.4.4 Equipo

El equipo necesario para la realización de la Práctica de C.B.R. en laboratorio es el siguiente:

Equipo de compactación

- Molde cilíndrico diámetro interior 6", y altura 7" a 8".
- Collarín de 2" de altura.
- Base perforada.
- Disco espaciador de acero de 2,5" de altura.
- Pisón o martillo de 10 lb y una altura de caída de 18".

Equipo para el hinchamiento

- Plato y vástago con altura regulable.
- Trípode y extensómetro.
- Pesas anulares o en forma de herradura de 5 libras.

Prueba de penetración

- Pistón cilíndrico de 3" cuadradas de sección.
- Aparato para aplicar la carga.
- Anillo dinamométrico con extensómetro calibrado.
- Equipo misceláneo; balanzas, hornos, tamices, papel filtro, etc.

2.7.2.4.5 Cálculos

El peso unitario de la muestra húmeda es:

$$\gamma_{uh} = \frac{P_{mh}}{\text{Vol. molde}} \Rightarrow \begin{cases} \gamma_{uh} = \text{Peso unitario de la muestra húmeda} \\ P_{mh} = \text{Peso muestra húmeda} \end{cases}$$

El peso unitario de la muestra seca es:

$$\gamma_{ms} = \frac{\gamma_{uh}}{100 + w\%} * 100 \Rightarrow \begin{cases} \gamma_{ms} = \text{Peso unitario de la muestra seca} \\ w\% = \text{Porcentaje de humedad} \end{cases}$$

La expansión:

$$\%exp = \frac{|L_f - L_i|}{h} * 100 \Rightarrow \begin{cases} L_f = \text{Lectura final del extensómetro (cm)} \\ L_i = \text{Lectura inicial del extensómetro (cm)} \\ h = \text{Altura total del espécimen.} \end{cases}$$

La determinación del C.B.R., se realizará para las penetraciones de 0,1” y 0,2”, en sus correspondientes cargas calculadas:

Para 0,1”, tenemos:

$$C. B. R. = \frac{\text{Carga} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right]}{70,31 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right]}$$

Para 0,2”, tenemos:

$$C. B. R. = \frac{\text{Carga} \left[\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right]}{105,4 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right]}$$

Es necesario considerar lo siguiente:

“Si los C.B.R. para 0,1” y 0,2” tienen la similitud, se recomienda usar el valor del 0,2”.

“Si el C.B.R. de 0,2” es muy superior al 0,1”, deberá repetirse el ensayo.”

2.7.2.4.6 Curvas requeridas

Curva: Carga – Penetración

- a) Se realizará una escala correspondiente considerando los valores máximos y mínimos de la carga por centímetro cuadrado.
- b) Se pintarán los puntos, haciendo que las abscisas sean los valores de penetración y las ordenadas las cargas aplicadas. Luego estos puntos se deben unir con líneas respetando su nacimiento (no siempre del origen).
- c) Si es que la curva nace desde el eje de penetraciones, se medirá la distancia hacia el origen, luego esta distancia se mide desde los valores de 0,1” y 0,2”, hacia la derecha, levantando perpendiculares de las abscisas hasta la curva, entonces nos dará un nuevo valor de la carga aplicada y por lo tanto un C.B.R., corregido.
- d) Si es que una curva presenta concavidad hacia arriba, entonces se debe trazar una tangente por el punto de inflexión de esta y cortar a las abscisas, entonces este punto será el nuevo origen de la curva procediendo a los pasos del inciso c).

Curva: C.B.R. – Peso unitario

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

2.7.3 Densidad in situ (método del cono de arena)

Es un ensayo que permite calcular in situ el valor de la densidad natural de los suelos, especialmente en suelos sin cohesión, arenas y gravas, los cuales representan un reto al usar otros métodos, ya que por lo general no se logran obtener muestras inalteradas en suelos con estas características, Geotechnical (2020).

Este ensayo de densidad in situ funciona para distintos suelos con diferentes tamaños de partículas dependiendo del tipo de cono a utilizar y los ensayos complementarios a disposición.

Es el método más utilizado y representa una forma directa de obtener el volumen del agujero excavado, utilizando para ello, una arena estandarizada compuesta por partículas cuarzosas, sanas no cementadas, de granulometría redondeada y comprendida entre los tamices N°10 (2 mm) y N°35 (0.5 mm).

El equipo necesario para esta prueba es el siguiente:

- Aparato cono de arena compuesto por una válvula cilíndrica de 12.5 mm de abertura, con un extremo terminado en embudo y el otro ajustado a la boca de un recipiente de aproximadamente 4 lt de capacidad. El aparato deberá llevar una placa base, con un orificio central de igual diámetro al del embudo. (Figura 2.32.)
- Arena estandarizada, la cual deberá ser lavada y secada en horno hasta masa constante. Generalmente se utiliza arena de Ottawa, que corresponde a un material que pasa por el tamiz N°20 (0.85 mm) y queda retenido en el tamiz N°30 (0.60 mm).
- Dos balanzas de capacidad superior a 10 kg y 1000 g, con una precisión de 1 g y 0.01 g, respectivamente.
- Equipo de secado, podría ser un hornillo o estufa de terreno.

El procedimiento de esta prueba es la siguiente:

1. Llenar el recipiente del cono con la arena de Ottawa.
2. Determinar el peso del recipiente más el cono más la arena de Ottawa dentro el recipiente. (W_1)
3. Realizar la excavación del agujero en el área del terreno donde se realizará la compactación en campo.
4. Determinar el peso del suelo excavado del agujero. (W_2)
5. Se debe conocer el contenido de humedad del suelo excavado. (w)
6. Determinar el peso seco del suelo, mediante la Ecuación 2.19.

Ecuación 2.19 peso seco del suelo

$$W_3 = \frac{W_2}{1+w}$$

7. Después de la excavación del agujero el cono lleno de arena es colocado inversamente sobre el agujero, Luego se abre la válvula del cono y la arena dentro el recipiente empezara a ingresar al agujero hasta que este se llene totalmente.
8. Determinar el peso del cono más el peso de la arena que sobro en el recipiente y el cono(W_4).
9. Determinar el peso de la arena que llena el agujero, W_5 por medio de la ecuación 2.20

Ecuación 2.20 peso de la arena que llena el agujero

$$W_5 = W_1 - W_4$$

10. Determinar el volumen del suelo excavado, mediante la Ecuación 21:

Ecuación 2.21 volumen del suelo excavado

$$V = \frac{W_5 - W_c}{\gamma_{d.Arena}}$$

Donde:

W_C = Peso de la arena que llena solamente el cono.

$\gamma_{d.Arena}$ = Peso específico de la arena de Ottawa.

Los valores de W_C y $\gamma_{d.Arena}$ son determinados de la calibración hecha en laboratorio.

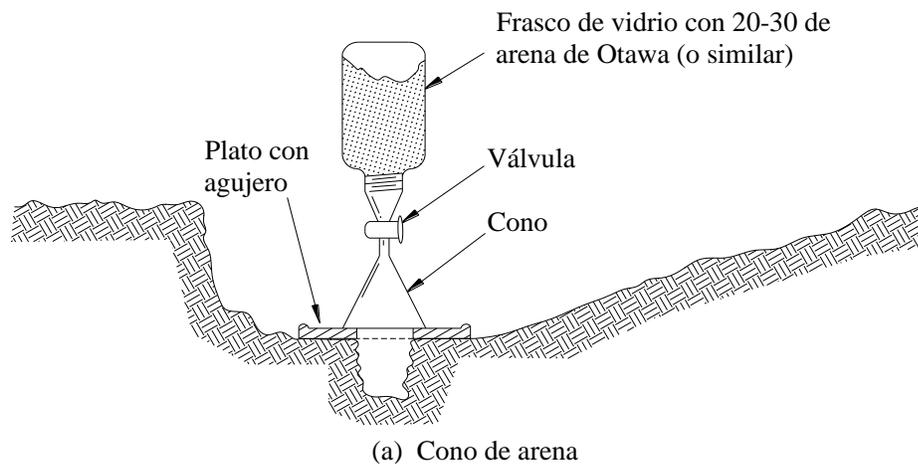
11. La densidad seca puede ser determinado de la Ecuación 2.22:

Ecuación 2.22 densidad seca

$$\gamma_d = \frac{W_3}{V} = \frac{\text{Peso del suelo seco excavado del agujero}}{\text{Volumen del agujero}}$$

Hay varios problemas asociados a la prueba destructiva común para hallar el peso específico seco en campo. Primero, la densidad máxima del laboratorio no se puede conocer exactamente. Frecuentemente, especialmente en la construcción de carreteras, para las pruebas de compactación del laboratorio se extraen muestras que no son "representativas" de los materiales de préstamo para la carretera. Entonces, cuando se conduce la prueba en el terreno, su resultado se compara con los resultados de uno o más de estos suelos "estándares" de trabajo y si los suelos en el sitio no son muy buenos, entonces es muy difícil alcanzar las especificaciones deseadas. Otra alternativa es determinar la curva de compactación completa para cada prueba en el terreno, una proposición que desperdicia tiempo y además es costosa.

Figura 2.32 Métodos de cono de arena para determinar la densidad en campo.



Fuente: Holtz & Kovacs, 1981

Otros problemas con la prueba destructiva en el terreno se asocian con la determinación del volumen del material excavado. El cono de arena, a menudo tomado como el "estándar", está sujeto a errores. Por ejemplo, la vibración del equipo de trabajo cercano aumentará la densidad de la arena en el agujero, lo cual da un volumen más grande que debe tener el agujero; esto da lugar a una densidad más baja de campo.

Todos los métodos volumétricos comunes son sujetos a error si el terraplén compactado es de grava o contiene partículas grandes de grava. Cualquier tipo de desigualdad en las paredes del agujero causa un error significativo en el método de la membrana de goma. Si

el suelo es grava o arena gruesa, ninguno de los métodos líquidos trabaja bien, a menos que el agujero sea muy grande y una hoja del polietileno se utilice para contener el agua o el aceite.

2.7.3.1.1 Procedimiento cono de arena

Se selecciona el lugar y se alisa la superficie del terreno, de ser necesario, para la posterior colocación del plato metálico con perforación central.

Luego se excava a través de esta perforación un orificio con una profundidad similar a la capa de control.

A continuación, se procede a colocar el cono, bien sea cono convencional o macrocono, de manera invertida sobre el agujero, se abre la válvula de este y se deja caer en caída libre la arena de densidad conocida (una arena estandarizada compuesta por partículas cuarzosas, sanas, no cementadas, de granulometría redondeada) hasta el agujero para determinar el volumen.

La densidad húmeda del suelo se determina dividiendo la masa húmeda del material que fue removido entre el volumen del orificio. Luego utilizando la masa húmeda del suelo, el contenido de humedad y volumen del orificio, se puede calcular el volumen del agujero excavado, la masa seca del material extraído y las densidades húmedas y secas “in situ” del suelo ensayado.

2.7.4 C.B.R. in situ

Este método fue propuesto en 1929 por los ingenieros T.E Stamtom y O.J Porter del departamento de carreteras de California. Desde esa fecha tanto en Europa como en América, el método C.B.R. se ha generalizado y es una forma de clasificación de un suelo para ser utilizado como subrasante o material de base en la construcción de carreteras.

Es un método adecuado para determinar la capacidad de soporte de un material en el lugar donde será sometido a las solicitaciones de la estructura que soportará. Debería realizarse cuando se presenten materiales dudosos y en movimientos de tierra importantes.

El C.B.R. además de ser un indicativo de la calidad del suelo, es también un parámetro que se utiliza mucho en obras viales (carreteras de pavimento flexible, y otros), el cual nos indica sobre la capacidad del suelo en cuanto a la resistencia a la penetración con respecto a una muestra estándar de material

Figura 2.33 Ensayo C.B.R. in situ.



Fuente: Andrés, 2017

2.7.4.1 Normas de referencia

ASTM D 4429-93

Este método establece el procedimiento que se debe seguir para determinar la relación de soporte (comúnmente llamada C.B.R. = California Bearing Ratio), de un suelo ensayado "in situ" mediante la comparación entre la carga de penetración del suelo y la de un material estándar de referencia.

Este método de ensayo cubre la evaluación de la calidad relativa de los suelos de la subrasante, pero también es aplicable a materiales de subbase y base.

1. Los ensayos de C.B.R. "in situ" son usados para evaluación y diseño en cualquiera de las condiciones siguientes:

- a) Cuando el grado de saturación (porcentaje de “vacíos” llenos con agua) es 80% o mayor.
- b) Cuando el material es de grano grueso y no cohesivo, así que no es afectado de manera significativa por cambios en la humedad.
- c) Cuando el suelo no ha sido modificado por actividades de construcción durante los dos últimos años anteriores al ensayo.

En el último caso, la humedad realmente no se vuelve constante, sino que generalmente fluctúa dentro de un rango más bien estrecho. Por lo tanto, los datos del ensayo de campo pueden usarse para encontrar de manera satisfactoria la capacidad promedio de soporte de carga.

2. Cualquier actividad de construcción, tal como nivelación o compactación, efectuada después del ensayo de relación de soporte, probablemente invalidará los resultados del ensayo.

Sin embargo, cualquier alteración significativa por compactación, maniobra o cambio de humedad puede afectar la resistencia del suelo y dejar sin validez los resultados del ensayo efectuando previamente, conduciendo a la necesidad de un nuevo ensayo y nuevos análisis.

2.7.4.2 Equipo

1. Gato mecánico de tornillo, operado manualmente, equipado con un dispositivo giratorio especial de manivela para aplicar la carga al pistón de penetración y diseñado con las siguientes especificaciones:
 - Capacidad máxima de 2700 kg (5950 lb).
 - Mínima altura de elevación: 50 mm (2").
 - Manubrio desmontable 150 mm (6") de radio.
 - Relación de velocidad alta, aproximadamente 2.4 revoluciones para 1 mm (0.04") de penetración.
 - Relación de velocidad media, aproximadamente 5 revoluciones para 1 mm (0.04") de penetración.

- Relación de velocidad baja, aproximadamente 14 revoluciones para 1 mm (0.04") de penetración.
 - Pueden usarse otras relaciones de velocidad, cuando esto sea más conveniente.
 - También se pueden usar otros gatos mecánicos, con la misma carga máxima y altura de elevación, siempre y cuando se obtenga con ellos una tasa uniforme de penetración-carga de 1.3 mm (0.05") por minuto.
2. Anillos de carga, dos en total, debidamente calibrados, uno de ellos con amplitud de carga de 0 a 8.8 kN (1984 lbf) y el otro de 0 a 22.6 kN (5070 lbf) aproximadamente.
 3. Pistón de penetración, de 50.8 ± 0.1 mm (2 ± 0.004 ") de diámetro ($3 \text{ pulg}^2 = 19.35 \text{ cm}^2$ de área) y aproximadamente 101 mm (4") de longitud. Debe contar, además, de un adaptador de pistón y de extensiones de tubo de rosca interna con conectores.
 4. Diales. - Deben existir dos diales: uno para medir deformaciones del anillo de carga con lecturas de 0.0025 mm (0.0001") y recorrido de aproximadamente 6.4 mm (0.25") y otro para medir penetraciones del pistón con lecturas de 0.025 mm (0.001") y recorrido de aproximadamente 25 mm (1"), equipado con un soporte o abrazadera de extensión para ajustar la posición del dial.
 5. Soporte para el dial de penetración, o puente de aluminio, hierro o madera de 76 mm (3") de altura y longitud aproximada de 1.5 m (5 pies).
 6. Platina de sobrecarga, circular, de acero, de 254 ± 0.5 mm (10 ± 0.02 ") de diámetro, con un agujero central circular de 51 ± 0.5 mm (2 ± 0.02 "). La platina debe pesar 4.54 ± 0.01 kg (10 ± 0.02 lb).
 7. Pesas de sobrecarga. - Dos pesas anulares de sobrecarga de 4.54 ± 0.01 kg (10 ± 0.02 lb), de 216 ± 1 mm (8.5 ± 0.04 ") de diámetro total, y dos pesas similares de las mismas dimensiones, pero de 9.08 ± 0.01 kg (20 ± 0.02 lb) cada una.
 8. Vehículo de carga (Reacción). - Un vehículo (o pieza de equipo pesado) de carga suficiente para proveer una reacción de aproximadamente 31 kN (6970 lb). El vehículo debe estar equipado con una viga metálica debidamente acondicionada en la parte posterior del chasis que ofrezca una reacción adecuada para forzar la penetración del pistón en el suelo. El vehículo se debe suspender suficientemente para eliminar la influencia de los resortes traseros y permitir que el ensayo de penetración se efectúe

sin movimiento ascendente del chasis del vehículo. Para efectuar el ensayo se requiere disponer de un espacio vertical libre de aproximadamente 0.6 m (2 pies).

9. Gatos. - Dos gatos tipo camión, de 14 Mg (15 toneladas) de capacidad, de doble acción combinada y descenso automático.
10. Equipo misceláneo. - Envases de muestras para determinación de humedad y peso unitario, espátula, regla de enrase, cucharones para excavar, etc.

Figura 2.34 Instalación típica del ensayo en el terreno.



Fuente: (Vargas de Castro, 2017)

Figura 2.35 Aparatos para ensayos en sitio, en la obra.



Fuente: (Vargas de Castro, 2017)

2.7.4.3 Procedimiento.

1. Se prepara la superficie que va a ser ensayada, retirando el material suelto y superficial que no sea representativo del suelo que se va a ensayar. Se debe preparar un área de ensayo tan uniforme y horizontal como sea posible. Cuando se trate de materiales de base no plásticos, se debe tener especial cuidado para no alterar la superficie de ensayo. El espaciamiento de los ensayos de penetración debe ser tal, que la operación en un punto no altere el suelo del siguiente punto que va a ser penetrado.
2. Se sitúa el vehículo en tal forma que el centro del sistema de reacción quede directamente sobre la superficie por ensayar. Se instala el gato mecánico debajo de la viga o dispositivo de reacción, con la manivela hacia afuera. se debe cerciorar que el vehículo está nivelado en la parte trasera.
3. Se ubica el gato mecánico en la posición correcta y se acopla el anillo de carga al extremo del gato. Se debe asegurar el adaptador del pistón al extremo inferior del anillo, se adiciona el número necesario de extensiones hasta alcanzar una altura menor de 125 mm (4.9") sobre la superficie de ensayo y se conecta el pistón de penetración. Se sujeta el gato en su sitio. Se debe comprobar el nivel del montaje del gato para asegurar la verticalidad del montaje y hacer los ajustes que sean necesarios.
4. Se coloca platina de sobrecarga de 4.5 kg (10 lb) debajo del pistón de penetración, de tal forma que cuando baje el pistón, éste pase a través del agujero central.
5. Se asienta el pistón bajo una carga inicial de aproximadamente 21 kPa (3 psi). Para una rápida colocación, se debe usar la relación de alta velocidad del gato. Para materiales de base con una superficie irregular, se coloca el pistón sobre una delgadísima capa de polvo de trituración de piedra caliza (tamices de 0.85mm (N°20) -0.425mm (N°40)) o de yeso.
6. Si es necesario para lograr una superficie uniforme, se levanta la platina de carga mientras todavía está actuando la carga inicial sobre el pistón y se espolvorea uniformemente arena fina, en un espesor de 3 a 6 mm (0.12 a 0.24"), sobre la superficie que va a estar cubierta por la placa. Esto sirve para distribuir uniformemente el peso de la sobrecarga.

7. Se adiciona a la platina un número de pesos de sobrecarga tal, que transmita una presión equivalente a la intensidad de carga, producida por las capas de pavimento, que se colocarán sobre la subrasante, o la base o ambos, excepto que la mínima pesa aplicada será la de 4.5 kg (10 lb) más una pesa de sobrecarga de 9 kg (20 lb).
8. Se fija el soporte del dial de penetración al pistón y se sujeta el dial a dicho soporte.
9. Se coloca en cero las lecturas de ambos diales.
10. Se aplica la carga al pistón de penetración de tal manera que la velocidad aproximada de penetración sea de 1.3 mm (0.05") por minuto. Utilizando la relación de baja velocidad del gato durante el ensayo se puede mantener una tasa uniforme de penetración por parte del operador. Se deben registrar las lecturas del anillo de carga para cada 0.64 mm (0.025") de incremento de penetración hasta una profundidad final de 12.70 mm (0.500"). En suelos homogéneos las profundidades de penetración mayores de 7.62 mm (0.300") frecuentemente se pueden omitir. Se calcula la relación de soporte en porcentaje.
11. Al finalizar el ensayo, se debe obtener una muestra en el punto de penetración para determinar la humedad. También se debe determinar el peso unitario en un sitio localizado de 100 a 150 mm (4" a 6") desde el punto de penetración. El peso unitario debe determinarse de acuerdo con los métodos de ensayo de cono de arena.

