

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.

“En el campo de trabajo, el ingeniero civil constantemente se enfrenta a diversos problemas surgidos por el tipo de suelo con el cual tratará, el suelo es lo que soportará el peso de una estructura, y si éste no cumple con ese objetivo, la estructura sufrirá problemas de agrietamiento, hundimientos y otros que también dañarán la obra realizada.

Pero el suelo no sólo es utilizado como base para soportar las cargas, sino también en taludes, como material para construcción de viviendas y como el enunciado de esta investigación lo dice analizar la conductividad hidráulica para el diseño de drenaje, la diversidad de usos que hoy en día se le da al suelo es el resultado de mucho tiempo de investigación.”¹

“En la presente investigación se analizará la conductividad hidráulica, que es un parámetro importante que va relacionando con el movimiento de agua a través suelos. Esta propiedad hidráulica debe conocerse si se quiere solucionar el problema de flujo. Existen diversos métodos para la estimación de la conductividad hidráulica en suelos a partir de su medición in situ y en laboratorio, en este caso se usa el método directo de carga variable (suelos finos) aplicando el permeámetro Guelph, este tipo de permeámetro mide la cantidad de agua que atraviesa una muestra de suelo. Es un instrumento de fácil manejo que permite medir in situ la conductividad hidráulica de una manera rápida y precisa, con lo cual se puede obtener una evaluación exacta en todo tipo de suelo que es necesario e indispensable para el diseño de drenaje en valores de permeabilidad, los cuales no se disponen en el medio siendo que en la actualidad se usa valores referenciales para diversos tipos de suelos, por lo tanto deben ser usada como referencia debido a la gran variación que puede presentar la permeabilidad de un suelo.

Se debe notar además, que muchos de los valores que se encuentran en la bibliografía no corresponden a valores reales obtenidos bajo las condiciones de nuestro medio, he aquí la importancia de la aplicación del Permeámetro Guelph. .”²

Por último es importante hacer notar que este equipo puede ser transportado armado y operado fácilmente por una persona, en lo que se traduce en la aplicación de ensayos de manera eficiente con un bajo costo en personal, obteniendo de esta manera valores de la permeabilidad en la subrasante de la Av. Libertad del barrio Fray Quebracho.

1.2. Justificación.

Siendo el agua un elemento fundamental para la vida, es así también la principal causante de los problemas en la ingeniería vial y una de las causas más relevantes del deterioro prematuro en las obras civiles.

Es por eso de vital importancia conocer la conductividad hidráulica (coeficiente de permeabilidad) en carreteras para los suelos a nivel de subrasante.

Ya que en nuestro país y particularmente en el Departamento de Tarija no se realiza estudios específicos con respecto a la permeabilidad (K), razón por la cual en la actualidad el valor de conductividad hidráulica (coeficiente de permeabilidad) es asumido de tablas de acuerdo al tipo de suelo, ante esta situación es una necesidad de vital importancia incorporar la determinación de la conductividad hidráulica (coeficiente de permeabilidad) mediante el uso del permeámetro Guelph, con el objeto de determinar valores reales de este coeficiente para obras ingenieriles a ser diseñada y posteriormente ejecutada.

¹ De Jesus Dominguez (2005) suelos y sus propiedades Universidad de Oriente San Miguel el Salvador Centro America. (s.f.). Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/315592826/Cohesion>

² GARZÓN, L. D. (2014). Modelo de la conductividad hidráulica Tesis de Magíster en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Bogotá D.C.

Además es importante recalcar la elaboración del manual de operación del “Permeámetro Guelph” mismo que será para la utilización y la aplicación de este instrumento ya que será de gran beneficio para los profesionales del medio, estudiantes de la carrera y por ende lograr el grado académico en licenciatura en la ingeniería civil.

1.3. Planteamiento del problema.

1.3.1 Situación problémica.

El agua indudablemente afecta el comportamiento de cualquier obra ingenieril, por lo que resulta esencial entender los principios básicos del flujo del agua a través del suelo.