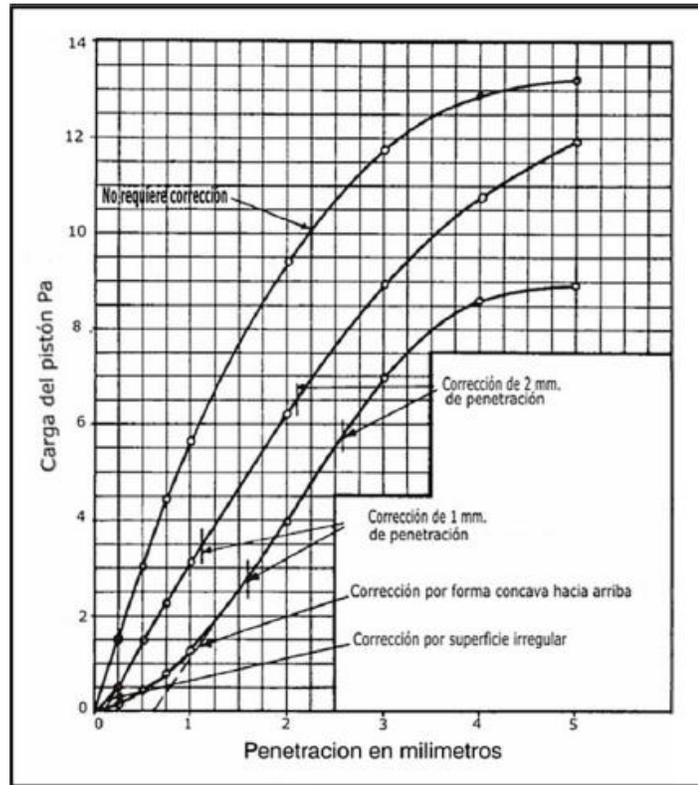
2.7.4.4 Cálculos

1. Curva Esfuerzo-Penetración

Se calcula el esfuerzo de penetración para cada incremento de penetración, dividiendo la fuerza aplicada por el área del pistón. Se dibuja la curva de Esfuerzo vs. Penetración para cada incremento de penetración, como se muestra en la Figura 2.36.

En ocasiones, la curva de Esfuerzo vs. Penetración puede en su parte inicial resultar cóncava hacia arriba, debido a irregularidades de la superficie u otras causas y, en tales casos, el punto cero se debe ajustar como se indica en la Figura 2.36.

Figura 2.36 Corrección de la curva esfuerzo vs penetración.



Fuente: Norma Chilena 1852.Of81

2. Relación de Soporte (C.B.R.)

De la curva corregida se toman los valores de esfuerzo para penetraciones de 2.54 mm (0.100") y 5.08 mm (0.200") y se calculan las relaciones de soporte para cada uno dividiendo los esfuerzos corregidos por los esfuerzos de referencia de 6.9 MPa (1000 lb/pulg²) y 10.3 MPa (1500 lb/pulg²) respectivamente y se multiplica por 100. Se calcula adicionalmente las relaciones de soporte para el máximo esfuerzo si la penetración es menor de 5.08 mm (0.200"), interpolando el esfuerzo de referencia. La relación de soporte reportada para el suelo es normalmente la de 2.54 mm (0.100") de penetración. Cuando la relación a 5.08 mm (0.200") de penetración resulta ser mayor, se repite el ensayo. Si el ensayo de comprobación da un resultado similar, se usa la relación de soporte determinada para 5.08 mm (0.200")

3. Si los valores de relación de soporte para penetraciones de 7.62, 10.16 y 12.7 mm (0.300", 0.400" y 0.500") son requeridos, los valores de esfuerzo corregidos para estas penetraciones se deben dividir por los esfuerzos de referencia para 13.1, 15.9 y 17.9 MPa (1900, 2300 y 2600 lb/pulg²) respectivamente y multiplicarse por 100.

CAPÍTULO III

EVALUACIÓN DEL C.B.R. EN LABORATORIO
Y C.B.R. IN SITU EN SUBRASANTES

CAPÍTULO III

EVALUACIÓN DEL C.B.R. EN LABORATORIO Y C.B.R. IN SITU EN SUBRASANTES

3.1 Introducción

La finalidad, que determina las condiciones de soporte de cualquier tipo de suelo, subrasantes en este caso, son determinadas a partir del ensayo C.B.R., para lo cual existen dos maneras de realizar, una es la más comúnmente utilizada, que la llamamos en este proyecto como C.B.R. en laboratorio y la otra es con un equipo que nos permite realizarla en el sitio de requerimiento (C.B.R. In Situ).

Es de gran necesidad el conocer la capacidad portante del suelo (C.B.R.), para de esta manera realizar una evaluación correspondiente a partir de este dato, pero la metodología convencional es un tanto meticulosa, para este detalle de tiempo diseñaron un dispositivo que nos permite hacer este ensayo en el lugar de requerimiento, es decir, en el sitio (In Situ – en inglés), con una mayor facilidad y menos tiempo invertido.

3.2 Laboratorios empleados

Para el presente proyecto se empleó los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, de la ciudad Tarija.

En los laboratorios de la UAJMS se realizaron todos los ensayos de clasificación de suelos, compactaciones, C.B.R. ´s convencionales, más algunos procedimientos necesarios para determinar la densidad In Situ.

3.3 Descripción y ubicación del proyecto

De acuerdo con la dirección de Ordenamiento Territorial DOT, la ciudad contaba con 89 barrios, mientras que al 2016 según datos de la Federación de Juntas Vecinales de la provincia Cercado FEJUVE, los espacios territoriales vecinales llegaban a 173 barrios y 74 urbanizaciones con diferentes realidades y necesidades similares, tal el caso del Distrito 12 la falta de planimetrías y estudios de suelos que actualmente impiden un desarrollo

urbano armónico, no solo en el sentido de la ubicación de calles, manzanos, áreas verdes, límites y otros, sino también en la planificación e inversión de recursos públicos que deben mejorar la calidad de las mujeres y hombres que viven en los barrios y urbanizaciones.

A partir de la información mencionada en este proyecto de investigación presentamos un conjunto de información que nos muestra la realidad cuantitativa y cualitativa de los barrios que conforman la ciudad de Tarija, información obtenida a partir de 30 puntos distribuidos en todo del Distrito 12, datos de estudios de suelos.

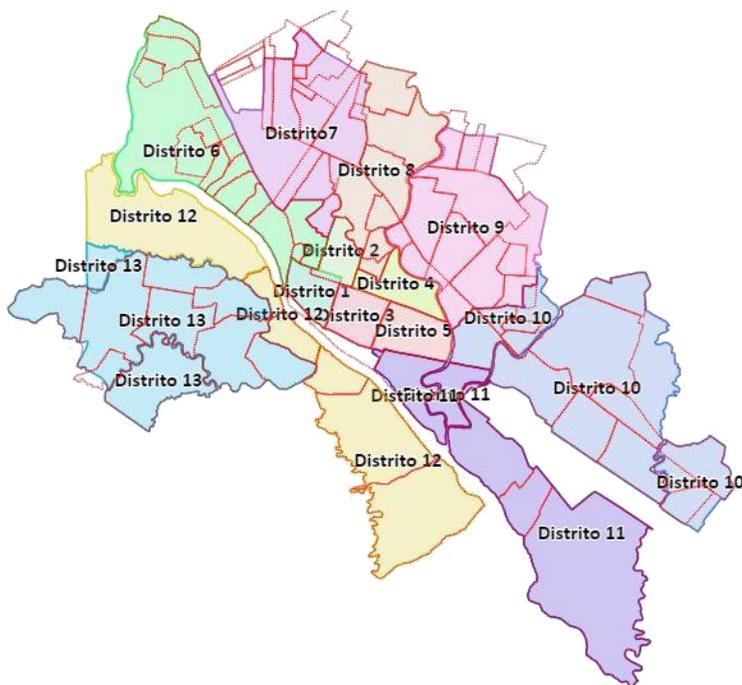
Convencidos que la información es vital para el funcionamiento de nuestra sociedad ya que con ella se pueden asumir acciones de planificación y construcción conjunta para una buena calidad de vida, aprovechamos para hacer la siguiente observación; que al momento de la búsqueda y captura de los datos nos encontramos con una realidad patente: la falta de información detallada, desagregada y específica sobre el tema de estudio de suelos, que entidades que tienen que ver directamente deberían tenerla pero no la tienen.

Figura 3.1 Mapa político del departamento de Tarija



Fuente: Wikipedia

Figura 3.2 Mapa de Organización Territorial Barrial



Fuente: Dirección de Catastro del Gobierno Autónomo Municipal de Tarija

3.4 Reconocimiento del área del proyecto.

Antes de iniciar el proyecto se hizo un reconocimiento de campo a fin de hacer una inspección visual para recopilar toda la información y de esta manera estudiar y evaluar toda la documentación técnica disponible: mapas topográficos, imágenes satelitales e informes de investigación con relación al presente proyecto, informes de investigaciones de proyectos cercanos, similares o adyacentes.

Es importante tener en cuenta que no existe informes de proyectos similares en el área de proyecto.

Un perfil general de un área de suelo, está definido únicamente en el sitio del hueco o sondeo, puede complementarse esta fase de investigación mediante registros gráficos de los ensayos y complementando con otros ensayos con otros datos de suelos pertinentes al área de proyecto.

Las perforaciones son los suficiente para la obtención de las muestras y ensayos in situ.

Se identificó cada muestra con su respectiva perforación o calicata y con la profundidad a la cual fue tomada con un identificativo dentro de bolsas plásticas y se cierra en forma segura con cinta y las muestras envueltas con papel film para evitar pérdidas de humedad.

3.5 Mapa de localización de los puntos.

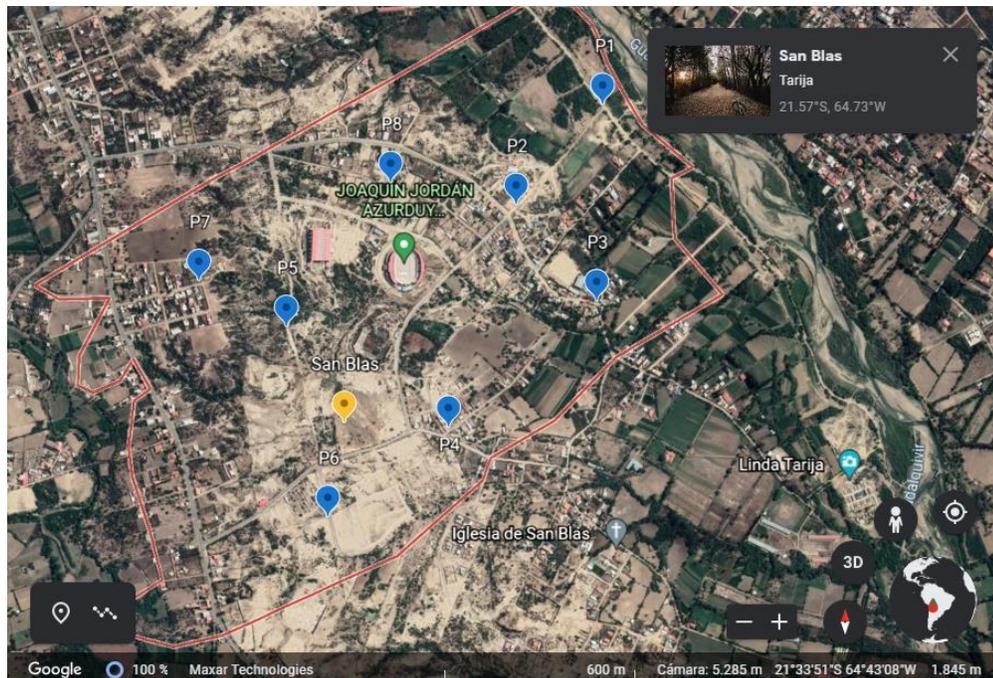
3.5.1 Barrio San Blas.

Tabla 3.1 Tabla de coordenadas de los puntos barrio San Blas.

| Barrio | Punto | Coordenadas | | |
|----------|-------|-------------|------------|----------|
| | | Este | Norte | Altura |
| San Blas | P1 | 322177.62 | 7615002.01 | 1873,206 |
| | P2 | 321904.22 | 7614677.48 | 1896,527 |
| | P3 | 322175.03 | 7614377.17 | 1879,305 |
| | P4 | 321706.11 | 7613984.12 | 1894,741 |
| | P5 | 321189.06 | 7614306.48 | 1903,795 |
| | P6 | 321321.26 | 7613752.25 | 1905,857 |
| | P7 | 320931.83 | 7614431.01 | 1939,684 |
| | P8 | 321510.42 | 7614754.24 | 1890,035 |

Fuente: Elaboracion propia

Figura 3.3 Mapa de localización de los puntos barrio San Blas.



Fuente: Elaboracion propia, Google Earth

3.5.2 Barrio Miraflores.

Tabla 3.2 Tabla de coordenadas de los puntos barrio Miraflores.

| Barrio | Punto | Coordenadas | | |
|------------|-------|-------------|------------|----------|
| | | Este | Norte | Altura |
| Miraflores | P9 | 321118.42 | 7616148.77 | 1885,467 |
| | P10 | 320956.25 | 7615700.15 | 1903,325 |
| | P11 | 321424.21 | 7615603.71 | 1880,466 |
| | P12 | 321000.95 | 7615514.16 | 1895,326 |
| | P13 | 320612.60 | 7615127.95 | 1941,514 |
| | P14 | 321230.03 | 7615043.37 | 1896,367 |
| | P15 | 320734.52 | 7615401.12 | 1918,512 |

Fuente: Elaboracion propia

Figura 3.4 Mapa de localización de los puntos barrio Miraflores.



Fuente: Elaboracion propia, Google Earth

3.5.3 Barrio German Busch.

Tabla 3.3 Tabla de coordenadas de los puntos barrio German Busch.

| Barrio | Punto | Coordenadas | | |
|--------------|-------|-------------|------------|----------|
| | | Este | Norte | Altura |
| German Busch | P16 | 319774.92 | 7617306.19 | 1901,014 |
| | P17 | 319956.97 | 7617109.69 | 1900,024 |
| | P18 | 320222.67 | 7616760.69 | 1902,436 |
| | P19 | 320418.30 | 7616295.40 | 1902,010 |

Fuente: Elaboracion propia

Figura 3.5 Mapa de localización de los puntos barrio German Busch.



Fuente: Elaboracion propia, Google Eart

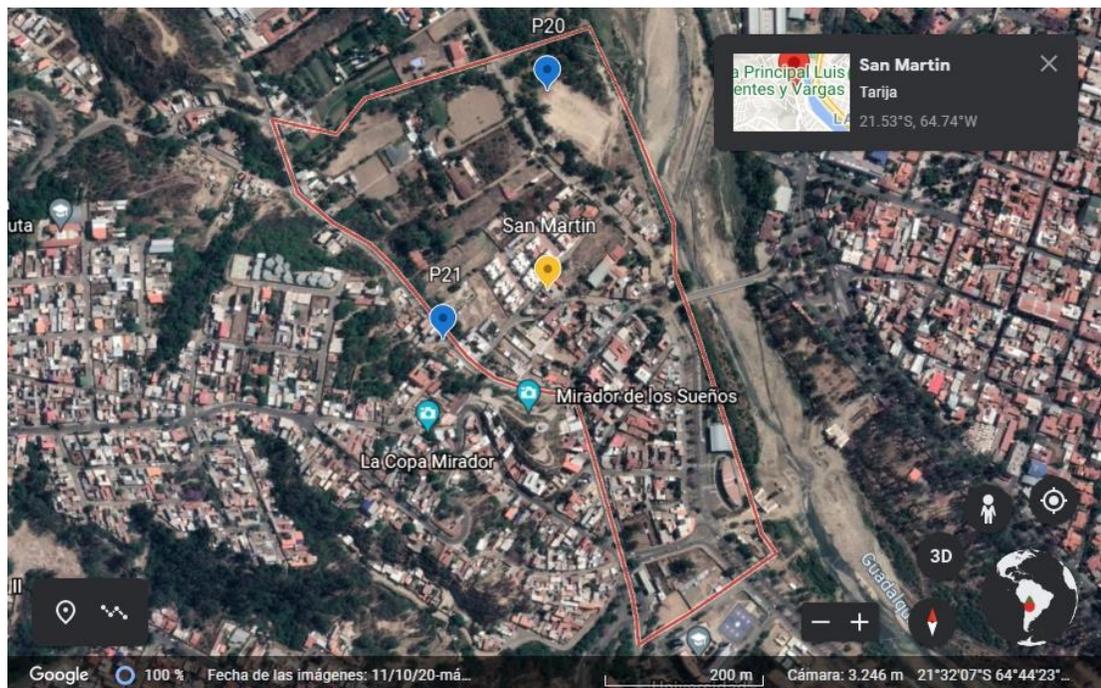
3.5.4 Barrio San Martín.

Tabla 3.4 Tabla de coordenadas de los puntos barrio San Martín

| Barrio | Punto | Coordenadas | | |
|------------|-------|-------------|------------|----------|
| | | Este | Norte | Altura |
| San Martín | P20 | 319406.21 | 7618125.13 | 1908,224 |
| | P21 | 319277.17 | 7617805.67 | 1921,034 |

Fuente: Elaboracion propia

Figura 3.6 Mapa de localización de los puntos barrio San Martín.



Fuente: Elaboracion propia, Google Earth

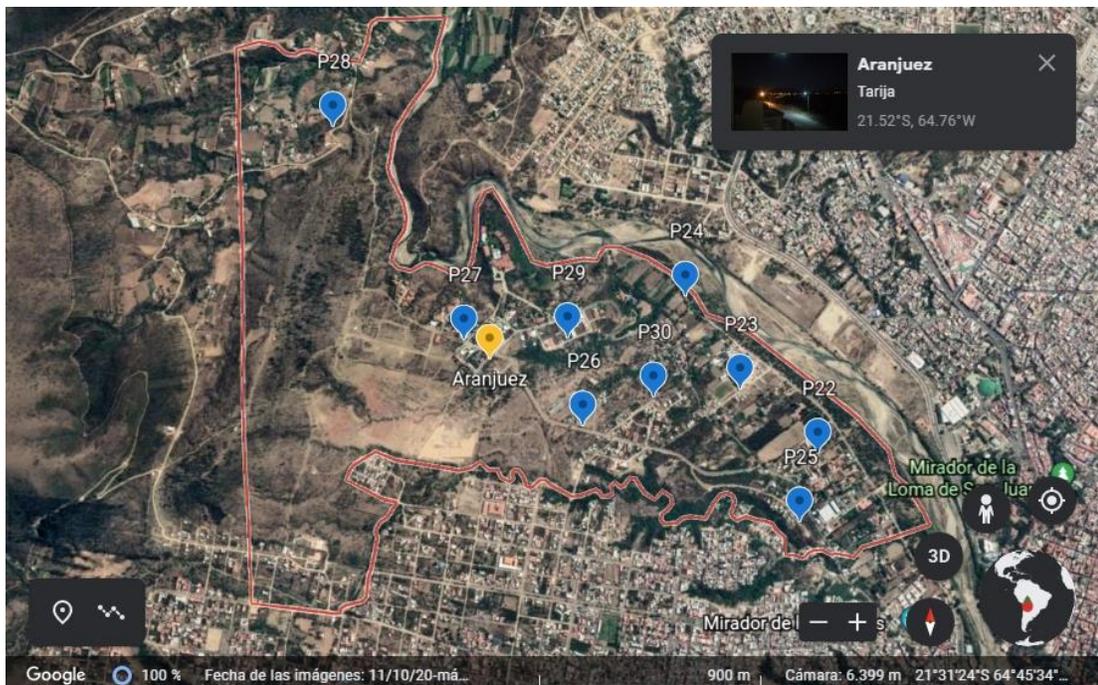
3.5.5 Barrio Aranjuez.

Tabla 3.5 Tabla de coordenadas de los puntos barrio Aranjuez

| Barrio | Punto | Coordenadas | | |
|----------|-------|-------------|------------|----------|
| | | Este | Norte | Altura |
| Aranjuez | P22 | 318950.13 | 7618548.43 | 1914,204 |
| | P23 | 318673.55 | 7618743.14 | 1918,038 |
| | P24 | 318441.66 | 7619114.79 | 1921,984 |
| | P25 | 318911.25 | 7618204.86 | 1952,126 |
| | P26 | 318028.44 | 7618577.24 | 1965,860 |
| | P27 | 317522.17 | 7618930.04 | 1978,947 |
| | P28 | 316989.40 | 7619780.10 | 1987,328 |
| | P29 | 317916.12 | 7618918.00 | 1967,057 |
| | P30 | 318308.52 | 7618704.72 | 1964,934 |

Fuente: Elaboracion propia

Figura 3.7 Mapa de localización de los puntos barrio Aranjuez.



Fuente: Elaboracion propia, Google Earth

3.6 Toma y preparación de las muestras para los ensayos.

Las dimensiones, forma y demás características de las muestras dependen del ensayo a las que van a estar sometidas.

Figura 3.8 Excavación de calicata para extracción de muestras y ensayos in situ



Fuente: Elaboración propia

3.6.1 Trabajo de campo

En cada punto de las subrasantes, se procedió a realizar la georreferenciación de los puntos como así mismo los ensayos in situ tales como: C.B.R. in situ, densidad in situ, la toma de muestras para los ensayos en laboratorio tales como: la caracterización de suelos, compactación y C.B.R. en laboratorio.

Figura 3.9 Preparación para realizar el ensayo de C.B.R. in situ y densidad in situ



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.10 Lugar de ensayo barrio San Blas punto 2



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.11 Montaje del equipo de C.B.R. in situ



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.12 Ensayo de densidad in situ método cono de arena



Fuente: Elaboración propia

3.6.1.1 Toma de muestras

Para la evaluación de las subrasantes se extrajeron muestras a nivel de subrasantes, estos sitios cuentan con todas las características para realizar los ensayos que requiere el proyecto, abarcando todos los grupos de suelos y una distribución de acuerdo al área de cada barrio, suelos sin tratamientos, pero si consolidados.

Los procedimientos para muestreo y ensayos in situ se realizó calicatas a cielo abierto tomando las precauciones necesarias para evitar el desprendimiento de material de las paredes que puede contaminar la muestra, en días de lluvia no se realizó el ensayo ni se excavó la calicata.

Para el transporte de las muestras para que estas no sean contaminadas ni alteradas se colocó en bolsas completamente cerradas e inmediatamente se lleva a laboratorio utilizando un medio de transporte en este caso un automóvil.

Figura 3.13 Toma de muestras de suelo en el punto 10 del barrio Miraflores



Fuente: Elaboración propia

3.7 Resultados.

Los resultados se presentan agrupados de acuerdo al tipo de suelo.

3.7.1 Resultados de ensayos en laboratorio e in situ.

3.7.1.1 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo (ASTM D2216).

Para la realización de este ensayo se necesita una serie de equipamiento para obtener los valores de humedad que cumpla con las normas establecidas, lo primero que se necesita es un suelo natural luego una serie de recipientes metálicos una tara pequeña para el pesaje del material, una balanza de precisión de 3 dígitos, horno estandarizado que nos permita obtener temperaturas entre 105 y 110 grados centígrados y vamos a someterlo la muestra durante 24 horas lo primero que tenemos que hacer es pesar la tara y anotar el peso de la

tara vacía, luego colocamos una cierta cantidad de material alrededor de unos 100 a 150 gramos y nuevamente pesamos la tara más el suelo húmedo, luego colocar la muestra en el recipiente al horno durante 24 horas, después se saca la muestra con la ayuda de un guante para evitar quemar y esperar hasta que se enfríe para luego pesar nuevamente anotar el peso de la tara más la muestra seca con eso concluye el ensayo lo que procede son los cálculos.

Figura 3.14 Muestras para determinar el contenido de humedad en laboratorio UAJMS



Fuente: Elaboración propia

3.7.1.2 Determinación del límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89)

El límite líquido es la frontera entre el estado plástico y estado líquido corresponde a una resistencia al corte de 25g/cm^2 .

Con el método de copa de Casagrande se usa suelo que pasa el tamiz N°40, se lo humedece a una cierta humedad y se coloca en la copa de Casagrande enrasar la muestra aproximadamente el espesor de 1cm, luego a través de un ranurador separar la muestra en dos partes generando un canal hacer de manera cuidadosa luego se procede a hacer girar la manivela hasta que la muestra se cierre en una distancia de $\frac{1}{2}$ pulgada y se registra el número de golpes en una planilla y así se repite a diferentes contenidos de humedad

diferentes números de golpes para cada muestra y se saca una pequeña muestra para determinar el contenido de humedad con los resultados obtenidos se procede a graficar la curva de flujo y se determina que el LL es el contenido de humedad a 25 golpes.

Figura 3.15 Determinar el límite líquido en laboratorio UAJMS



Fuente: Elaboración propia

3.7.1.3 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad (ASTM D4318 AASHTO T90)

El límite plástico es la frontera entre el estado semisólido y plástico.

Para obtener el límite plástico se elabora rollitos de una muestra de suelo fino que pasa el tamiz N°40 se agrega agua y se forma pequeños rollitos de diámetro 1/8 pulgada utilizando vidrio se forma pequeños cilindros con la palma de la mano, el límite plástico será cuando estos rollitos presenten fisuras en ese momento se pone la muestra para determinar el contenido de humedad.

Con los valores obtenido de limite líquido y limite plástico se determina el índice de plasticidad haciendo una resta de LL menos LP.

Conociendo el límite líquido y límite plástico, usando la carta de plasticidad nos permite determinar clasificar el suelo es que dependen de cuál es el valor del límite líquido y plástico.

Figura 3.16 Rollitos de muestra fina para determinar el límite plástico laboratorio de suelos UAJMS



Fuente: Elaboración propia

3.7.1.4 Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D422 AASHTO T88)

Es un método de separación de las partículas de suelos, aplica para suelos que pasan los distintos tamices hasta el tamiz N°200.

Para este ensayo necesitaremos una serie de tamices una balanza, un horno estandarizado que logue mantener la temperatura uniforme y constante hasta 110 grados centígrados, vasijas y cepillos.

Se toma una porción de material y se coloca al horno cuando ya está seca se saca para hacer el tamizado.

Con la muestra lista y acondicionada se arma la serie de tamices siempre empezando del de mayor abertura al más fino, si se hace de manera manual se deben hacer movimientos laterales y verticales y simulando una circunferencia de forma que la muestra mantenga un movimiento continuo, al desmontar se procede al pesado de cada tamiz con la muestra

retenida, la sumatoria de los pesos finales debe ser igual o no diferir más del 1% si el ensayo se realiza por partes debido a que el suelo fino no es separado del suelo grueso, se separa en dos muestras una que retenida en el tamiz N°10, se hace como lo anterior mencionado y otra que pasa el tamiz N°10 que se ensaya de la siguiente manera: tomamos la muestra que pasa el tamiz N°10 y se procede a sumergir en agua en un recipiente, luego se procede a lavar la muestra sobre el tamiz N°200 hasta que el agua salga limpia, tomamos el material retenido en el N°200 y se seca en el horno para luego proceder a tamizarlo en seco con la serie de tamices finos, una vez culminado el proceso de tamizado procedemos a desmontar cada tamiz y a pesar el material retenido en cada uno de ellos y con estos valores procedemos a graficar la curva granulométrica que es una representación gráfica de los resultados obtenidos del tamizado en el eje “y” tenemos el porcentaje que pasa en escala aritmética y en el eje “x” la abertura del tamiz en mm y en escala logarítmica para facilitar la construcción e interpretación de la curva debido a la gran cantidad de tamaños.

3.7.1.5 Clasificación de suelos USCS

Sistema de Clasificación de Suelos Unificado, USCS (Unified soil classification system), se trata de un sistema más completo de clasificación que nos permite también conocer las características de plasticidad, gradación y otros de las muestras que se analiza, este método más usual para la ingeniería geotécnica clasifica las muestras mediante las abreviaciones del método y les asigna un nombre con respecto a sus otras características.

Para obtener la distribución de tamaños de las partículas se utilizan dos métodos muy difundidos como son el tamizado mecánico y el del hidrómetro que se complementan mutuamente para obtener granulometrías completas hasta tamaños de partículas ínfimos.

Para la determinar los límites de consistencia LL, LP e IP ($IP = LL - LP$) se determinan mediante el ensayo de muestras según métodos normalizados.

3.7.1.6 Relaciones de peso unitario – humedades en los suelos método modificado (ASTM D422 AASHTO T180)

La resistencia de un suelo depende de cuan compacto esté es decir qué tan juntos estén los granos que componen un suelo más compacto es un suelo más resistente será la resistencia del suelo a su vez depende de la cantidad de agua que contienen ya que el agua contenida en el suelo lubrica los granos y permite deslizarse los unos sobre otros fácilmente pero solo una cantidad de agua facilita su compactación.

La finalidad del ensayo Proctor es determinar la cantidad óptima de agua de un suelo que permite la mejor compactación para una energía dada.

El ensayo se basa en el hecho de que la compacidad del suelo es proporcional a la densidad del suelo seco.

El ensayo Proctor modificado está limitado a suelos que pasan totalmente la malla N°4 o que tengan un porcentaje retenido máximo el 10% en esta malla, pero este 10% debe pasar totalmente la malla 3/8”.

Para este ensayo necesitaremos moldes de 6 pulgadas de diámetro y 6 pulgadas de altura un pisón o martillo de 10 lb una balanza un horno tamices de 2”, 3/4”, N°4, recipientes una bandeja metálica espátulas una regla metálica y la muestra.

Tomamos una muestra representativa aproximadamente 6 kg si la muestra está húmeda procedemos a secarle, procedemos a tamizar descartando todo material que sea mayor al tamiz N°4 luego mezclamos la muestra con agua suficiente hasta obtener una muestra ligeramente humedad procedemos a pesar el molde con la placa base para el Proctor modificado se emplean 5 capas le adicionamos el collarín esto con el fin de evitar perdida de material durante el ensayo luego ponemos el material en el cilindro donde se irá compactando cada capa y se dan 56 golpes por cada capa el pisón se deja caer a 18 pulgadas después de la compactación se saca el collar del molde y se recorta cuidadosamente el suelo que sobresalga el molde usando una regla metálica, pesamos el molde más el suelo húmedo incluyendo la capa base retiramos el suelo del molde y tomamos 2 porciones representativas una de la parte superior y otra de una parte próxima

al fondo la pesamos y la secamos en el horno, repetimos el procedimiento anterior con un contenido de agua ligeramente mayor y así sucesivamente hasta que disminuya o no haya cambios en la masa unitaria humedad se debe obtener por lo menos 4 puntos en la gráfica de compactación luego procedemos a dibujar en una gráfica los resultados obtenidos donde en el eje “x” tendremos los diferentes contenidos de agua y en el eje “y” los pesos específicos secos.

Figura 3.17 ensayo de compactación laboratorio de suelos UAJMS



Fuente: Elaboración propia

3.7.1.7 Determinación de la relación soporte del suelo en el laboratorio (C.B.R. en laboratorio) (ASTM D1883 AASHTO T193)

El C.B.R. es un ensayo que mide la penetración de un pistón a una muestra de suelo preparado en su humedad óptima para obtener dicha humedad óptima hay que hacer el ensayo Proctor entonces se entiende que este suelo está a su densidad máxima dependiendo de los valores de C.B.R. vamos a determinar si es un buen suelo o no para subrasantes en una muestra compactada y a una condición de humedad más desfavorable es decir suelo sumergido al agua durante 96 hr.

Los equipos y materiales necesitamos una prensa de ensayo automática con extensómetro indicador de carga y otro de penetración, necesitamos moldes con base perforada para que ingrese el agua cuando es sumergido necesitamos también cargas una balanza de 0.1 de precisión un disco espaciador y finalmente el aparato de medición de expansión.

Preparación de la muestra lo primero que se hace es calcular el volumen de agua para alcanzar la humedad óptima del ensayo de Proctor pesar el molde vacío más la base luego colocar el disco espaciador en el molde colocar el papel filtro y compactar 5 capas a 12 golpes por capa y así mismo para 25 golpes y 56 golpes por capa respectivamente se retira el collarín y se enrasa la muestra con una regla metálica se retira el disco espaciador y se invierte el molde quedando el espacio vacío hacia arriba y se realiza el pesaje del molde más suelo más base y se coloca el vástago y las sobrepesas en el espacio vacío en el molde, llevar a una piscina para sumergir durante 96 hr, después de las 96 hr donde se toma lecturas cada día con un extensómetro que mide la expansión del suelo, se retira el vástago y las sobrecargas y se deja exprimir el agua durante 15 min como mínimo antes de colocar en la prensa automática y registrar la carga para cada intervalo de penetración, ahora lo que queda es calcular el C.B.R. con una curva de tensión deformación.

La prensa me da valores de carga, esta se divide en el área del pistón que es penetrado lo que me da la tensión si la curva tiene un punto de inflexión donde cambia la concavidad se procede a corregir se obtiene valores para 0.1" y 0.2" y transformar a porcentaje de C.B.R. tomándose el que sea menor de estos 2, antes de realizar el ensayo se deben conocer las condiciones de hidratación y el número de sobrecargas las que tratan de simular las capas del pavimento.

El segundo gráfico se denomina curva de C.B.R. y se grafica el C.B.R. para 12, 25 y 56 golpes y eso se relaciona con la densidad seca y buscar el 100% y el 95% de la densidad máxima seca y ese será el valor de C.B.R. del suelo.

Figura 3.18 Ensayo de C.B.R. en laboratorio de suelos UAJMS



Fuente: Elaboración propia

3.7.1.8 Peso unitario por el método del cono de arena (ASTM D1556 AASHTO T191)

Frasco de 4 litros aproximadamente, cono desmontable con válvula de $\frac{1}{2}$ pulgada, tamiz placa base, recipientes, balanza, herramientas como cincel, brocha, arena limpia, seca con densidad y gradación uniforme.

Luego de elegir un sitio representativo una calicata a 40 cm de profundidad, en el fondo debe estar plano donde se colocara la placa metálica ajustado con clavos para que no se mueva cuando se realiza el ensayo luego, se procede a excavar un hueco cilíndrico de aproximadamente 15 cm con mucho cuidado para no alterar el suelo alrededor del hueco, para eso utilizamos un cincel de punta plana y un combo recogemos la muestra en una bolsa plástica, luego procedemos a colocar sobre la placa el frasco, cono con arena previamente pesado, abrimos la válvula y dejamos que fluya luego cerramos la válvula y procedemos a retirar el frasco para pesar luego después del ensayo y se pesa también el peso del suelo excavado para determinar su densidad, finalmente retiramos la arena calibrada para nuevos ensayos, pesamos el material extraído y pesamos el material

extraído por el tamiz $\frac{3}{4}$ " y desechamos el material retenido para luego determinar el contenido de humedad.

Figura 3.19 Ensayo de densidad in situ, método cono de arena



Fuente: Elaboración propia

3.7.1.9 Relación de soporte de suelo in situ (C.B.R. "IN SITU") (ASTM D4429)

Este ensayo es usado para evaluar cualquier tipo de subrasantes.

Necesitamos un equipo de C.B.R. que tiene un gato mecánico, un anillo de carga que posee un dial que mide la deformación del anillo de carga y la penetración, tiene un pistón de carga de penetración, pesas y accesorios para alargar el pistón.

Es aplicado en campo en una calicata de 1 m x 1 m de 40 cm de profundidad, hay que tener un vehículo de carga suficiente de 31 KN con una viga metálica debajo y posterior del chasis que ofrezca una reacción adecuada para forzar la penetración del pistón en el suelo y permitir que el ensayo se realice sin movimiento ascendente del vehículo.

Se prepara la superficie donde va ser ensayada se retira material suelto y orgánico excavando una calicata a una profundidad de 40 cm y se prepara un área uniforme y horizontal como sea posible.

Se sitúa el vehículo de tal forma que la viga de reacción quede directamente sobre el centro del área de ensayo, se instala el equipo de C.B.R. in situ apoyado a la viga del vehículo de carga, con la manivela hacia afuera se nivela el pistón para que quede vertical y se nivela el soporte donde se coloca el extensómetro que medirá la penetración, se debe cerciorar que el vehículo este nivelado en la parte trasera.

Se ubica el gato mecánico en la posición correcta y se acopla el anillo de carga, se acopla el pistón, se adiciona las extensiones si es necesario, se sujeta el gato en su sitio, se debe comprobar el nivel de montaje para asegurar que esté vertical y se coloca la platina de 10 lb, se asienta el pistón, se adiciona una sobrecarga de 10 lb y se procede a calibrar los extensómetros a cero en ambos diales y se comienza con el ensayo girando la manivela a una velocidad constante de penetración de 0.05”por minuto y para cada incremento de penetración hasta una penetración de profundidad final de 12.7 mm o 0.5”, se anota el valor de la deformación del anillo de carga.

Con los datos obtenidos se procede a realizar los cálculos, hay que realizar una curva de esfuerzo penetración si la curva presenta un punto de inflexión, se debe corregir el C.B.R., de la curva corregida se toman los valores de esfuerzos para deformación de 0.1” y 0.2” y se divide por los esfuerzos de referencia y se multiplica por 100 para tener el resultado en porcentajes.

Figura 3.20 Ensayo de C.B.R. in situ Barrio Aranjuez



Fuente: Elaboración propia

3.7.2 Resultados de los ensayos de caracterización física, caracterización mecánica y ensayos in situ

A continuación, se presenta la tabla de resultados de la caracterización y clasificación SUSC, el desarrollo de cada ensayo está en anexos II.

A continuación, se presenta la tabla de resultados de los ensayos resistencia – deformación, ensayos in situ y clasificación AASHTO de los suelos el desarrollo de cada ensayo está en anexos II.