El coeficiente de permeabilidad es una propiedad hidráulica que ha sido aplicada sin ninguna restricción en materiales de distinta granulometría y características físicas. Este coeficiente tiene una amplia acogida y viene siendo utilizada en diferentes ramas de la ingeniería.

La utilización del coeficiente de permeabilidad es de gran importancia ya que al no tener un estudio minucioso de sus características y propiedades físicas afectan directamente a la estabilidad de cualquier obra civil. Este parámetro puede ser calculado in situ o en el laboratorio. Sin embargo, el principal problema del cálculo de la permeabilidad en laboratorio es el tiempo que demanda la realización de este ensayo.

Las determinaciones que un ingeniero realiza a la aprobación de datos, mediante el ensayo del permeámetro Guelph que es un instrumento de fácil manejo que permite medir in situ la conductividad hidráulica de una manera rápida, precisa y permite obtener una evaluación exacta en todo tipo de suelo.

Como en la actualidad en el departamento de Tarija los diseños de carreteras no cuentan con un estudio específico de permeabilidad en subrasante, situación que denota la necesidad de realizar estudios mediante métodos in situ y de laboratorio que describe la norma de ensayo ASTM D 5084-90 para poder verificar y conocer los puntos de referencia reales que son bastante útiles en estudios de flujos en suelos.

Al disponer solo de valores proporcionados por bibliografías que no corresponden a valores de nuestro medio, hacemos un uso inadecuado del coeficiente de

permeabilidad, por ende puede afectar en el diseño, dando como resultado un mal dimensionamiento a las obras de arte menores como el drenaje.

1.3.2. Problema.

¿Cómo analizar la conductividad hidráulica mediante el permeámetro Guelph in situ con respecto al permeámetro en laboratorio, que me permitan determinar valores de permeabilidad en función a la variación de las densidades en la subrasante de la Av. Libertad del barrio Fray Quebracho, para realizar el diseño del drenaje subterráneo?

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo general.

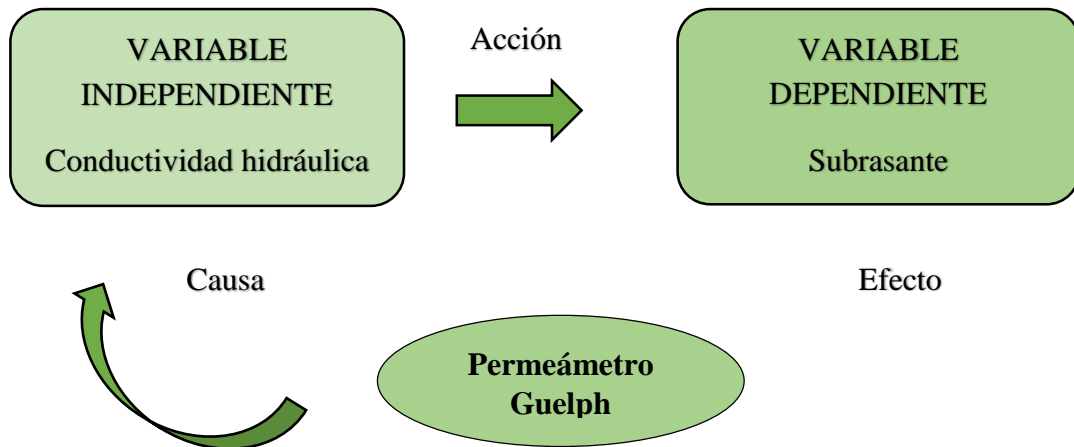
Realizar un análisis del comportamiento y variación de conductividad hidráulica a través de los resultados obtenidos mediante el uso del permeámetro Guelph aplicado en la subrasante de la Av. Libertad del barrio Fray Quebracho en la ciudad de Tarija.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Caracterización del suelo subrasante.
- Determinar la conductividad hidráulica con el Permeámetro Guelph in situ en la subrasante.
- Determinar la conductividad hidráulica en laboratorio con el permeámetro.
- Análisis comparativo de los resultados de la conductividad hidráulica obtenidos in situ y en laboratorio.
- Definir las principales ventajas del ensayo con el permeámetro Guelph respecto al permeámetro en laboratorio.
- Establecer una ecuación de correlación que permita determinar el valor de permeabilidad en función de su densidad.
- Diseño de drenaje subterráneo en función al grado de permeabilidad.
- Proponer un manual de uso y operación del permeámetro Guelph.

1.5. Definición de las variables.

Figura N° 1.1. Gráfica de variables



Fuente: Elaboración propia

1.5.1. Variable dependiente.

- La Conductividad Hidráulica.

1.5.2. Variable independiente

- Sub rasante de la subrasante de la Av. Libertad del barrio Fray Quebracho

1.6. Hipótesis.

A partir de resultados obtenidos mediante el permeámetro Guelph, podemos analizar valores de permeabilidad de manera rápida y confiable, mismos que reflejen valores reales en la subrasante de la Av. Libertad del barrio Fray Quebracho para el diseño de drenaje subterráneo.

1.7. Alcance.

De acuerdo a la disponibilidad del equipo del permeámetro Guelph con que cuenta la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho” para determinación de la conductividad hidráulica se tiene previsto aplicar los ensayos del mismo en la subrasante de la Av.

Libertad del barrio Fray Quebracho con el objetivo de alcanzar los valores adecuados de permeabilidad y así poder diseñar un drenaje subterráneo adecuados en función a valores reales de la conductividad hidráulica.

El alcance que se tiene previsto para esta investigación se anuncia a continuación:

- Recopilación y revisión bibliográfica de la documentación existente referente a la investigación.
- Determinación del marco teórico alcance de la investigación.
- Desarrollo de la investigación:
 - 1) Se realizará el análisis de la caracterización del tipo de suelo subrasante, mediante los siguientes ensayos:
 - Ensayo de granulometría de los suelos.
 - Ensayo para la calibración del frasco volumétrico (ASTM D854)
 - Ensayo de peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO)
 - Ensayo granulométrico por medio del hidrómetro (ASTM D422)
 - Ensayo de consistencia de los suelos (limites Atterberg).
 - Clasificación de los suelos mediante los dos métodos Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (S.U.C.S.) y Sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway).
 - 2) Ensayo de permeabilidad in situ:
 - Aplicar el permeámetro Guelph en la subrasante de la av. Libertad del barrio Fray Quebracho de la ciudad de Tarija.(Manual de operaciones del permeámetro Guelph)
 - 3) Ensayos para determinar la permeabilidad en laboratorio:
 - Contenido de humedad.
 - Ensayo de compactación (AASHTO T272).
 - Ensayo de densidad in situ método del cono de arena.

- Ensayo con el permeámetro de pared flexible (ASTMD 5084-90).
- Los valores obtenidos en estos ensayos son de gran importancia para caracterizar el tipo de suelo subrasante y proceder a determinar la conductividad hidráulica.
- Análisis comparativo los resultados de la conductividad hidráulica del Permeámetro Guelph in situ con los resultados del permeámetro de laboratorio para el diseño de drenaje subterráneo.
- Definir las principales ventajas del ensayo con el permeámetro Guelph respecto al permeámetro en laboratorio.
- Establecer una ecuación de correlación que permita determinar el valor de permeabilidad en función de su densidad.
- Por último se propondrá un manual en español para la correcta utilización del permeámetro Guelph.

1.8. Diseño metodológico.

1.8.1. Unidades de estudio

“La conductividad hidráulica en la Subrasante”

1.8.2. Población.

Subrasante de la av. Libertad del barrio Fray Quebracho.

1.8.3. Muestra.

Los ensayos tanto in situ como de laboratorio para diferentes progresivas de la zona en estudio.

1.8.4. Muestreo.

El muestreo será del tipo no probabilístico, para el presente trabajo se seleccionó el muestreo cada 500 metros.

1.9. Métodos y técnicas empleadas.

1.9.1. Métodos.

Los métodos para el presente trabajo son analítico, propositivo y comparativo.

Método analítico.