Tabla 3.6 Resultados de los ensayos de caracterización y clasificación SUCS de los suelos

| Punto | Límites de Atterberg | | | SUCS | Descripción |
|-------|----------------------|-------|-------|-------|--|
| | LL | LP | IP | | |
| 1 | 28,18 | 20,59 | 7,00 | CL-ML | Arcilla limosa |
| 2 | 47,22 | 18,71 | 28,51 | CL | Arcilla de media plasticidad |
| 3 | 44,90 | 21,21 | 23,69 | CL | Arcilla de media plasticidad |
| 4 | 28,93 | 18,52 | 10,41 | CL | Arcilla de baja plasticidad con arena |
| 5 | 46,50 | 25,40 | 21,10 | CL | Arcilla de media plasticidad |
| 6 | 50,13 | 24,85 | 25,28 | CH | Arcilla de alta plasticidad |
| 7 | 35,18 | 17,30 | 17,88 | CL | Arcilla de media plasticidad con arena |
| 8 | 29,70 | 26,54 | 3,15 | ML | Limo de baja plasticidad con arena |
| 9 | 41,21 | 29,92 | 11,29 | ML | Limo de baja plasticidad |
| 10 | 56,74 | 49,71 | 7,03 | MH | Limo de alta plasticidad |
| 11 | 22,99 | 20,00 | 2,99 | ML | Limo de baja plasticidad arenoso |
| 12 | 29,45 | 13,68 | 15,77 | CL | Arcilla de baja plasticidad |
| 13 | 24,81 | 21,91 | 2,91 | ML | Limo de baja plasticidad |
| 14 | 39,21 | 32,48 | 6,73 | ML | Limo de baja plasticidad |
| 15 | 27,39 | 24,86 | 2,53 | ML | Limo de baja plasticidad arenoso |
| 16 | 25,89 | 19,33 | 6,56 | CL-ML | Arcilla limosa |
| 17 | 22,16 | 14,74 | 7,42 | CL-ML | Arcilla limosa arenosa |
| 18 | 40,37 | 32,22 | 8,15 | ML | Limo de baja plasticidad |
| 19 | No plástico | | | SP-SM | Arena mal graduada con limo |
| 20 | No plástico | | | GW | Grava bien graduada con arena |
| 21 | 32,67 | 24,06 | 8,61 | ML | Limo de baja plasticidad |
| 22 | 32,77 | 23,73 | 9,04 | ML | Limo de baja plasticidad con arena |
| 23 | 28,71 | 18,30 | 10,41 | CL | Arcilla de baja plasticidad |
| 24 | 24,19 | 13,23 | 10,96 | CL | Arcilla de baja plasticidad arenosa |
| 25 | 32,01 | 20,40 | 11,61 | GC | Grava arcillosa con arena |
| 26 | 38,97 | 35,64 | 3,33 | OL | Limo orgánico |
| 27 | 23,54 | 19,58 | 3,96 | SM | Arena limosa con grava |
| 28 | 24,38 | 16,79 | 7,59 | GC | Grava arcillosa |
| 29 | 28,24 | 22,55 | 5,69 | SC-SM | Arena mal graduada con arcilla |
| 30 | 28,26 | 24,14 | 4,13 | OL | Limo orgánico |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3.7 Resultados de los ensayos resistencia – deformación, ensayos in situ y clasificación AASHTO de los suelos

| Punto | H. Natural | H. Óptima | pd. Máx. | C.B.R. Lab. | | pd. In Situ | C.B.R. In Situ | Clasificación AASHTO | Descripción |
|-------|------------|-----------|----------|-------------|-------|-------------|----------------|----------------------|-------------------------------------|
| | | | | 100% | 95% | | | | |
| 1 | 6,87 | 11,76 | 1,94 | 9,25 | 6,53 | 1,29 | 2,97 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 2 | 13,89 | 14,92 | 1,77 | 5,52 | 4,89 | 1,46 | 2,94 | A-7-6 (17) | Suelo arcilloso |
| 3 | 10,55 | 13,78 | 1,78 | 5,54 | 5,20 | 1,39 | 3,05 | A-7-6 (15) | Suelo arcilloso |
| 4 | 9,40 | 11,63 | 1,91 | 7,04 | 5,25 | 1,40 | 2,70 | A-6 (8) | Suelo arcilloso |
| 5 | 12,90 | 12,85 | 1,85 | 5,49 | 4,78 | 1,32 | 2,82 | A-7-6 (14) | Suelo arcilloso |
| 6 | 17,70 | 13,04 | 1,86 | 5,70 | 5,25 | 1,80 | 3,10 | A-7-6 (16) | Suelo arcilloso |
| 7 | 9,66 | 11,60 | 1,91 | 6,53 | 5,93 | 1,45 | 2,67 | A-6 (11) | Suelo arcilloso |
| 8 | 7,90 | 12,13 | 1,96 | 9,66 | 7,93 | 1,54 | 3,87 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 9 | 8,60 | 11,25 | 1,85 | 6,03 | 5,27 | 1,79 | 3,28 | A-7-5 (9) | Suelo arcilloso |
| 10 | 11,25 | 12,63 | 1,77 | 6,72 | 6,22 | 1,62 | 3,13 | A-5 (11) | Suelo limoso |
| 11 | 7,64 | 11,94 | 1,95 | 8,70 | 5,69 | 1,63 | 2,61 | A-4 (7) | Suelo limoso |
| 12 | 6,03 | 11,76 | 1,95 | 6,92 | 6,10 | 1,63 | 3,93 | A-6 (10) | Suelo arcilloso |
| 13 | 9,91 | 13,06 | 1,84 | 9,45 | 6,92 | 1,59 | 2,97 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 14 | 11,58 | 13,02 | 1,84 | 8,36 | 5,79 | 1,82 | 3,59 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 15 | 6,81 | 11,57 | 1,96 | 7,77 | 5,78 | 1,82 | 3,25 | A-4 (4) | Suelo limoso |
| 16 | 12,39 | 11,04 | 1,93 | 8,53 | 6,53 | 1,59 | 2,36 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 17 | 5,69 | 11,60 | 1,93 | 8,47 | 6,32 | 1,43 | 2,18 | A-4 (6) | Suelo limoso |
| 18 | 10,97 | 13,05 | 1,83 | 7,64 | 6,03 | 1,46 | 2,82 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 19 | 4,15 | 9,86 | 1,68 | 23,41 | 21,51 | 1,65 | 3,99 | A-3 (0) | Arena fina |
| 20 | 4,82 | 7,72 | 1,95 | 54,70 | 47,33 | 1,67 | 3,31 | A-1-a (0) | Fragmentos de piedra, grava y arena |
| 21 | 16,60 | 12,85 | 1,77 | 6,92 | 5,87 | 1,32 | 2,24 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 22 | 11,45 | 11,59 | 1,88 | 8,41 | 7,58 | 1,49 | 2,33 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 23 | 8,13 | 11,97 | 1,95 | 6,49 | 5,80 | 1,33 | 2,48 | A-6 (8) | Suelo arcilloso |
| 24 | 7,28 | 11,65 | 1,91 | 6,35 | 5,51 | 1,31 | 2,08 | A-6 (6) | Suelo arcilloso |
| 25 | 5,41 | 10,63 | 2,03 | 26,18 | 22,88 | 1,45 | 3,07 | A-2-6 (0) | Grava y arena arcillosa o limosa |
| 26 | 15,39 | 13,88 | 1,83 | 7,98 | 6,63 | 1,50 | 3,05 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 27 | 5,46 | 7,51 | 2,14 | 45,79 | 41,15 | 1,94 | 4,05 | A-1-b (0) | Fragmentos de roca, grava y arena |
| 28 | 6,96 | 8,51 | 2,04 | 28,85 | 26,47 | 1,89 | 3,87 | A-2-4 (0) | Grava y arena arcillosa o limosa |
| 29 | 3,91 | 7,05 | 2,16 | 44,61 | 41,65 | 1,52 | 3,13 | A-1-b (0) | Fragmentos de roca, grava y arena |
| 30 | 8,73 | 11,83 | 1,95 | 6,66 | 6,02 | 1,47 | 2,88 | A-4 (8) | Suelo limoso |

Fuente: Elaboración propia

3.7.3 Mapa de resultados obtenidos

El trabajo consiste en la elaboración del mapa de características geotécnicas con los resultados obtenidos de los suelos en subrasantes del Distrito 12 de la ciudad de Tarija.

Se describe las características físicas, mecánicas y ensayos in situ de los suelos en los puntos de estudio.

De esta manera cumpliendo con el objetivo con el mapa es contar con una guía preliminar, permita tomar decisiones en posibles estudios de suelos en subrasantes, la cual puede ser utilizada por instituciones municipales encargadas en realizar estudios en subrasantes.

3.7.3.1 Simbología y representación de los datos

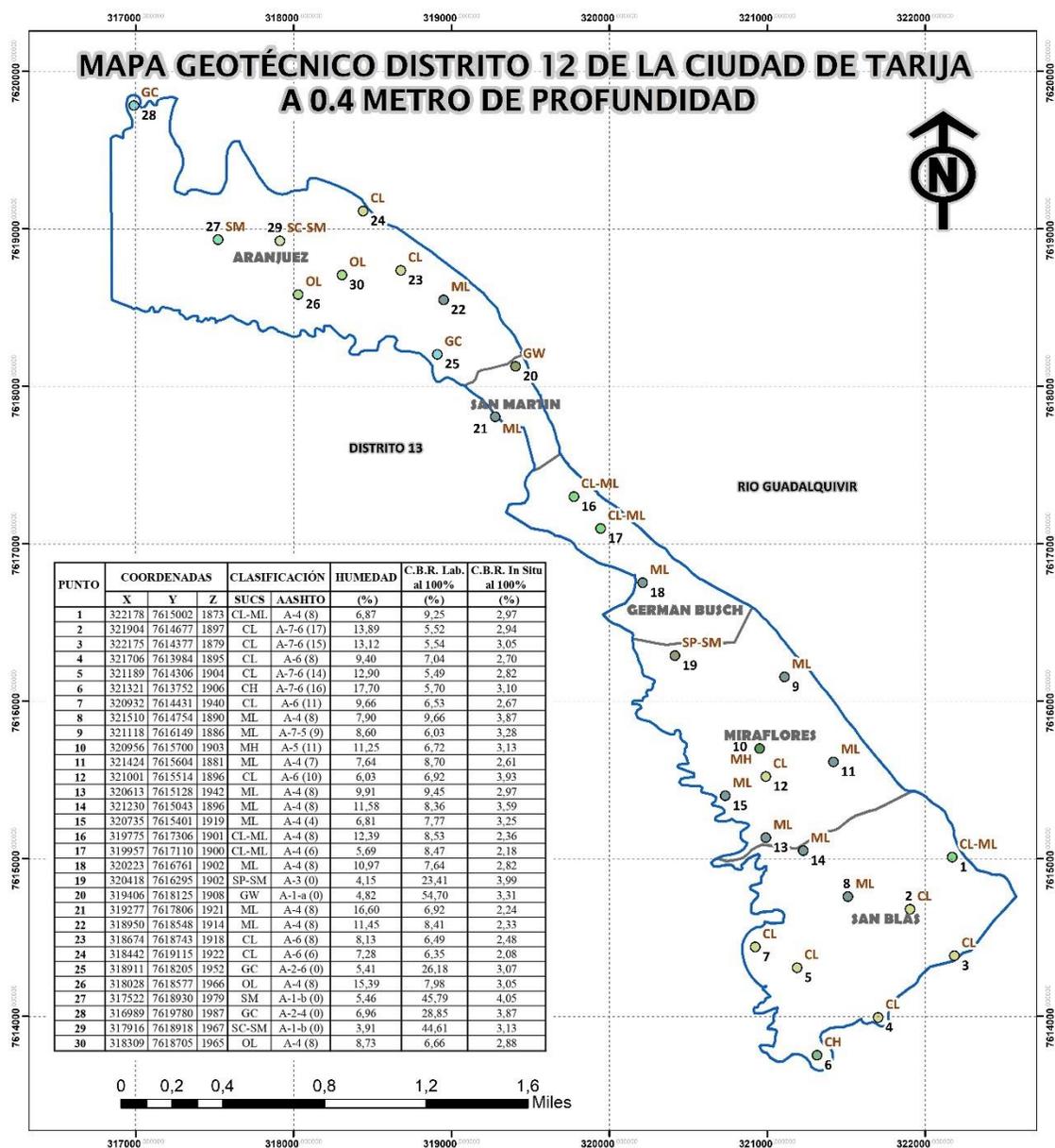
Debido a la complejidad geológica que existe en diferentes zonas y a las diferentes aplicaciones y finalidades de los mapas geotécnicos, no existe un procedimiento que sea estándar en donde se indique el tipo de datos que deben contener, así como la forma de representación de estos. Sin embargo, de manera general, debe representarse en el mapa, la información sobre las características físicas, mecánicas y ensayos in situ de los suelos y rocas, delimitándolas con respecto a un mapa de distrito, zonificándolas geotécnicamente y asignándoles a cada punto valores cuantitativos y cualitativos.

3.7.3.2 Elaboración de la base de datos

A partir de la información que se espera obtener de los estudios de suelos se elabora una base de datos, mediante el uso de Microsoft Excel, cuyo fin es facilitar la organización e interpretación de la información.

A partir de la información registrada en la base de datos, se seleccionará la que se considere necesaria y que contribuya para la elaboración del mapa, pudiendo ser la siguiente: Contenido de humedad natural y clasificación de suelos por el sistema SUCS y AASHTO, C.B.R. en laboratorio, C.B.R. in situ, densidad in situ y con las coordenadas se georreferencia los puntos que contiene el mapa.

Figura 3.21 mapa geotécnico de C.B.R. in situ y C.B.R. en laboratorio



Fuente: elaboración propia

Los demás mapas se encuentran en anexos III

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

los resultados de la presente investigación fueron obtenidos a través de realizar ensayos de laboratorio y de campo, en los 30 puntos ensayados en el Distrito 12 que es el área de estudio quedando registro de todas las actividades mencionadas por medio de fotografías y planillas de datos llenadas.

En el caso de los equipos utilizados, fueron sometidos a la supervisión de auxiliares de laboratorio quienes observaron y recomendaron mejoras y optimizaciones para la obtención de los resultados lo más precisos posibles. Las técnicas empleadas permitieron realizar el análisis de fiabilidad correspondiente dando la validez de los resultados que se consiguieron.

Los resultados obtenidos corresponden al estudio del Distrito 12, pudiendo generalizarse a lo largo del distrito, es decir no solo a los puntos localizados sino así también a zonas donde presentan los mismos tipos de suelos debido a la similitud de características que presentan los suelos.

Por otro lado, no es certero afirmar que estos resultados puedan ser aplicados a suelos que hayan sido modificados es decir hayan sido compactados o removidos afectando el suelo natural, por más que conserven el mismo tipo de suelo debido a que sus características de resistencia serán diferentes.

Lo que sí podría generalizarse es la metodología empleada en la investigación, ya que las herramientas y los equipos empleados cumplen la función de evaluar a detalle y recopilar la información necesaria sobre la evaluación de la capacidad portante de las subrasantes, las relaciones existentes entre variables del mismo tipo de suelo.

Dentro de las limitaciones que existieron en el desarrollo de esta investigación, se puede citar a la más importantes: factor climático como ser la lluvia que dificulta realizar los ensayos y la toma de muestras en campo por lo que no se pudo realizar los ensayos se tuvo que esperar unos días para continuar con los ensayos.

A través de los resultados plasmados en el presente capítulo, se observa que los suelos granulares presentan una buena calidad para subrasantes sin embargo los suelos finos van de pobres a regulares como material de subrasante, los suelos granulares no compactados también presentan C.B.R. in situ bajos.

Es sabido que la práctica y la teoría a veces son contradictorias, por eso es obligatorio hacer los ensayos como corresponde para disipación de las incertidumbres que se puedan generar para poder plantear modelos adecuados acorde con la realidad que enfrenta los suelos en las diferentes subrasantes.

Es necesario analizar punto por punto, de modo que se observe los comportamientos de los suelos frente a cambios de contenido de humedad y a efectos de compactación por los constantes cambios que sufre los suelos al pasar de un estado a otro.

Dentro de los resultados obtenidos, es importante resaltar que la mayoría de ellos son similares de acuerdo al mismo grupo de suelo, desarrollados en diferentes puntos del distrito 12. La similitud está basada en las características de granulometría, límites de consistencia y valores de C.B.R. tanto in situ como en laboratorio.

Sin embargo, son dos las diferencias más grandes entre las investigaciones realizadas en subrasantes ya consolidadas o conformadas para una carretera y a la presente que es en suelos naturales no compactados ni tratados con algún tratamiento superficial, la otra diferencia es entre los valores de C.B.R. en laboratorio en suelos granulares aumenta de gran consideración a los finos, pero en C.B.R. in situ mantienen valores bajos casi similares a suelos finos.

En cuanto a la primera diferencia la brecha es bastante amplia porque suelos compactados presentan valores de C.B.R. in situ altos a diferencia de los que analizamos en la presente investigación. Mientras que en la segunda se refiere a que suelos granulares que no presenten la humedad óptima, la uniformidad de tamaños de partículas y la energía de compactación sus valores de C.B.R. son bajos.

En el presente capítulo también se presentan las relaciones que existen dos variables: densidad in situ vs C.B.R. in situ obteniendo buenas relaciones y se plantea ecuaciones

que pueden ser desarrolladas para cada grupo de suelo analizado y C.B.R. en laboratorio vs C.B.R. in situ en que sus relaciones no son muy buenas porque las características mecánicas son modificadas para realizar el ensayo de C.B.R. en laboratorio la misma muestra de suelo es sometida a una energía de compactación a una humedad óptima lo que hace que sea este factor que los mismos no conserven relaciones directas.

4.1 Análisis de caracterización de los suelos A-1

A continuación, se realiza el análisis de la granulometría de los suelos, tomando los datos de porcentajes de grava, arena, limos y arcillas que según Asshto clasifica a los suelos en 3 grupos, las gravas que van desde el tamiz 3" hasta el tamiz N°10, arena que van desde tamiz N°10 hasta tamiz N°200 y limos o arcillas desde el tamiz N°200 los resultados son los que se presentan en las tablas.

Tabla 4.1 Límites de Atterberg y clasificación SUCS para suelos A-1

| Suelos A-1 | | | | | |
|------------|----------------------|-------|------|-------|--------------------------------|
| Punto | Límites de Atterberg | | | SUSC | Descripción |
| | LL | LP | IP | | |
| 20 | No plástico | | | GW | Grava bien graduada con arena |
| 27 | 23,54 | 19,58 | 3,96 | SM | Arena limosa con grava |
| 29 | 28,24 | 22,55 | 5,69 | SC-SM | Arena mal graduada con arcilla |

Fuente: Elaboración propia

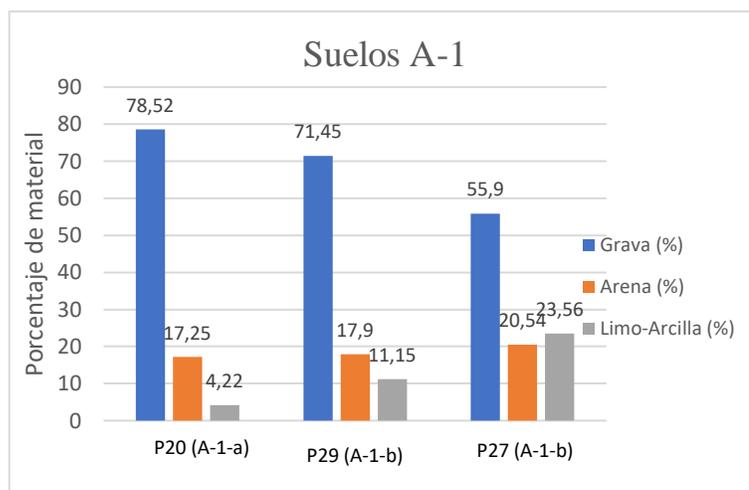
4.1.1 Cantidad de material para suelos A-1

Tabla 4.2 Porcentajes de material para suelos A-1

| Punto | Grava (%) | Arena (%) | Limo-Arcilla (%) |
|-------|-----------|-----------|------------------|
| 20 | 78,52 | 17,25 | 4,22 |
| 29 | 71,45 | 17,9 | 11,15 |
| 27 | 55,9 | 20,54 | 23,56 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.1 Porcentajes de material para suelos A-1



Fuente: Elaboración propia

Análisis de la gráfica para suelos A-1

Se puede ver que hay valores significantes de porcentajes de grava de 78,52%, de arena de 17,90% y (arcilla y limo) de 23.56 %.

En el subgrupo A-1-b a diferencia del subgrupo A-1-a, la cantidad de grava disminuye, pero la cantidad de arena y (arcilla y limo) aumenta debido a que el suelo que lo conforma tiene más cantidad de fino que pasa el tamiz N°200.

De manera que disminuye la cantidad de grava aumenta la cantidad de (arcilla y limo) y la cantidad de arena se mantiene casi constante y no sufre mucho cambio como ocurre con las gravas y arcillas o limos que tienen una variación de la siguiente manera: gravas 22,62%, arenas 3,29%, arcillas y limos 19,34%.

En conclusión, podemos decir que son mezclas regular a mal gradadas compuestas de grava arena y limo de baja plasticidad y como material para subrasante bueno a excelente.

4.2 Análisis de las propiedades mecánicas de los suelos A-1

A continuación, se realiza el análisis de la compactación, C.B.R. en laboratorio, densidad in situ y C.B.R. in situ de los suelos, tomando en cuenta los grupos de suelos que según

AASHTO clasifica en 3, las gravas que van desde el tamiz 3" hasta el tamiz N°10, arena que van desde tamiz N°10 hasta tamiz N°200 y limos o arcillas desde el tamiz N°200 los resultados son los que se presentan en las tablas.