“Se define como aquél que distingue las partes de un todo y procede a la revisión ordenada de cada uno de los elementos por separado “Este método es útil cuando se llevan a cabo trabajos de investigación documental, que consiste en revisar en forma separada todo el acopio del material necesario para la investigación.

1.4.1.1. Método propositivo.

La investigación propositiva se caracteriza por generar conocimiento, a partir de la labor de cada uno de los integrantes de los grupos de investigación. Propende además por el desarrollo, el fortalecimiento y el mantenimiento de estos colectivos, con el fin de lograr altos niveles de productividad y alcanzar reconocimiento científico interno y externo. Así como las líneas de investigación de los grupos concuerdan con los ejes temáticos de la facultad, los proyectos que se desarrollan parten de ideas innovadoras enfocadas en forma inter y transdisciplinaria y de la necesidad de solucionar problemas pertinentes a nivel local y global.

1.4.1.2. Método comparativo.

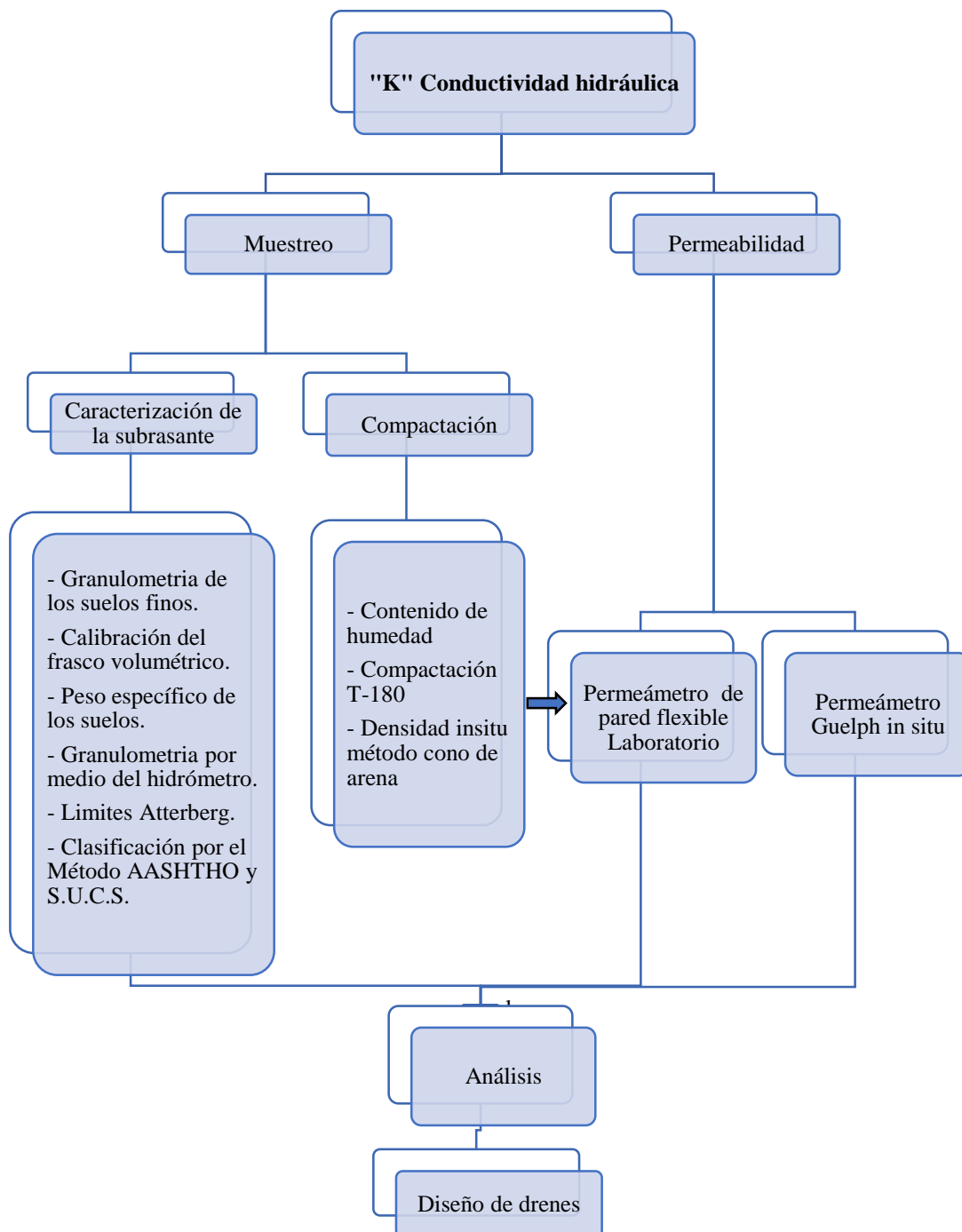
Es un procedimiento de búsqueda sistemática de similitudes léxicas y fonéticas en las lenguas con el objeto de estudiar su parentesco y eventualmente reconstruir la protolengua que dio lugar a las dos o más lenguas comparadas en el procedimiento.