Tabla 4.3 Humedad natural, compactación, C.B.R. (lab.), densidad (in situ), C.B.R. (in situ), clasificación AASHTO para suelos A-1

| Suelos A-1 | | | | | | | | | |
|-------------------|-------------------|------------------|-----------------|--------------------|------------|--------------------|-----------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Punto | H. Natural | H. Óptima | ρd. Máx. | C.B.R. Lab. | | ρd. In Situ | C.B.R. In Situ | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | | | | 100% | 95% | | | | |
| 20 | 4,82 | 7,72 | 1,95 | 54,70 | 47,33 | 1,67 | 3,31 | A-1-a (0) | Fragmentos de piedra, grava y arena |
| 27 | 5,46 | 7,51 | 2,14 | 45,79 | 41,15 | 1,94 | 4,05 | A-1-b (0) | Fragmentos de roca, grava y arena |
| 29 | 3,91 | 7,05 | 2,16 | 44,61 | 41,65 | 1,52 | 3,13 | A-1-b (0) | Fragmentos de roca, grava y arena |

Fuente: Elaboración propia

Análisis para suelos A-1

En las gráficas de compactación se ve que cuando el contenido de humedad aumenta gradualmente aumenta la densidad seca para la rama seca y para la rama húmeda ocurre lo contrario y el contenido de humedad donde se alcanza la densidad máxima seca se denomina el contenido de humedad óptimo que está alrededor de 7,5%, el contenido de humedad para alcanzar el 95% de la densidad seca está en el rango de 4,5-10,5%.

Del C.B.R. en laboratorio podemos ver que mientras aumenta la energía de compactación el peso unitario seco también aumenta lo cual se verifica según la figura del efecto de la energía de compactación del autor Das, B. M., (1998) aumentando un 15 % en porcentaje del valor de C.B.R., para el subgrupo A-1-a y 11% para el subgrupo A-1-b, por otro lado se puede decir que la expansión es mayor del lado seco del óptimo esto se debe a que al lado seco tienen mayor deficiencia de agua y por lo tanto tienen mayor tendencia a absorber agua y de este modo hincharse más según la gráfica del autor (Juárez & Badillo, 1973), con lo cual se evidencia que para la menor energía de compactación la cual es a 12 golpes la expansión es mayor a la de 56 golpes, esto es reflejado en todos los grupos de suelos, de la curva de esfuerzo deformación se toman valores para 0.1" y 0.2" de

penetración, la cual a mayor resistencia del suelo mayor es la carga requerida para penetrar dicha muestra de suelo tanto en laboratorio como in situ, para el subgrupo A-1-a alcanza un valor de 2300Kg para penetrar 0,5" y para subgrupo A-1-b alcanza un valor de 1600kg para penetrar 0,5".

De la densidad in situ podemos ver que a medida que aumenta la densidad aumenta el C.B.R. in situ para todos los grupos de suelos, también se puede establecer el grado de compactación relacionando la densidad en campo con la densidad máxima de laboratorio, se realizan estas pruebas para control del proyecto para ver que las especificaciones sean alcanzadas por el contratista. Para el punto 20 subgrupo A-1-a se tiene un grado de compactación de 85,84% y para el subgrupo A-1-b un máximo de 90% en el punto 27. Según el autor Valle Rodas (1976). de la tabla compactación y tipo de pavimento para suelos A-1 nos da las siguientes afirmaciones:

- Comportamiento del terreno después de compactado: Excelente, estable en tiempo seco y húmedo.
- Equipo recomendado para la compactación: Rodillos “pata de cabra” y aplanadoras.
- Fallas que se registran comúnmente: Ninguna.
- Tipo de pavimento recomendado: Debidamente compactado, solo requiere superficie de desgaste, aplicaciones superficiales de mezclas bituminosas dan buenos resultados.

4.3 Análisis de caracterización de los suelos A-2

Tabla 4.4 Límites de Atterberg y clasificación SUCS para suelos A-2

| Suelos A-2 | | | | | |
|------------|----------------------|-------|-------|------|---------------------------|
| Punto | Límites de Atterberg | | | SUCS | Descripción |
| | LL | LP | IP | | |
| 28 | 24,38 | 16,79 | 7,59 | GC | Grava arcillosa |
| 25 | 32,01 | 20,4 | 11,61 | GC | Grava arcillosa con arena |

Fuente: Elaboración propia

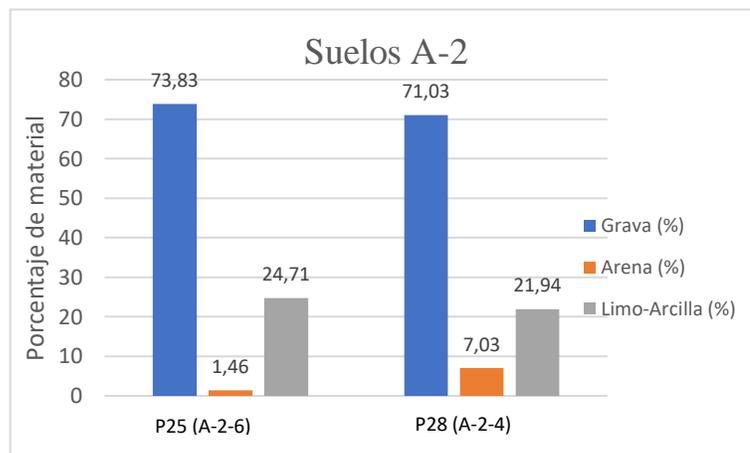
4.3.1 Cantidad de material para suelos A-2

Tabla 4.5 Porcentajes de material para suelos A-2

| Punto | Grava (%) | Arena (%) | Limo-Arcilla (%) |
|-------|-----------|-----------|------------------|
| 25 | 73,83 | 1,46 | 24,71 |
| 28 | 71,03 | 7,03 | 21,94 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.2 Porcentajes de material para suelos A-2



Fuente: Elaboración propia

Análisis de la gráfica para suelos A-2

De igual manera para estos suelos la cantidad de gravas es significativa con 73,83%, arenas un 7.03% y arcillas o limos de 24,71% como valores máximos.

De manera que disminuye la cantidad de grava, aumenta la cantidad de arenas y disminuye la cantidad de (arcilla y limos) consideradamente, la variación de cantidad de gravas y arcilla y limos no sufre mucho cambio en relación a la variación de la arena que es mayor, el cual se da de la siguiente manera: gravas 2,8% arenas 5,57%, arcillas o limos de 2,77%, también son mezclas mal proporcionadas de grava, arena, (limo y arcilla), tienen material fino (limo y arcilla) en exceso, tienen un índice de plasticidad mayor al grupo A-1 y como material para subrasante es bueno.

4.4 Análisis de las propiedades mecánicas de los suelos A-2.

Tabla 4.6 Humedad natural, compactación, C.B.R. (lab.), densidad (in situ), C.B.R. (in situ), clasificación AASHTO para suelos A-2

| Suelos A-2 | | | | | | | | | |
|------------|------------|-----------|----------|-------------|-----------|-------------|----------------|----------------------|----------------------------------|
| Punto | H. Natural | H. Óptima | pd. Máx. | C.B.R. Lab. | | pd. In Situ | C.B.R. In Situ | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | | | | 100% | 95% | | | | |
| 28 | 6,96 | 8,51 | 2,04 | 28,8 5 | 26,4 7 | 1,89 | 3,87 | A-2-4 (0) | Grava y arena arcillosa o limosa |
| 25 | 5,41 | 10,63 | 2,03 | 26,1 8 | 22,8 8 | 1,45 | 3,07 | A-2-6 (0) | Grava y arena arcillosa o limosa |

Fuente: Elaboración propia

Análisis para suelos A-2

El contenido de humedad óptimo que está alrededor de 9,5% y el contenido de humedad para alcanzar el 95% de la densidad seca está en el rango de 5-13%, en la rama seca y rama húmeda respectivamente.

Del C.B.R. en laboratorio podemos ver que mientras aumenta la energía de compactación el peso unitario seco aumenta un 8% para el subgrupo A-2-4 y 7% para el subgrupo A-2-6. Para el subgrupo A-2-4 alcanza un valor de 860Kg para penetrar 0,5" y para subgrupo A-2-6 alcanza un valor de 730kg para penetrar 0,5" frente a los de C.B.R. in situ de 73kg y 49 kg respectivamente.

De la densidad in situ podemos ver para el punto 28 del subgrupo A-2-4 se tiene un grado de compactación de 92,84% y para el punto 25 del subgrupo A-2-6 un máximo de 71,38%. Según el autor Valle Rodas (1976). de la tabla compactación y tipo de pavimento para suelos A-2 nos da las siguientes afirmaciones:

- Comportamiento del terreno después de compactado: Bueno a excelente, estable en tiempo seco a veces polvoriento se reblandece cuando está húmedo.
- Equipo recomendado para la compactación: Rodillos “pata de cabra”, aplanadoras.
- Fallas que se registran comúnmente: Se reblandece cuando está húmedo, se vuelve suelto y polvoriento cuando está seco.

- Procedimientos aconsejables para mejorar el terreno: Si el terreno presenta cambios perjudiciales de volumen, capilaridad o elasticidad, añádase arena o piedra triturada en proporciones convenientes, mejórese el drenaje del suelo añadiendo material granular.
- Tipo de pavimento recomendado: Si el terreno ha sido mejorado se comportará como A-1. En caso contrario, empléese pavimentos delgados de concreto o pavimentos flexibles de espesor regular.

4.5 Análisis de caracterización de los suelos A-3

Tabla 4.7 Límites de Atterberg y clasificación SUCS para suelos A-3

| Suelos A-3 | | | | | |
|------------|----------------------|----|----|-------|-----------------------------|
| Punto | Límites de Atterberg | | | SUSC | Descripción |
| | LL | LP | IP | | |
| 19 | No plástico | | | SP-SM | Arena mal graduada con limo |

Fuente: Elaboración propia

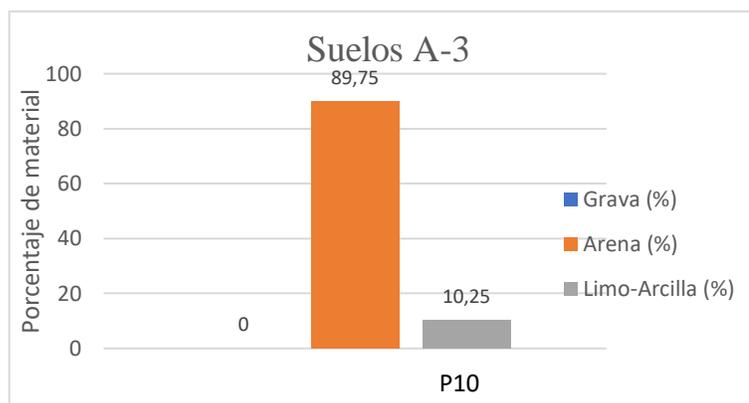
4.5.1 Cantidad de material para suelos A-3

Tabla 4.8 Porcentajes de material para suelos A-3

| Punto | Grava (%) | Arena (%) | Limo-Arcilla (%) |
|-------|-----------|-----------|------------------|
| 19 | 0 | 89,75 | 10,25 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.3 Porcentajes de material para suelos A-3



Fuente: Elaboración propia

Análisis de la gráfica para suelos A-3

Para este suelo tiene un alto contenido de 89.75% de arena frente a un 10.25% de arcilla o limo.

Arenas finas mal gradada, sin finos de arcilla, limo o con una pequeña cantidad de limo no plástico, bueno a regular como uso para subrasantes, según el autor Valle Rodas (1976).

4.6 Análisis de las propiedades mecánicas de los suelos A-3

Tabla 4.9 Humedad natural, compactación, C.B.R. (lab.), densidad (in situ), C.B.R. (in situ), clasificación AASHTO para suelos A-3

| Suelos A-3 | | | | | | | | | |
|------------|------------|-----------|----------|-------------|-------|-------------|----------------|----------------------|-------------|
| Punto | H. Natural | H. Óptima | ρd. Máx. | C.B.R. Lab. | | ρd. In Situ | C.B.R. In Situ | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | | | | 100% | 95% | | | | |
| 19 | 4,15 | 9,86 | 1,68 | 23,41 | 21,51 | 1,65 | 3,99 | A-3 (0) | Arena fina |

Fuente: Elaboración propia

Análisis para suelos A-3

El contenido de humedad óptimo que está alrededor de 10% y el contenido de humedad para alcanzar el 95% de la densidad seca está en el rango de 7-12%, en la rama seca y rama húmeda respectivamente.

Del C.B.R. podemos ver que mientras aumenta la energía de compactación el peso unitario seco aumenta un 6%. Alcanza un valor de 700Kg para penetrar 0,5", frente a los de C.B.R. in situ de 81kg.

De la densidad in situ podemos ver un grado de compactación de 98%. Según el autor (Valle Rodas, 1976). de la tabla compactación y tipo de pavimento para suelos A-3 nos da las siguientes afirmaciones:

- Comportamiento del terreno después de compactado: Malo a pésimo. Bueno a excelente, es más estable bajo condiciones de humedad.
- Equipo recomendado para la compactación: Aplanadora tándem, de 3 rodillos y con rodillo de caucho.
- Fallas que se registran comúnmente: Inestable cuando seco, tiende a deslizarse cuando no está confinado.
- Procedimientos aconsejables para mejorar el terreno: Añádase arcilla si se desea aumentar su poder ligante, procure que el material se encuentre debidamente confinado a fin de que no se deslice bajo la acción de las cargas aplicadas.
- Tipo de pavimento recomendado: Lo mismo para el caso anterior del suelo A-2.

4.7 Análisis de caracterización de los suelos A-4

Tabla 4.10 Límites de Atterberg y clasificación SUCS para suelos A-4

| Suelos A-4 | | | | | |
|------------|----------------------|-------|------|-------|------------------------------------|
| Punto | Límites de Atterberg | | | SUCS | Descripción |
| | LL | LP | IP | | |
| 1 | 28,18 | 20,59 | 7,60 | CL-ML | Arcilla limosa |
| 8 | 29,7 | 26,54 | 3,15 | ML | Limo de baja plasticidad con arena |
| 11 | 22,99 | 20,00 | 2,99 | ML | Limo de baja plasticidad arenoso |
| 13 | 24,81 | 21,91 | 2,91 | ML | Limo de baja plasticidad |
| 14 | 39,21 | 32,48 | 6,73 | ML | Limo de baja plasticidad |
| 15 | 27,39 | 24,86 | 2,53 | ML | Limo de baja plasticidad arenoso |
| 16 | 25,89 | 19,33 | 6,56 | CL-ML | Arcilla limosa |
| 17 | 22,16 | 14,74 | 7,42 | CL-ML | Arcilla limosa arenosa |
| 18 | 40,37 | 32,22 | 8,15 | ML | Limo de baja plasticidad |
| 21 | 32,67 | 24,06 | 8,61 | ML | Limo de baja plasticidad |
| 22 | 32,77 | 23,73 | 9,04 | ML | Limo de baja plasticidad con arena |
| 26 | 38,97 | 35,64 | 3,33 | OL | Limo de baja plasticidad |
| 30 | 28,26 | 24,14 | 4,13 | OL | Limo de baja plasticidad con arena |

Fuente: Elaboración propia

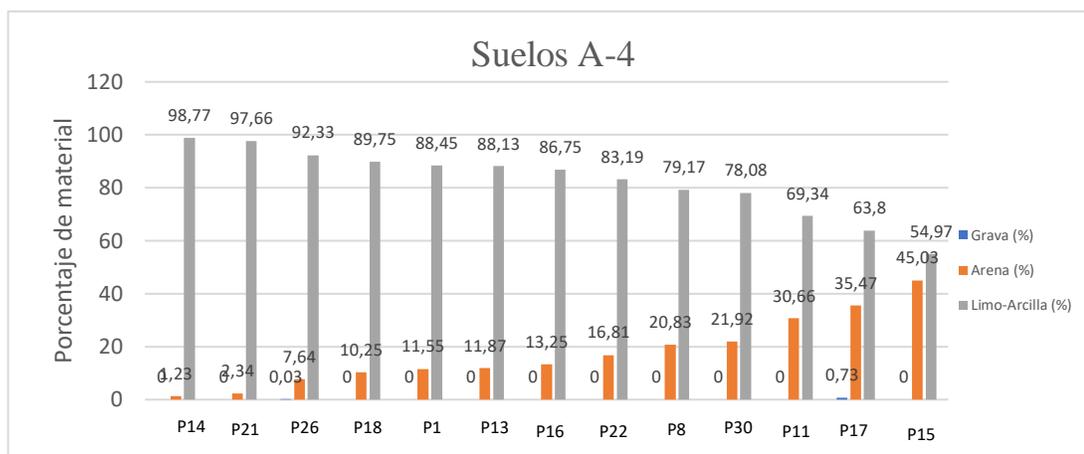
4.7.1 Cantidad de material para suelos A-4

Tabla 4.11 Porcentajes de material para suelos A-4

| Punto | Grava (%) | Arena (%) | Limo-Arcilla (%) |
|-------|-----------|-----------|------------------|
| 14 | 0 | 1,23 | 98,77 |
| 21 | 0 | 2,34 | 97,66 |
| 26 | 0,03 | 7,64 | 92,33 |
| 18 | 0 | 10,25 | 89,75 |
| 1 | 0 | 11,55 | 88,45 |
| 13 | 0 | 11,87 | 88,13 |
| 16 | 0 | 13,25 | 86,75 |
| 22 | 0 | 16,81 | 83,19 |
| 8 | 0 | 20,83 | 79,17 |
| 30 | 0 | 21,92 | 78,08 |
| 11 | 0 | 30,66 | 69,34 |
| 17 | 0,73 | 35,47 | 63,8 |
| 15 | 0 | 45,03 | 54,97 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.4 Porcentajes de material para suelos A-4



Fuente: Elaboración propia

Análisis de la gráfica para suelos A-4

Se observa que hay significativa cantidad de suelos con presencia de (arcilla y limo) con valores máximos de 98,77% y cantidades mínimas de arena de 1,23%, también existen valores de (arcilla y limo) de 54,97% con 45,03% de arena en el punto 15.

De manera que disminuye la cantidad de (arcilla y limo) aumenta la cantidad de arena ambos varían de igual manera, son suelos limosos poco plásticos según el autor Valle Rodas (1976). Normalmente tienen un 75% o más de material fino que pasa el tamiz N°200. Como material de subrasante son malos a regular.

El punto 14 es el que sufre más variación con 98,77% de arcilla o limo frente a 1,23% de arena y el de menos variación es el punto 15 con 54,97% de arcilla o limo frente a 45,03% de arena.

4.8 Análisis de las propiedades mecánicas de los suelos A-4

Tabla 4.12 Humedad natural, compactación, C.B.R. (lab.), densidad (in situ), C.B.R. (in situ), clasificación AASHTO para suelos A-4

| Suelos A-4 | | | | | | | | | |
|------------|------------|-----------|----------|-------------|------|-------------|----------------|----------------------|--------------|
| Punto | H. Natural | H. Óptima | pd. Máx. | C.B.R. Lab. | | pd. In Situ | C.B.R. In Situ | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | | | | 100% | 95% | | | | |
| 1 | 6,87 | 11,76 | 1,94 | 9,25 | 6,53 | 1,29 | 2,97 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 8 | 7,90 | 12,13 | 1,96 | 9,66 | 7,93 | 1,54 | 3,87 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 11 | 7,64 | 11,94 | 1,95 | 8,70 | 5,69 | 1,63 | 2,61 | A-4 (7) | Suelo limoso |
| 13 | 9,91 | 13,06 | 1,84 | 9,45 | 6,92 | 1,59 | 2,97 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 14 | 11,58 | 13,02 | 1,84 | 8,36 | 5,79 | 1,82 | 3,59 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 15 | 6,81 | 11,57 | 1,96 | 7,77 | 5,78 | 1,82 | 3,25 | A-4 (4) | Suelo limoso |
| 16 | 12,39 | 11,04 | 1,93 | 8,53 | 6,53 | 1,59 | 2,36 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 17 | 5,69 | 11,60 | 1,93 | 8,47 | 6,32 | 1,43 | 2,18 | A-4 (6) | Suelo limoso |
| 18 | 10,97 | 13,05 | 1,83 | 7,64 | 6,03 | 1,46 | 2,82 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 21 | 16,60 | 12,85 | 1,77 | 6,92 | 5,87 | 1,32 | 2,24 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 22 | 11,45 | 11,59 | 1,88 | 8,41 | 7,58 | 1,49 | 2,33 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 26 | 15,39 | 13,88 | 1,83 | 7,98 | 6,63 | 1,50 | 3,05 | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 30 | 8,73 | 11,83 | 1,95 | 6,66 | 6,02 | 1,47 | 2,88 | A-4 (8) | Suelo limoso |

Fuente: Elaboración propia

Análisis para suelos A-4.

El contenido de humedad óptimo que está alrededor de 12,5% y el contenido de humedad para alcanzar el 95% de la densidad seca está en el rango de 8-17%, en la rama seca y rama húmeda respectivamente.

Del C.B.R. podemos ver que mientras aumenta la energía de compactación el peso unitario seco aumenta un 3 a 4%. Alcanza un valor de 150 a 300 Kg para penetrar 0,5", frente a los de C.B.R. in situ de 50 a 95kg.

De la densidad in situ podemos ver un grado de compactación que desde 65 a 80%. Según el autor Valle Rodas (1976). de la tabla compactación y tipo de pavimento para suelos A-4 nos da las siguientes afirmaciones:

- Comportamiento del terreno después de compactado: Regular cuando está seco e inestable cuando esté húmedo.

- Equipo recomendado para la compactación son Rodillos “pata de cabra”, aplanadora tándem de 3 rodillos y con rodillo de caucho.
- Fallas que se registran comúnmente: Absorbe agua rápidamente perdiendo estabilidad, susceptible de reaccione y deslaves en épocas de lluvias, durante las heladas aumentan de volumen, rajando los pavimentos construidos sobre ellos.
- Procedimientos aconsejables para mejorar el terreno: Colocar drenes para drenar las aguas subterráneas y material granular debajo de la subrasante.
- Tipo de pavimento recomendado: Si hay drenaje adecuado puede construirse pavimentos de concreto o de asfalto de espesor regular. Si el drenaje no es bueno deberá emplearse pavimentos de concreto de buen espesor.

4.9 Análisis de caracterización de los suelos A-5

Tabla 4.13 Límites de Atterberg y clasificación SUCS para suelos A-5

| Suelos A-5 | | | | | |
|------------|----------------------|-------|-------|------|--------------------------|
| Punto | Límites de Atterberg | | | SUSC | Descripción |
| | LL | LP | IP | | |
| 10 | 56,74 | 49,71 | 7,034 | MH | Limo de alta plasticidad |

Fuente: Elaboración propia

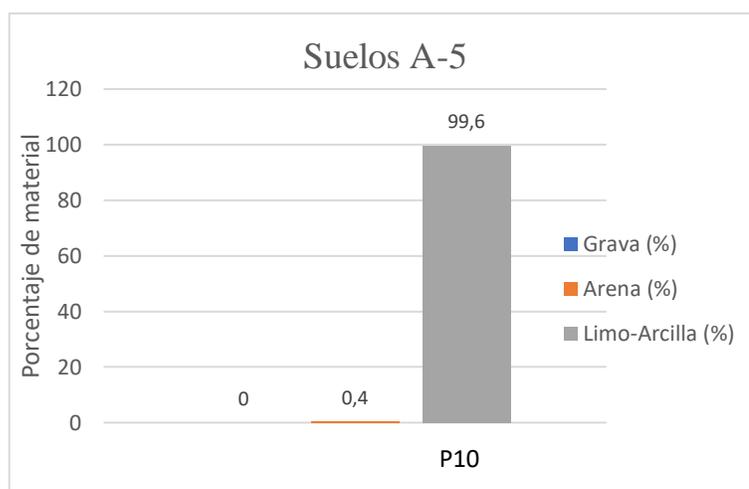
4.9.1 Cantidad de material para suelos A-5

Tabla 4.14 Porcentajes de material para suelos A-5

| Punto | Grava (%) | Arena (%) | Limo-Arcilla (%) |
|-------|-----------|-----------|------------------|
| 10 | 0 | 0,4 | 99,6 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.5 Porcentajes de material para suelos A-5



Fuente: Elaboración propia

Análisis de la gráfica para suelos A-5

Para este suelo tiene un alto contenido de arcilla o limo con un 99,6% frente a un 0,4% de arena.

Material limoso parecido al A-4 pero tiene mayor índice de plasticidad y como material para subrasante son malos a pésimo según el autor Valle Rodas (1976).

4.10 Análisis de las propiedades mecánicas de los suelos A-5

Tabla 4.15 Humedad natural, compactación, C.B.R. (lab.), densidad (in situ), C.B.R. (in situ), clasificación AASHTO para suelos A-5

| Suelos A-5 | | | | | | | | | |
|------------|------------|-----------|----------|-------------|------|-------------|----------------|----------------------|--------------|
| Punto | H. Natural | H. Óptima | pd. Máx. | C.B.R. Lab. | | pd. In Situ | C.B.R. In Situ | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | | | | 100% | 95% | | | | |
| 10 | 11,25 | 12,63 | 1,77 | 6,72 | 6,22 | 1,62 | 3,13 | A-5 (11) | Suelo limoso |

Fuente: Elaboración propia

Análisis para suelos A-5

El contenido de humedad óptimo que está alrededor de 12% y el contenido de humedad para alcanzar el 95% de la densidad seca está en el rango de 8-16%, en la rama seca y rama húmeda respectivamente.

Del C.B.R. podemos ver que mientras aumenta la energía de compactación el peso unitario seco aumenta un 3%. Alcanza un valor de 110Kg para penetrar 0,5", frente a los de C.B.R. in situ de 67kg.

De la densidad in situ podemos ver un grado de compactación de 91%. Según el autor (Valle Rodas, 1976). de la tabla compactación y tipo de pavimento para suelos A-5 nos da las siguientes afirmaciones:

- Comportamiento del terreno después de compactado: Malo a pésimo.
- Equipo recomendado para la compactación: Rodillos “pata de cabra”, aplanadora tándem, de 3 rodillos y con rodillo de caucho.
- Fallas que se registran comúnmente: Semejante al grupo A-4. Presenta, además, una estabilidad perjudicial que impide una buena compactación.
- Procedimientos aconsejables para mejorar el terreno: Colóquese drenes para drenar las aguas subterráneas y material granular debajo de la subrasante.
- Tipo de pavimento recomendado: Si hay drenaje adecuado y el suelo ha sido estabilizado puede emplearse una superficie bituminosa. En caso contrario, deberá emplearse pavimentos de concreto sobre base granular.

4.11 Análisis de caracterización de los suelos A-6

Tabla 4.16 Límites de Atterberg y clasificación SUCS para suelos A-6

| Suelos A-6 | | | | | |
|------------|----------------------|-------|-------|------|--|
| Punto | Límites de Atterberg | | | SUCS | Descripción |
| | LL | LP | IP | | |
| 4 | 28,93 | 18,52 | 10,41 | CL | Arcilla de baja plasticidad con arena |
| 7 | 35,18 | 17,30 | 17,88 | CL | Arcilla de media plasticidad con arena |
| 12 | 29,45 | 13,68 | 15,77 | CL | Arcilla de baja plasticidad |
| 23 | 28,71 | 18,30 | 10,41 | CL | Arcilla de baja plasticidad |
| 24 | 24,19 | 13,23 | 11,0 | CL | Arcilla de baja plasticidad arenosa |

Fuente: Elaboración propia

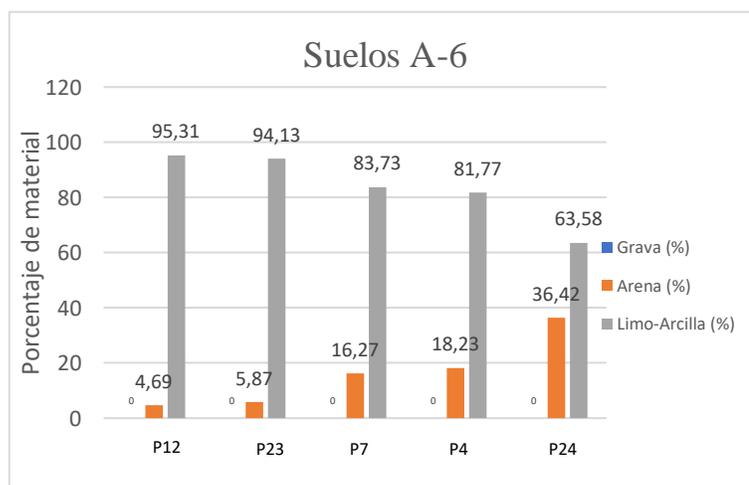
4.11.1 Cantidad de material para suelos A-6

Tabla 4.17 Porcentajes de material para suelos A-6

| Punto | Grava (%) | Arena (%) | Limo-Arcilla (%) |
|-------|-----------|-----------|------------------|
| 12 | 0 | 4,69 | 95,31 |
| 23 | 0 | 5,87 | 94,13 |
| 7 | 0 | 16,27 | 83,73 |
| 4 | 0 | 18,23 | 81,77 |
| 24 | 0 | 36,42 | 63,58 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.6 Porcentajes de material para suelos A-6



Fuente: Elaboración propia

Análisis de la gráfica para suelos A-6

En este tipo de suelos solo existe la variación de arena y (arcilla y limo) con un valor máximo de arcilla o limo de 95,31% y arena de 36,42%.

De manera que disminuye el contenido de arcilla y limos aumenta el contenido de arena de manera regular, son arcillas plásticas en las cuales el 75% o más pasan el tamiz N°200, además que contienen hasta un 36% de arena, como terrenos de subrasante son regulares.

El punto 12 es el que más varía con 95,31% de arcilla o limo frente a 4,69% de arena, sin embargo, el que menos variación tiene es el punto 24 con 63,58% frente a 36,42% de arena.

4.12 Análisis de las propiedades mecánicas de los suelos A-6

Tabla 4.18 Humedad natural, compactación, C.B.R. (lab.), densidad (in situ), C.B.R. (in situ), clasificación AASHTO para suelos A-6

| Punto | H. Natural | H. Óptima | ρd. Máx. | C.B.R. Lab. | | ρd. In Situ | C.B.R. In Situ | Clasificación AASHTO | Descripción |
|-------|------------|-----------|----------|-------------|------|-------------|----------------|----------------------|-----------------|
| | | | | 100% | 95% | | | | |
| | | | | 4 | 9,40 | | | | |
| 7 | 9,66 | 11,60 | 1,91 | 6,53 | 5,93 | 1,45 | 2,67 | A-6 (11) | Suelo arcilloso |
| 12 | 6,03 | 11,76 | 1,95 | 6,92 | 6,10 | 1,63 | 3,93 | A-6 (10) | Suelo arcilloso |
| 23 | 8,13 | 11,97 | 1,95 | 6,49 | 5,80 | 1,33 | 2,48 | A-6 (8) | Suelo arcilloso |
| 24 | 7,285 | 11,65 | 1,91 | 6,35 | 5,51 | 1,31 | 2,08 | A-6 (6) | Suelo arcilloso |

Fuente: Elaboración propia

Análisis para suelos A-6

El contenido de humedad óptimo que está alrededor de 11,7% y el contenido de humedad para alcanzar el 95% de la densidad seca está en el rango de 8-16%, en la rama seca y rama húmeda respectivamente.

Del C.B.R. podemos ver que mientras aumenta la energía de compactación el peso unitario seco aumenta de 2 a 2,5%. Alcanza un valor de 125 a 175 Kg para penetrar 0,5", frente a los de C.B.R. in situ de 50 a 100kg.

De la densidad in situ podemos ver un grado de compactación de 65 a 80%. Según el autor Valle Rodas (1976). de la tabla compactación y tipo de pavimento para suelos A-6 nos da las siguientes afirmaciones:

- Comportamiento del terreno después de compactado: Regular a bueno cuando seco. Malo cuando lluvioso.
- Equipo recomendado para la compactación: Rodillos “pata de cabra”, aplanadora tándem, de 3 rodillos y con rodillo de caucho.
- Fallas que se registran comúnmente: En época de lluvias se pone resbaladizo y los pavimentos fallan por falta de base firme, cuando se humedece o se seca, sufre hinchamiento y contracciones perjudiciales.
- Procedimientos aconsejables para mejorar el terreno: Se recomienda la adición de material granular y, además, un buen sistema de drenaje.
- Tipo de pavimento recomendado: Si hay drenaje adecuado y el suelo ha sido estabilizado, puede colocarse un pavimento bituminoso. En caso contrario es preferible emplear pavimentos de concreto sobre bases granulares.

4.13 Análisis de caracterización de los suelos A-7

Tabla 4.19 Límites de Atterberg y clasificación SUCS para suelos A-7

| Suelos A-7 | | | | | |
|------------|----------------------|-------|-------|------|------------------------------|
| Punto | Límites de Atterberg | | | SUSC | Descripción |
| | LL | LP | IP | | |
| 2 | 47,22 | 18,71 | 28,51 | CL | Arcilla de media plasticidad |
| 3 | 44,9 | 21,21 | 23,69 | CL | Arcilla de media plasticidad |
| 5 | 46,5 | 25,40 | 21,10 | CL | Arcilla de media plasticidad |
| 6 | 50,13 | 24,85 | 25,28 | CH | Arcilla de alta plasticidad |
| 9 | 41,21 | 29,92 | 11,29 | ML | Limo de baja plasticidad |

Fuente: Elaboración propia

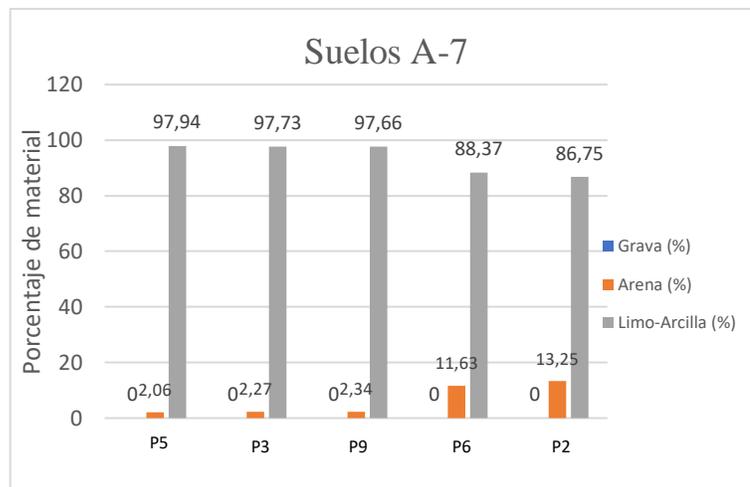
4.13.1 Cantidad de material para suelos A-7

Tabla 4.20 Porcentajes de material para suelos A-7

| Punto | Grava (%) | Arena (%) | Limo-Arcilla (%) |
|-------|-----------|-----------|------------------|
| 5 | 0 | 2,06 | 97,94 |
| 3 | 0 | 2,27 | 97,73 |
| 9 | 0 | 2,34 | 97,66 |
| 6 | 0 | 11,63 | 88,37 |
| 2 | 0 | 13,25 | 86,75 |

Fuente: Elaboración propia

Figura 4.7 Porcentajes de material para suelos A-7



Fuente: Elaboración propia

Análisis de la gráfica para suelos A-7.

Para este tipo de suelos la variación es más amplia predominan las arcillas con un valor máximo de 97,94% frente a 13,25% de arenas.

De manera que disminuye el contenido de arcilla aumenta el contenido de arena, pero mantienen una amplia diferencia, son parecidos a los A-6, pero con límites líquidos elevados como los del grupo A-5, los del subgrupo A-7-5 con índices de plasticidad

relativamente bajos en relación a sus límites líquidos y los del subgrupo A-7-6 con índices de plasticidad elevados en relación a sus límites líquidos.

El suelo que tiene más variación es el punto 5 con 97,97% de arcilla o limo frente a 2,06% de arena y el punto 2 es el que menos variación tiene con 86,75% de arcilla o limo frente a 13,25% de arena observando una amplia diferencia.

4.14 Análisis de las propiedades mecánicas de los suelos A-7

Tabla 4.21 Humedad natural, compactación, C.B.R. (lab.), densidad (in situ), C.B.R. (in situ), clasificación AASHTO para suelos A-7

| Suelos A-7 | | | | | | | | | |
|------------|------------|-----------|----------|-------------|------|-------------|----------------|----------------------|-----------------|
| Punto | H. Natural | H. Óptima | ρd. Máx. | C.B.R. Lab. | | ρd. In Situ | C.B.R. In Situ | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | | | | 100% | 95% | | | | |
| 2 | 13,89 | 14,92 | 1,77 | 5,52 | 4,89 | 1,46 | 2,94 | A-7-6 (17) | Suelo arcilloso |
| 3 | 10,55 | 13,78 | 1,78 | 5,54 | 5,20 | 1,39 | 3,05 | A-7-6 (15) | Suelo arcilloso |
| 5 | 12,90 | 12,85 | 1,85 | 5,49 | 4,78 | 1,32 | 2,82 | A-7-6 (14) | Suelo arcilloso |
| 6 | 17,70 | 13,04 | 1,86 | 5,70 | 5,25 | 1,80 | 3,10 | A-7-6 (16) | Suelo arcilloso |
| 9 | 8,60 | 11,25 | 1,85 | 6,03 | 5,27 | 1,79 | 3,28 | A-7-5 (9) | Suelo arcilloso |

Fuente: Elaboración propia

Análisis para suelos A-7

El contenido de humedad óptimo que está alrededor de 13,10% y el contenido de humedad para alcanzar el 95% de la densidad seca está en el rango de 8-18%, en la rama seca y rama húmeda respectivamente.

Del C.B.R. podemos ver que mientras aumenta la energía de compactación el peso unitario seco aumenta de 1 a 1,5%. Alcanza un valor de 120 a 150 Kg para penetrar 0,5", frente a los de C.B.R. in situ de 50 a 65kg.

De la densidad in situ podemos ver un grado de compactación de 80 a 95%. Según el autor Valle Rodas (1976). de la tabla compactación y tipo de pavimento para suelos A-7 nos da las siguientes afirmaciones:

- Comportamiento del terreno después de compactado: Regular a bueno cuando seco, malo cuando lluvioso.
- Equipo recomendado para la compactación: Rodillos “pata de cabra”, aplanadora tándem, de 3 rodillos y con rodillo de caucho.
- Fallas que se registran comúnmente: Los mismos inconvenientes que el A-6. Presenta, además, una elasticidad perjudicial que impide una buena compactación.
- Procedimientos aconsejables para mejorar el terreno: Se recomienda procedimientos análogos a los indicados para el terreno formado por material A-6.
- Tipo de pavimento recomendado: Si hay drenaje adecuado y el suelo ha sido estabilizado, puede colocarse un pavimento bituminoso. En caso contrario es preferible emplear pavimentos de concreto sobre bases granulares.

4.15 Evaluación del C.B.R. in situ y de laboratorio.

La evaluación de la presente investigación se obtiene a través de realizar ensayos de laboratorio y de campo, del cual se toma datos para el análisis en los 30 puntos ensayados en el Distrito 12 que es el área de estudio.

En el caso de los equipos utilizados, fueron sometidos a la supervisión de auxiliares de laboratorio quienes observaron y recomendaron mejoras y optimizaciones para la obtención de los resultados lo más precisos posibles. Las técnicas empleadas permitieron realizar el análisis de fiabilidad correspondiente dando la validez de los resultados que se consiguieron.

Los resultados obtenidos corresponden al estudio del Distrito 12, pudiendo generalizarse a lo largo del distrito, es decir no solo a los puntos localizados sino así también a zonas donde presentan los mismos tipos de suelos debido a la similitud de características que presentan los suelos.

Por otro lado, no es certero afirmar que estos resultados puedan ser aplicados a suelos que hayan sido modificados es decir hayan sido compactados o removidos afectando el suelo

natural, por más que conserven el mismo tipo de suelo debido a que sus características de resistencia serán diferentes.

Lo que si podría generalizarse es la metodología empleada en la investigación, ya que las herramientas y los equipos empleados cumplen la función de evaluar a detalle y recopilar la información necesaria sobre la evaluación de la capacidad soporte de las subrasantes, las relaciones existentes entre variables del mismo tipo de suelo.

Dentro de las limitaciones que existieron en el desarrollo de esta investigación, se puede citar a la más importantes: factor climático como ser la lluvia que dificulta realizar los ensayos y la toma de muestras en campo por lo que no se pudo realizar los ensayos se tuvo que esperar unos días para continuar con los ensayos.

A través de los resultados plasmados en el presente análisis, se observa que los suelos granulares presentan una buena calidad para subrasantes sin embargo los suelos finos van de pobres a regulares como material de subrasante, los suelos granulares no compactados también presentan C.B.R. in situ bajos.