Sólo tenemos una manera de demostrar que un fenómeno es causa de otro; es comparar los casos en que están simultáneamente presentes o ausentes y buscar si las variaciones que presentan en estas diferentes combinaciones de circunstancias prueban que uno depende del otro”³

³ Wilber K (2001) Concepto de metodología de la investigación. (s.f.). consulta el 1 de diciembre de 2016, de <http://metodologia02.blogspot.com/p/metodos-de-la-investigacion.html>

Esquema de actividades.

Figura N° 1.2. Gráfica de Actividades



Fuente: Elaboración propia

Definición de técnicas de muestreo.

Las técnicas son los procedimientos e instrumentos que utilizamos para acceder al conocimiento. Encuestas, entrevistas, observaciones y todo lo que se deriva de ellas.

Las técnicas usadas para la realización del trabajo son:

Figura N° 1.3. Técnicas de muestreo



Fuente: Elaboración propia

1.4.1.3. Descripción de los instrumentos para la obtención de datos.

1.4.1.4. Medios.

Para la obtención de datos se necesitara los siguientes equipos:

- **Permeámetro Guelph.**

“El permeámetro Guelph es un instrumento de fácil manejo que permite medir in situ la conductividad hidráulica de una manera rápida y precisa. Permite obtener una evaluación exacta en todo tipo de suelo de la conductividad hidráulica y capacidad de absorción del suelo, y la matriz de potencial del flujo. El permeámetro Guelph es un kit completo que consiste del permeámetro, un trípode de campo, un barreno de pozo, herramientas para la limpieza y preparación de la perforación, contenedor de agua plegable y bomba de mano para prueba de vacío, todo en un durable estuche de transporte. También hay accesorios adicionales disponibles para extender la capacidad de medición del permeámetro.”⁴

⁴Instruccion de operacion . (s.f.). obtenido de

http://www.academia.edu/5086545/guia_estudiantes_permeametro_de_guelph

Figura N° 1.4. Montaje del permeámetro Guelph



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 1.5. Estuche de transporte del permeámetro Guelph



Fuente: Elaboración propia

- **Barreno.**

El Barreno del Suelo mostrado en la figura N°1.6. Es utilizado para remover la tierra abultada. Taladre el suelo rotando la manija conforme a las agujas del reloj aplicando una presión hacia abajo en el manubrio.

Figura N° 1.6. Barreno



Fuente: Elaboración propia

- **Permeámetro de laboratorio.**

La principal ventaja del permeámetro de pared flexible, es que permite saturar los suelos finos y realizar el ensayo de conductividad hidráulica a un nivel controlado.

Figura N° 1.7. Permeámetro de pared flexible



Fuente: Elaboración propia

1.10. Estadística descriptiva

La Estadística descriptiva registra los datos en tablas y los representa en gráficos. Calcula los parámetros estadísticos (medidas de centralización, posición y de dispersión), que describen el conjunto estudiado. Es la rama de las matemáticas que recolecta, presenta y caracteriza un conjunto de datos.

Parámetros estadísticos

Es un número que se obtiene a partir de los datos de una distribución estadística.

Los parámetros estadísticos sirven para sintetizar la información dada por una tabla o por una gráfica.