Es necesario analizar punto por punto, de modo que se observe los comportamientos de los suelos frente a cambios de contenido de humedad y a efectos de compactación por los constantes cambios que sufre los suelos al pasar de un estado a otro.

Dentro de los resultados obtenidos, es importante resaltar que la mayoría de ellos son similares de acuerdo al mismo grupo de suelo, desarrolladas en diferentes puntos del distrito 12. La similitud está basada en las características de granulometría, límites de consistencia y valores de C.B.R. tanto in situ como en laboratorio.

Sin embargo, son dos las diferencias más grandes entre las investigaciones realizadas en subrasantes ya consolidadas o conformadas para una carretera y a la presente que es en suelos naturales no compactados ni tratados con algún tratamiento superficial, la otra diferencia es entre los valores de C.B.R. en laboratorio en suelos granulares aumenta de gran consideración a los finos, pero en C.B.R. in situ mantienen valores bajos casi similares a suelos finos.

En cuanto a la primera diferencia la brecha es bastante amplia porque suelos compactados presentan valores de C.B.R. in situ altos a diferencia de los que analizamos en la presente investigación. Mientras que en la segunda se refiere a que suelos granulares que no presenten la humedad óptima, la uniformidad de tamaños de partículas y la energía de compactación sus valores de C.B.R. son bajos.

En el presente análisis también se presentan las relaciones en porcentaje que existen entre C.B.R. en laboratorio vs in situ obteniendo este valor para conocer el estado de la subrasante, existen diferentes relaciones en cada punto no se puede generalizar porque las características mecánicas son modificadas para realizar el ensayo de C.B.R. en laboratorio la misma muestra de suelo es sometida a una energía de compactación a una humedad óptima lo que hace que sea este factor que los mismos no conserven relaciones directas.

4.15.1 Barrio San Blas.

Tabla 4.22 Tabla comparativa entre C.B.R. (Lab.), C.B.R. (in situ) y clasificación general

| Barrio San Blas | | | | | | | |
|------------------------|--------------------|------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Punto | C.B.R. Lab. | | Clasificación General | C.B.R. In Situ | Clasificación General | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | 100% | 95% | | | | | |
| 1 | 9,25 | 6,53 | Regular | 2,97 | Muy pobre | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 2 | 5,52 | 4,89 | Muy pobre a regular | 2,94 | Muy pobre | A-7-6 (17) | Suelo arcilloso |
| 3 | 5,54 | 5,20 | Muy pobre a regular | 3,05 | Muy pobre a regular | A-7-6 (15) | Suelo arcilloso |
| 4 | 7,04 | 5,25 | Regular | 2,70 | Muy pobre | A-6 (8) | Suelo arcilloso |
| 5 | 5,49 | 4,78 | Muy pobre a regular | 2,82 | Muy pobre | A-7-6 (14) | Suelo arcilloso |
| 6 | 5,70 | 5,25 | Muy pobre a regular | 3,10 | Muy pobre a regular | A-7-6 (16) | Suelo arcilloso |
| 7 | 6,53 | 5,93 | Muy pobre a regular | 2,67 | Muy pobre | A-6 (11) | Suelo arcilloso |
| 8 | 9,66 | 7,93 | Regular | 3,87 | Muy pobre a regular | A-4 (8) | Suelo limoso |

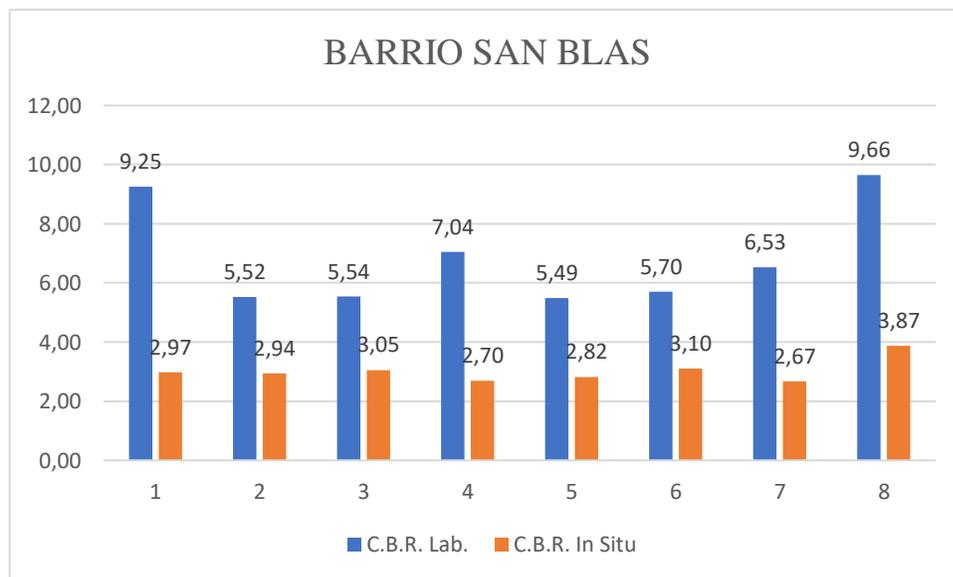
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.23 Valores referenciales de C.B.R., usos y suelos.

| C.B.R. | Clasificación general | Usos | Sistema de Clasificación | |
|--------|-----------------------|----------------|--------------------------|-------------------------|
| | | | UNIFICADO | AASHTO |
| 0-3 | Muy pobre | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A5, A6, A7 |
| 3-7 | Muy pobre a regular | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A4, A5, A6, A7 |
| 7-20 | Regular | Subbase | OL, CL, ML, SC, SM, SP | A2, A4, A6, A7 |
| 20-50 | Bueno | Subbase y base | GM, GC, SW, SM, SP, GP | A-1-b, A-2-5, A-3, A2-6 |
| >50 | Excelente | Base | GW, GM | A-1-a, A-2-4, A-3 |

Fuente: Joseph E. Bowles, 1981

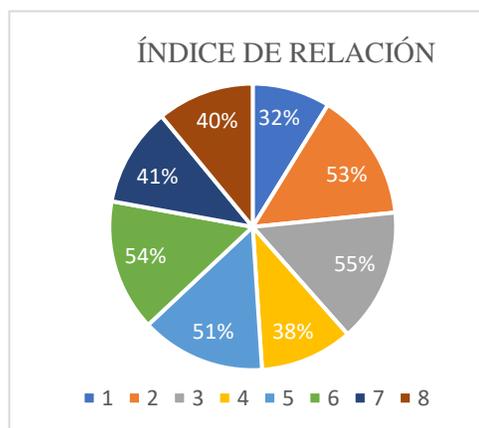
Figura 4.8 Porcentaje de C.B.R. (Lab) y C.B.R. (in situ) para suelos del barrio San Blas



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.24 Índice de relación de C.B.R. (Lab.) frente a C.B.R. (in situ)

| Punto | C.B.R. Lab. | | C.B.R. In Situ | Índice de relación |
|-------|-------------|------|----------------|--------------------|
| | 100% | 95% | | |
| 1 | 9,25 | 6,53 | 2,97 | 32% |
| 2 | 5,52 | 4,89 | 2,94 | 53% |
| 3 | 5,54 | 5,20 | 3,05 | 55% |
| 4 | 7,04 | 5,25 | 2,70 | 38% |
| 5 | 5,49 | 4,78 | 2,82 | 51% |
| 6 | 5,70 | 5,25 | 3,10 | 54% |
| 7 | 6,53 | 5,93 | 2,67 | 41% |
| 8 | 9,66 | 7,93 | 3,87 | 40% |



Fuente: Elaboración propia

Análisis del barrio San Blas

Para este barrio presenta suelos finos, A-4, A-6 y A-7, para C.B.R. de laboratorio los valores están entre un rango de 5 a 10%, según la tabla de Joseph E. Bowles, 1981, se clasifican de pobre a regular, para C.B.R. in situ los valores están entre un rango de 2 a 4%, se clasifican de muy pobre a regular.

En el punto 8 un suelo A-4(8), presenta el mayor C.B.R. de laboratorio con un valor de 9.66% y el menor valor presenta el punto 5 un suelo A-7-6(14), con un valor de 5.49% y para los valores de C.B.R. in situ no existe mucha variación entre un punto y otro.

La relación en porcentaje de C.B.R. (Laboratorio) frente a C.B.R. (in situ) está entre el rango de 32 a 55% es decir que el C.B.R. (in situ) se encuentra en esos porcentajes en relación al 100% del C.B.R. de laboratorio.

El índice de relación entre C.B.R. (in situ) frente a C.B.R. (Laboratorio), está de acuerdo a las propiedades y características físicas y mecánicas del suelo los suelos A-4 son suelos limosos poco o nada plásticos, su comportamiento después de compactado es regular cuando esta seco e inestable cuando está húmedo absorben agua rápidamente, los suelos A-6 son semejantes a los A-7 son arcillas plásticas, su comportamiento después de compactado son regulares cuando están secos y malos cuando están húmedos, presentan una elasticidad perjudicial que impide un buena compactación por lo que presenta valores

de C.B.R. in situ bajos por no estar a una humedad óptima tampoco a una densidad máxima como el caso de los C.B.R. en laboratorio están a humedad óptima y a una densidad máxima.

4.15.2 Barrio Miraflores.

Tabla 4.25 Tabla comparativa entre C.B.R. (Lab.), C.B.R. (in situ) y clasificación general

| BARRIO MIRAFLORES | | | | | | | |
|-------------------|-------------|------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------|
| Punto | C.B.R. Lab. | | Clasificación General | C.B.R. In Situ | Clasificación General | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | 100% | 95% | | | | | |
| 9 | 6,03 | 5,27 | Muy pobre a regular | 3,28 | Muy pobre a regular | A-7-5 (9) | Suelo arcilloso |
| 10 | 6,72 | 6,22 | Muy pobre a regular | 3,13 | Muy pobre a regular | A-5 (11) | Suelo limoso |
| 11 | 8,70 | 5,69 | regular | 2,61 | Muy pobre | A-4 (7) | Suelo limoso |
| 12 | 6,92 | 6,10 | Muy pobre a regular | 3,93 | Muy pobre a regular | A-6 (10) | Suelo arcilloso |
| 13 | 9,45 | 6,92 | Regular | 2,97 | Muy pobre | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 14 | 8,36 | 5,79 | Regular | 3,59 | Muy pobre a regular | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 15 | 7,77 | 5,78 | Regular | 3,25 | Muy pobre a regular | A-4 (4) | Suelo limoso |

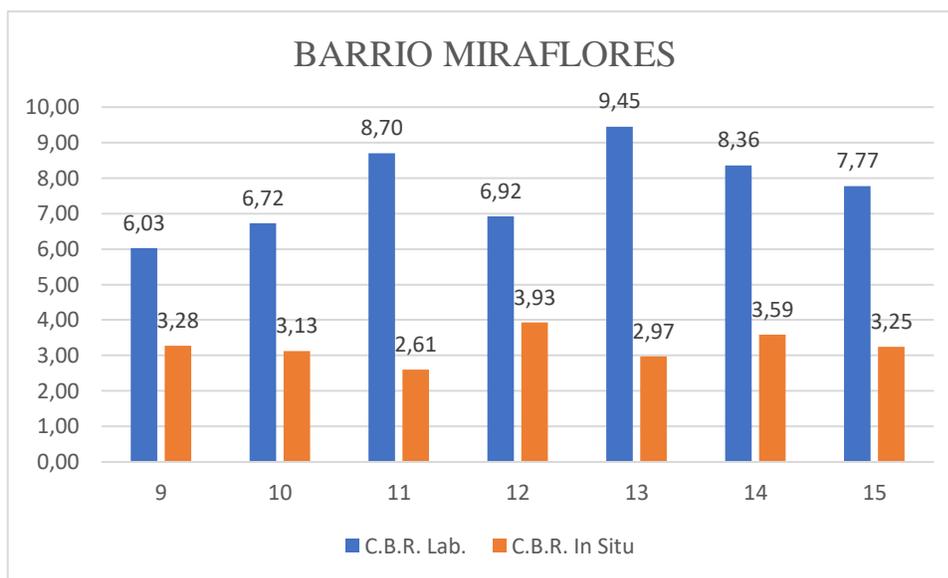
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.26 Valores referenciales de C.B.R., usos y suelos.

| C.B.R. | Clasificación general | Usos | Sistema de Clasificación | |
|--------|-----------------------|----------------|--------------------------|-----------------------|
| | | | UNIFICADO | AASHTO |
| 0-3 | Muy pobre | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A5, A6, A7 |
| 3-7 | Muy pobre a regular | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A4, A5, A6, A7 |
| 7-20 | Regular | Subbase | OL, CL, ML, SC, SM, SP | A2, A4, A6, A7 |
| 20-50 | Bueno | Subbase y base | GM, GC, SW, SM, SP, GP | A-1b, A2-5, A-3, A2-6 |
| >50 | Excelente | Base | GW, GM | A-1-a, A2-4, A-3 |

Fuente: Joseph E. Bowles, 1981

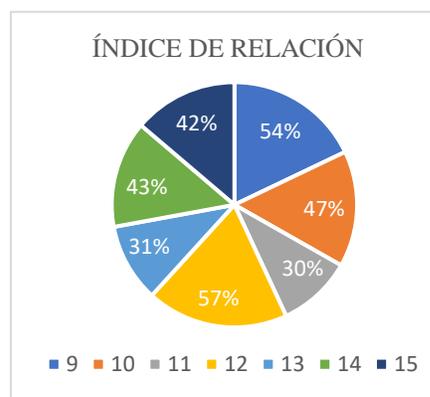
Figura 4.9 Porcentaje de C.B.R. (Lab) y C.B.R. (in situ) para suelos del barrio Miraflores



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.27 Índice de relación de C.B.R. (Lab.) frente a C.B.R. (in situ)

| C.B.R. Lab. | | C.B.R. In Situ | Índice de relación |
|-------------|------|----------------|--------------------|
| 100% | 95% | | |
| 6,03 | 5,27 | 3,28 | 54% |
| 6,72 | 6,22 | 3,13 | 47% |
| 8,70 | 5,69 | 2,61 | 30% |
| 6,92 | 6,10 | 3,93 | 57% |
| 9,45 | 6,92 | 2,97 | 31% |
| 8,36 | 5,79 | 3,59 | 43% |
| 7,77 | 5,78 | 3,25 | 42% |



Fuente: Elaboración propia

Análisis del barrio Miraflores.

Para este barrio presenta suelos finos, A-4, A-5 y A-7, para C.B.R. de laboratorio los valores están entre un rango de 6 a 10%, según la tabla de Joseph E. Bowles, 1981, se clasifican de pobre a regular, para C.B.R. in situ los valores están entre un rango de 2 a 4%, se clasifican de muy pobre a regular.

En el punto 13 un suelo A-4(8), presenta el mayor C.B.R. de laboratorio con un valor de 9.45% y el menor valor presenta el punto 9 un suelo A-7-5(9), con un valor de 6.03% y para los valores de C.B.R. in situ no existe mucha variación entre un punto y otro.

La relación en porcentaje de C.B.R. (Laboratorio) frente a C.B.R. (in situ) está entre el rango de 31 a 57% es decir que el C.B.R. (in situ) se encuentra en esos porcentajes en relación al 100% del C.B.R. de laboratorio.

El índice de relación entre C.B.R. (in situ) frente a C.B.R. (Laboratorio), está de acuerdo a las propiedades y características físicas y mecánicas del suelo los suelos A-4 son suelos limosos poco o nada plásticos, su comportamiento después de compactado es regular cuando esta seco e inestable cuando está húmedo absorben agua rápidamente, los suelos A-5 semejantes a los A-4 son suelos limosos, su comportamiento después de compactados son malos a pésimos, los suelos A-7 son arcillas plásticas, su comportamiento después de compactado son regulares cuando están secos y malos cuando están húmedos, presentan una elasticidad perjudicial que impide un buena compactación por lo que presenta valores de C.B.R. in situ bajos por no estar a una humedad óptima tampoco a una densidad máxima como el caso de los C.B.R. en laboratorio están a humedad óptima y a una densidad máxima.

4.15.3 Barrio German Busch.

Tabla 4.28 Tabla comparativa entre C.B.R. (Lab.), C.B.R. (in situ) y clasificación general

| Barrio German Busch | | | | | | | |
|----------------------------|--------------------|------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| Punto | C.B.R. Lab. | | Clasificación General | C.B.R. In Situ | Clasificación General | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | 100% | 95% | | | | | |
| 16 | 8,53 | 6,53 | Regular | 2,36 | Muy pobre | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 17 | 8,47 | 6,32 | Regular | 2,18 | Muy pobre | A-4 (6) | Suelo limoso |
| 18 | 7,64 | 6,03 | Regular | 2,82 | Muy pobre | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 19 | 23,41 | 21,51 | Bueno | 3,99 | Muy pobre a regular | A-3 (0) | Arena fina |

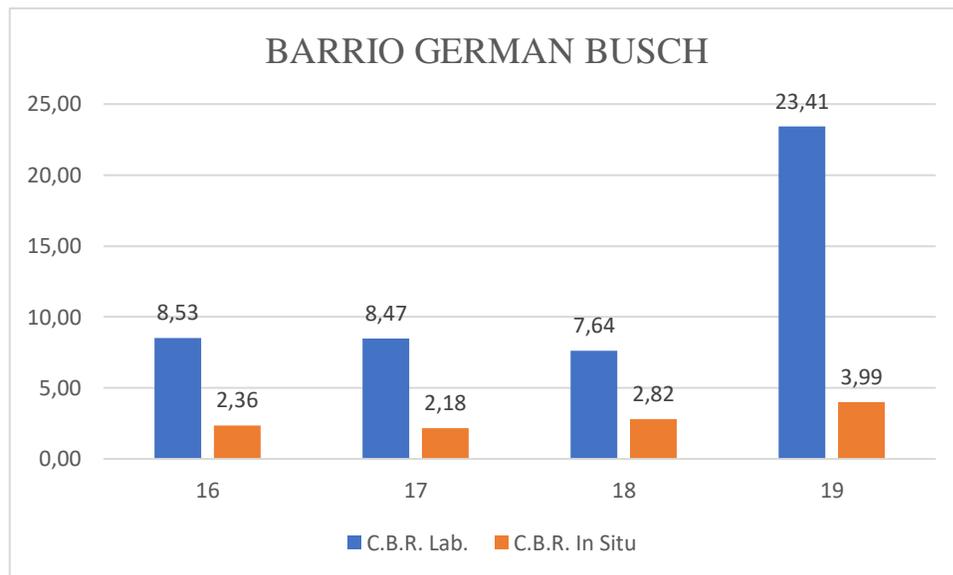
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.29 Valores referenciales de C.B.R., usos y suelos.

| C.B.R. | Clasificación general | Usos | Sistema de Clasificación | |
|--------|-----------------------|----------------|--------------------------|-----------------------|
| | | | UNIFICADO | AASHTO |
| 0-3 | Muy pobre | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A5, A6, A7 |
| 3-7 | Muy pobre a regular | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A4, A5, A6, A7 |
| 7-20 | Regular | Subbase | OL, CL, ML, SC, SM, SP | A2, A4, A6, A7 |
| 20-50 | Bueno | Subbase y base | GM, GC, SW, SM, SP, GP | A-1b, A2-5, A-3, A2-6 |
| >50 | Excelente | Base | GW, GM | A-1a, A2-4, A-3 |

Fuente: Joseph E. Bowles, 1981

Figura 4.10 Porcentaje de C.B.R. (Lab) y C.B.R. (in situ) para suelos del barrio German Busch



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.30 Índice de relación de C.B.R. (Lab.) frente a C.B.R. (in situ)

| Punto | C.B.R. Lab. | | C.B.R. In Situ | Índice de relación |
|-------|-------------|-------|----------------|--------------------|
| | 100% | 95% | | |
| 16 | 8,53 | 6,53 | 2,36 | 28% |
| 17 | 8,47 | 6,32 | 2,18 | 26% |
| 18 | 7,64 | 6,03 | 2,82 | 37% |
| 19 | 23,41 | 21,51 | 3,99 | 17% |



Fuente: Elaboración propia

Análisis del barrio German Busch.