Hay tres tipos parámetros estadísticos:

- De centralización.
- De posición.
- De dispersión.

Medidas de centralización.

Nos indican en torno a qué valor (centro) se distribuyen los datos.

Las medidas de centralización son:

- **Media aritmética.**

Media aritmética es el valor promedio de la distribución.

Ej. Datos los n números (x_1, x_2, \dots, x_n) , la media aritmética se define como:

Ec.1.1. Formulada la media aritmética.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Fuente: (, Erick Eduardo, 200)

- **Moda.**

La moda es el valor que más se repite en una distribución.

Figura N° 1.8. Cálculo de la moda.

<p>Hallar la moda de la distribución: 2, 3, 3, 4, 4, 4, 5, 5 $M_o = 4$</p>

Fuente: (, Erick Eduardo, 200)

Medias de dispersión.

Las medidas de dispersión nos informan sobre cuánto se alejan del centro los valores de la distribución.

Las medidas de dispersión son:

- **Rango o recorrido.**

El rango es la diferencia entre el mayor y el menor de los datos de una distribución estadística.

Figura N° 1.9. Cálculo del rango.

$Rango = DatoMayor - DatoMenor$

Fuente: (, Erick Eduardo, 200)

- **Desviación media.**

La desviación media es la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones respecto a la media.

EC. 1.2. Formula de la desviación media.

$D.M = \frac{\sum x - \bar{x} }{N}$

Fuente: (, Erick Eduardo, 200)

- **Varianza.**

La varianza es la media aritmética del cuadrado de las desviaciones respecto a la media.

EC.1.3. Formula de la varianza.

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 \right) - \bar{X}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i < j} (X_i - X_j)^2$$

Fuente: (, Erick Eduardo, 200)

Donde

X_i = cada dato

n: número de datos

\bar{x} : Media aritmética

CAPÍTULO II

FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Definición de suelo.

“El suelo está compuesto por minerales, materia orgánica, diminutos organismos vegetales y animales, aire y agua. Las plantas y animales que crecen y mueren dentro y sobre el suelo son descompuestos por los microorganismos, transformados en materia orgánica y mezclados con el suelo.

El tamaño de las partículas minerales que forman el suelo determina sus propiedades físicas: textura, estructura, porosidad y el color.

Según su textura podemos distinguir tres tipos de suelos: arena, arcilla y limo. La arena es la que existe en los diversos ríos. Los suelos arenosos, como son más sueltos son fáciles de trabajar pero tienen pocas reservas de nutrientes aprovechables por las plantas.

Los suelos limosos tienen granos de tamaño intermedio son fértiles y fáciles de trabajar. Forman terrones fáciles de desagregar cuando están secos.

La arcilla son partículas muy finas y forman barro cuando están saturadas de agua. Los suelos arcillosos son pesados, no drenan ni se desecan fácilmente y contienen buenas reservas de nutrientes. Son fértiles, pero difíciles de trabajar cuando están muy secos.”⁵

2.2. Propiedades físicas o mecánicas de los suelos.

- Textura
- Estructura
- Color
- Porosidad
- Permeabilidad

⁵Nara Coepisc.(9 de julio 2016). <http://minervasextoa.blogspot.com/2016/07/el-suelo-esta-compuesto-por-minerales.html>

- Drenaje

2.2.1. Textura.

“La textura indica el contenido relativo de partículas de diferente tamaño, como la arena, el limo y la arcilla en el suelo. La textura tiene que ver con la facilidad con que se puede trabajar el suelo, la cantidad de agua y aire que retiene y la velocidad con que el agua penetra en el suelo y lo atraviesa.

La textura del suelo puede clasificarse de fina a gruesa. La textura fina indica una elevada proporción de partículas más finas como el limo y la arcilla. La textura gruesa indica una elevada proporción de arena.