Para este barrio presenta suelos finos, A-3 y A-4, para C.B.R. de laboratorio los valores están entre un rango de 8 a 23%, según la tabla de Joseph E. Bowles, 1981, se clasifican de regular a bueno, para C.B.R. in situ los valores están entre un rango de 2 a 4%, se clasifican de muy pobre a regular.

En el punto 19 un suelo A-3(0), presenta el mayor C.B.R. de laboratorio con un valor de 23.41% y el menor valor presenta el punto 18 un suelo A-4(8), con un valor de 7.64% y para los valores de C.B.R. in situ no existe mucha variación entre un punto y otro.

La relación en porcentaje de C.B.R. (Laboratorio) frente a C.B.R. (in situ) está entre el rango de 17 a 37% es decir que el C.B.R. (in situ) se encuentra en esos porcentajes en relación al 100% del C.B.R. de laboratorio.

El índice de relación entre C.B.R. (in situ) frente a C.B.R. (Laboratorio), está de acuerdo a las propiedades y características físicas y mecánicas del suelo, los suelos A-3, son arenas finas con pequeñas cantidades de limo, su comportamiento después de compactado es bueno a excelente, los suelos A-4, son suelos limosos poco o nada plásticos, su comportamiento después de compactado es regular cuando está seco e inestable cuando está húmedo absorben agua rápidamente por lo que presenta valores de C.B.R. in situ bajos por no estar a una humedad óptima tampoco a una densidad máxima como el caso de los C.B.R. en laboratorio están a humedad óptima y a una densidad máxima.

4.15.4 Barrio San Martín.

Tabla 4.31 Tabla comparativa entre C.B.R. (Lab.), C.B.R. (in situ) y clasificación general

| Barrio San Martín | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------|------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Punto | C.B.R. Lab. | | Clasificación General | C.B.R. In Situ | Clasificación General | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | 100% | 95% | | | | | |
| 20 | 54,70 | 47,33 | Excelente | 3,31 | Muy pobre a regular | A-1-a (0) | Fragmentos de piedra, grava y arena |
| 21 | 6,92 | 5,87 | Muy pobre a regular | 2,24 | Muy pobre | A-4 (8) | Suelo limoso |

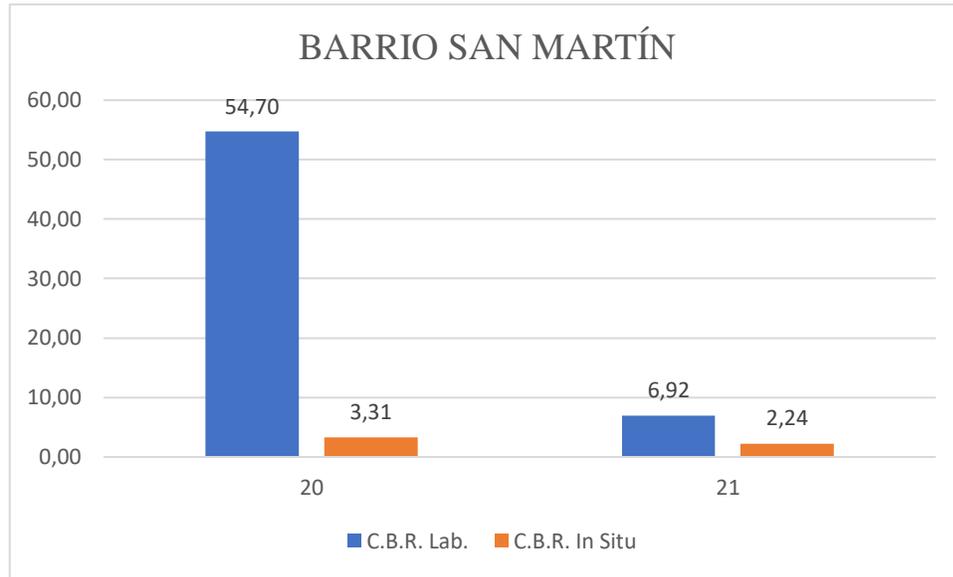
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.32 Valores referenciales de C.B.R., usos y suelos.

| C.B.R. | Clasificación general | Usos | Sistema de Clasificación | |
|---------------|------------------------------|----------------|---------------------------------|-----------------------|
| | | | UNIFICADO | AASHTO |
| 0-3 | Muy pobre | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A5, A6, A7 |
| 3-7 | Muy pobre a regular | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A4, A5, A6, A7 |
| 7-20 | Regular | Subbase | OL, CL, ML, SC, SM, SP | A2, A4, A6, A7 |
| 20-50 | Bueno | Subbase y base | GM, GC, SW, SM, SP, GP | A-1b, A2-5, A-3, A2-6 |
| >50 | Excelente | Base | GW, GM | A-1a, A2-4, A-3 |

Fuente: Joseph E. Bowles, 1981

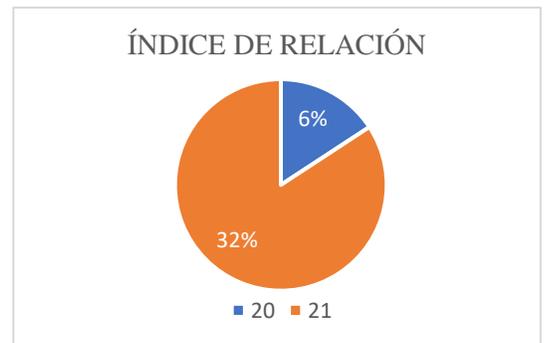
Figura 4.11 Porcentaje de C.B.R. (Lab) y C.B.R. (in situ) para suelos del barrio San Martín



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.33 Índice de relación de C.B.R. (Lab.) frente a C.B.R. (in situ)

| Punto | C.B.R. Lab. | | C.B.R. In Situ | Índice de relación |
|-------|-------------|-------|----------------|--------------------|
| | 100% | 95% | | |
| 20 | 54,70 | 47,33 | 3,31 | 6% |
| 21 | 6,92 | 5,87 | 2,24 | 32% |



Fuente: Elaboración propia

Análisis del barrio San Martín.

Para este barrio presenta suelo fino y granular, A-4 y A-1, según la tabla de Joseph E. Bowles, 1981, para C.B.R. in situ los valores están entre un rango de 2 a 4%, se clasifican de muy pobre a regular.

En el punto 20 un suelo A-1-a(0), presenta C.B.R. de laboratorio con un valor de 54.70% y el menor valor presenta el punto 21 un suelo A-4(8), con un valor de 6.92% y para los valores de C.B.R. in situ no existe mucha variación entre un punto y otro.

La relación en porcentaje de C.B.R. (Laboratorio) frente a C.B.R. (in situ) está entre el rango de 6 a 32% es decir que el C.B.R. (in situ) se encuentra en esos porcentajes en relación al 100% del C.B.R. de laboratorio.

El índice de relación entre C.B.R. (in situ) frente a C.B.R. (Laboratorio), está de acuerdo a las propiedades y características físicas y mecánicas del suelo, los suelos A-4, son suelos limosos poco o nada plásticos, su comportamiento después de compactado es regular cuando esta seco e inestable cuando está húmedo absorben agua rápidamente, los suelos A-1-a, son fragmentos de roca o grava con poco material fino, su comportamiento después de compactado es excelente, estable en seco y húmedo sin embargo presenta valores de C.B.R. in situ bajos por no estar a una humedad óptima tampoco a una densidad máxima y no tener un adecuado acomodo de las partículas como el caso de los C.B.R. en laboratorio están a humedad óptima y a una densidad máxima.

4.15.5 Barrio Aranjuez.

Tabla 4.34 Tabla comparativa entre C.B.R. (Lab.), C.B.R. (in situ) y clasificación general

| Barrio Aranjuez | | | | | | | |
|-----------------|-------------|-------|-----------------------|----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|
| Punto | C.B.R. Lab. | | Clasificación General | C.B.R. In Situ | Clasificación General | Clasificación AASHTO | Descripción |
| | 100% | 95% | | | | | |
| 22 | 8,41 | 7,58 | Regular | 2,33 | Muy pobre | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 23 | 6,49 | 5,80 | Muy pobre a regular | 2,48 | Muy pobre | A-6 (8) | Suelo arcilloso |
| 24 | 6,35 | 5,51 | Muy pobre a regular | 2,08 | Muy pobre | A-6 (6) | Suelo arcilloso |
| 25 | 26,18 | 22,88 | Bueno | 3,07 | Muy pobre a regular | A-2-6 (0) | Grava y arena arcillosa o limosa |
| 26 | 7,98 | 6,63 | Regular | 3,05 | Muy pobre a regular | A-4 (8) | Suelo limoso |
| 27 | 45,79 | 41,15 | Bueno | 4,05 | Muy pobre a regular | A-1-b (0) | Fragmentos de roca, grava y arena |
| 28 | 28,85 | 26,47 | Bueno | 3,87 | Muy pobre a regular | A-2-4 (0) | Grava y arena arcillosa o limosa |
| 29 | 44,61 | 41,65 | Bueno | 3,13 | Muy pobre a regular | A-1-b (0) | Fragmentos de roca, grava y arena |
| 30 | 6,66 | 6,02 | Muy pobre a regular | 2,88 | Muy pobre | A-4 (8) | Suelo limoso |

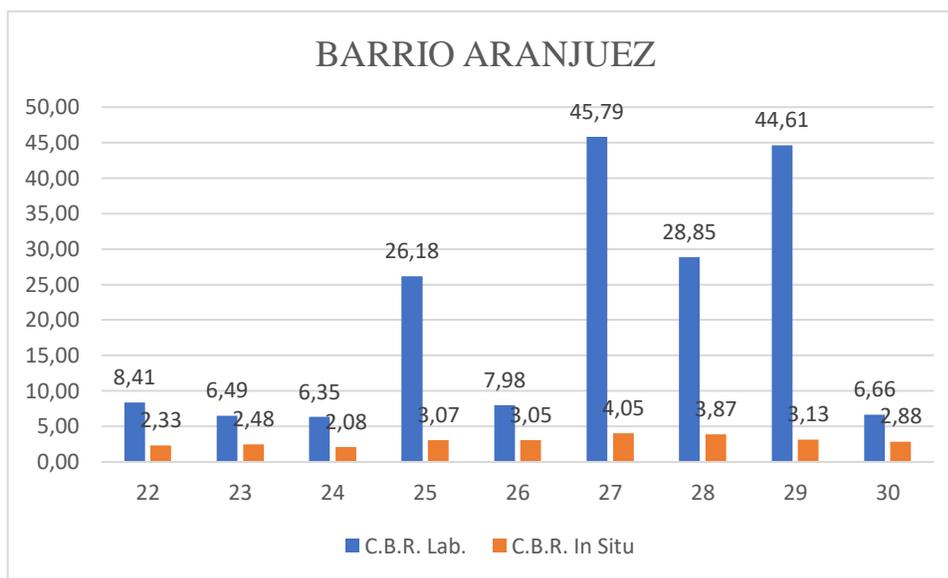
Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.35 Valores referenciales de C.B.R., usos y suelos.

| C.B.R. | Clasificación general | Usos | Sistema de Clasificación | |
|--------|-----------------------|----------------|--------------------------|-----------------------|
| | | | UNIFICADO | AASHTO |
| 0-3 | Muy pobre | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A5, A6, A7 |
| 3-7 | Muy pobre a regular | Subrasante | OH, CH, MH, OL | A4, A5, A6, A7 |
| 7-20 | Regular | Subbase | OL, CL, ML, SC, SM, SP | A2, A4, A6, A7 |
| 20-50 | Bueno | Subbase y base | GM, GC, SW, SM, SP, GP | A-1b, A2-5, A-3, A2-6 |
| >50 | Excelente | Base | GW, GM | A-1a, A2-4, A-3 |

Fuente: Joseph E. Bowles, 1981

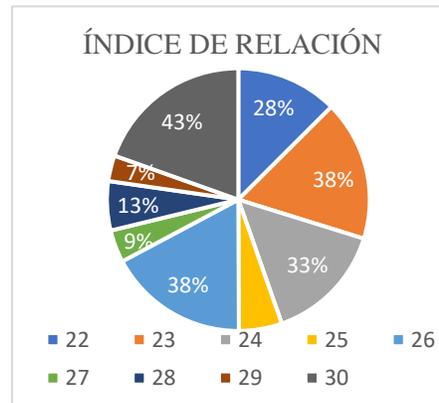
Figura 4.12 Porcentaje de C.B.R. (Lab) y C.B.R. (in situ) para suelos del barrio Aranjuez



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4.36 Índice de relación de C.B.R. (Lab.) frente a C.B.R. (in situ)

| Punto | C.B.R. Lab. | | C.B.R. In Situ | Índice de relación |
|-------|-------------|-------|----------------|--------------------|
| | 100% | 95% | | |
| 22 | 8,41 | 7,58 | 2,33 | 28% |
| 23 | 6,49 | 5,80 | 2,48 | 38% |
| 24 | 6,35 | 5,51 | 2,08 | 33% |
| 25 | 26,18 | 22,88 | 3,07 | 12% |
| 26 | 7,98 | 6,63 | 3,05 | 38% |
| 27 | 45,79 | 41,15 | 4,05 | 9% |
| 28 | 28,85 | 26,47 | 3,87 | 13% |
| 29 | 44,61 | 41,65 | 3,13 | 7% |
| 30 | 6,66 | 6,02 | 2,88 | 43% |



Fuente: Elaboración propia

Análisis del barrio Aranjuez.

Para este barrio presenta suelos finos y granulares, A-4, A-6, A-1 y A-2, según la tabla de Joseph E. Bowles (1981), para C.B.R. in situ los valores están entre un rango de 2 a 4%, se clasifican de muy pobre a regular.

En el punto 27 un suelo A-1-b(0), presenta C.B.R. de laboratorio con un valor de 45.79% y el menor valor presenta el punto 24 un suelo A-6(6), con un valor de 6.35% y para los valores de C.B.R. in situ no existe mucha variación entre un punto y otro.

La relación en porcentaje de C.B.R. (Laboratorio) frente a C.B.R. (in situ) está entre el rango de 7 a 43% es decir que el C.B.R. (in situ) se encuentra en esos porcentajes en relación al 100% del C.B.R. de laboratorio.

El índice de relación entre C.B.R. (in situ) frente a C.B.R. (Laboratorio), está de acuerdo a las propiedades y características físicas y mecánicas del suelo, los suelos A-4, son suelos limosos poco o nada plásticos, su comportamiento después de compactado es regular cuando esta seco e inestable cuando está húmedo absorben agua rápidamente, los suelos A-6 son arcillas plásticas, su comportamiento después de compactado son regulares cuando están secos y malos cuando están húmedos, presentan una elasticidad perjudicial que impide un buena compactación, los suelos A-1-b, son grava o arena gruesa con poco material fino, su comportamiento después de compactado es excelente, estable en seco y húmedo, los suelos A-2-4, son grava o arena gruesa además incluyen arena fina, su comportamiento después de compactado es bueno a excelente, estable en seco y húmedo, los suelos A-2-6, semejantes a los A-2-4 la fracción fina contienen arcilla, su comportamiento después de compactado es bueno a excelente, estable en seco y húmedo, sin embargo presenta valores de C.B.R. in situ bajos por no estar a una humedad óptima tampoco a una densidad máxima y no tener un adecuado acomodo de las partículas como el caso de los C.B.R. en laboratorio están a humedad óptima y a una densidad máxima.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En este proyecto de investigación luego de realizar los ensayos de laboratorio y campo para evaluar el índice de capacidad soporte del suelo in situ y en laboratorio, de las diferentes subrasantes del distrito 12 de la ciudad de Tarija, mediante un análisis de los ensayos realizados para obtener valores de C.B.R. in situ y de laboratorio, se presenta las siguientes conclusiones:

- De los ensayos de caracterización de suelos, de las diferentes subrasantes que componen el distrito 12, que en total son 30 puntos, el 20% son suelos granulares que van desde un A-1-a hasta A-3, que se encuentran ubicados en el barrio San Martín y barrio Aranjuez, y el 80% son finos que van desde un A-4 a un A-7 de los cuales el 55% son suelos A-4 que se encuentran distribuidos en todo el distrito 12, del total de finos el 50% son limos de baja plasticidad y algunos con presencia de arena y el resto en su gran mayoría arcillas de media y baja plasticidad y algunas con presencia de arena.

En los suelos granulares los contenidos de humedad natural van desde 4 a 7% y en los finos de 7 a 18%.

- En los ensayos de resistencia y deformación de los suelos: para los suelos granulares que conforman el 20% del total para una densidad máxima al 100% se alcanzó humedades óptimas de 7 a 11% y para el resto 80% que componen los suelos finos se alcanzó humedades óptimas de 11 a 15% mediante el ensayo de compactación método modificado T180.
- Del ensayo de C.B.R. en laboratorio al 100% a una humedad óptima para suelos granulares se alcanza valores de 26 a 55%, estos suelos se encuentran ubicados en el barrio san Martín y barrio Aranjuez y para los suelos finos va desde 5 a 10% los cuales están ubicados en el resto de barrios que componen el distrito 12.

- Se realizó los ensayos in situ tales como: densidad in situ con el cono de arena y C.B.R. in situ, las densidades in situ son menores a las densidades máximas de la curva de compactación, es decir que los grados de compactación del suelo in situ son menores al 100%, para los suelos granulares que conforman el 20% del total alcanza valores de 1.45 a 1.94 g/cm³ y para el resto 80 % de suelos finos alcanza valores de 1.29 a 1.82 g/cm³, estos valores también se ven reflejados en los valores de C.B.R. in situ. Es decir que los valores que proporciona el C.B.R. in situ van de acorde a las densidades in situ. Del ensayo de C.B.R. in situ a una humedad natural para suelos granulares se alcanza valores de 3.07 a 4.05%, estos suelos se encuentran ubicados en el barrio san Martín y barrio Aranjuez y para los suelos finos va desde 2.08 a 3.93% los cuales están ubicados en el resto de barrios que componen el distrito 12.
- De acuerdo a los resultados de los ensayos realizados haciendo una evaluación de los C.B.R. in situ y de laboratorio se puede afirmar que los C.B.R. in situ son menores a los C.B.R. en laboratorio y están en el orden de 0-5% clasificando como muy pobre para material de subrasante, debido a que los suelos de las subrasantes no están a una humedad óptima ni a su máxima compactación y también la distribución del tamaño de las partículas no es uniforme. Pero realizando una compactación en laboratorio a una humedad óptima aumentan su C.B.R. en gran magnitud para el caso de los suelos granulares, clasificando como muy buenos para subrasantes, como así también para los finos, pero en menor proporción clasificando como regular para usos de subrasantes.
- En la zona de estudio predominan los suelos limosos (ML) y suelos arcillosos (CL) con 66% de puntos, por lo que la mayor área del mapa se ve cubierta por este tipo de suelos. En la zona de estudio las humedades que más predominan están en el rango de 6-15%. Los C.B.R. in situ que mayor predominan alcanzan un valor de 2.86%, para los C.B.R. en laboratorio predomina valores alrededor de 8.29% y para las densidades in situ predominan valores alrededor de 1.54 g/cm³.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda hacer el uso de estos datos, para los siguientes grupos de suelos A-1-a, A-1-b, A-2-4, A-2-5, A-2-6, A-4, A-5, A-6, A-7-5 y A-7-6., como datos preliminares para una planificación ya sea de mejoramiento o cambio de material en las diferentes subrasantes que están dentro de este proyecto. Pero cabe mencionar que posiblemente exista algún tipo de variación con los resultados si se aplicaría a otras subrasantes fuera de los que conforman este proyecto.
- Realizar una buena recolección de información de proyectos o investigaciones para que el proyecto se encuentre debidamente sustentado.
- Asegúrese de realizar la toma y transporte de muestras de suelo, verificando y cumpliendo las especificaciones de cada método o ensayo que corresponde.
- Para obtener buenos resultados y minimizar los errores en cualquier investigación es necesario la correcta ejecución de los equipos que tiene la universidad tanto en laboratorio como para los de campo.
- Los resultados obtenidos en el mapa de características geotécnicas, brindan información de referencia de los suelos en los puntos analizados, sin embargo, es necesario realizar un adecuado estudio de suelos previo a la construcción de cualquier obra civil, el cual permita conocer las características físicas y mecánicas del suelo.
- Se recomienda reforzar los estudios geotécnicos con la finalidad de obtener mayor cantidad de puntos a analizar