Tabla N° 2.1. Propiedades del suelo según su textura

Propiedad	Suelos Arenosos	Suelos Arcillosos	Suelo Franco
Permeabilidad	alta	nula	media
Capacidad de retención de agua	poco	mucho	media
Aireación	buena	mala	buena
Nutrientes	pocos	muchos	media- alta
Tamaño de las partículas	medias	muy finas	finas

Fuente: (Facultad de ingeniería y arquitectura mecánica de suelos Universidad Privada Del Norte, 2011)

Determinación de la textura del suelo

La textura del suelo está determinada por la proporción de los tamaños de las partículas que lo conforman. Para los suelos en los que todas las partículas tienen una granulometría similar, internacionalmente se usan varias clasificaciones, diferenciándose unas de otras principalmente en los límites entre las diferentes clases. En un orden creciente de granulometría pueden clasificarse los tipos de suelos en arcilla, limo, arena, grava, barro o bloques.”⁶

⁶ Dicson Campos. (2 de Julio de 2013). <https://es.slideshare.net/vandick20/propiedades-fsica-de-los-suelos>. Recuperado el 3 de Enero de 2017, de Propiedades físicas de los suelos.

Comportamiento de los suelos.

a) Por el tamaño de las partículas.

- “Tamaño de las partículas: las propiedades físicas del suelo dependerán del tamaño de sus partículas, mayor tamaño de partículas significara mayor espacio entre ellas, resultado del suelo más poroso, menor tamaño de partículas tendrá menor espacio entre ellas dificultando el paso del aire y el agua, por lo tanto este suelo será menos poroso.

Para clasificar a los suelo según su tamaño de partícula se establece la clasificación granulométrica por la norma AASHTO y S.U.C.

b) Parámetros que permiten definir el comportamiento del suelo.

- Parámetro de identificación
- Parámetro de estado
- Parámetro estrictamente geomecánicos
- **Parámetro de identificación:** los principales son la granulometría y la plasticidad
- **Granulometría:** Distribución de los tamaños de grano que constituyen el agregado. Tamaño de las partículas va desde los tamaños granulares conocido como gravas y arenas, hasta los finos como la arcilla y el limo.

Tabla N° 2.2. Clasificación de las partículas según su tamaño

0.2	0.02	0.002	0.0002	2	0.6	0.2	0.06	0.02	0.006	0.002	0.0006	0.0002	
Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	Ultra - arcilla	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina	Gruesa	Media	Fina
					Arena			Limo			Arcilla		

Fuente: (Juarez Badillo, Eulalio;, 2001)

- **Método de sedimentación:** Análisis de una suspensión del suelo se basa en el hecho de que la velocidad de sedimentación de las partículas en un líquido es función de su tamaño, es determinado por el método del hidrómetro.”⁷

Para el hidrómetro tomar en cuenta las siguientes tablas de corrección.

Tabla 2.3. Valores de factor de corrección a diferentes pesos específicos

Peso específico	Factor de corrección
2,95	0,94
2,90	0,95
2,85	0,96
2,80	0,97
2,75	0,98
2,70	0,99
2,65	1,00
2,60	1,01
2,55	1,02
2,50	1,03
2,45	1,05

Fuente: (Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia (ABC))

Tabla 2.4. Valores de profundidad basados en hidrómetros y cilindros de sedimentación

HIDRÓMETRO 151H		HIDRÓMETRO 152H			
Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva, L,cm	Lectura actual del hidrometro	Profundidad efectiva, L,cm	Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva, L,cm
1,000	16,3	0	16,3	31	11,2
1,001	16,0	1	16,1	32	11,1
1,002	15,8	2	16	33	10,9
1,003	15,5	3	15,8	34	10,7
1,004	15,2	4	15,6	35	10,6
1,005	15,0	5	15,5	36	10,4
1,006	14,7	6	15,3	37	10,2
1,007	14,4	7	15,2	38	10,1
1,008	14,2	8	15	39	9,9
1,009	13,9	9	14,8	40	9,7
1,010	13,7	10	14,7	41	9,6
1,011	13,4	11	14,5	42	9,4
1,012	13,1	12	14,3	43	9,2
1,013	12,9	13	14,2	44	9,1
1,014	12,6	14	14	45	8,9
1,015	12,3	15	13,8	46	8,8
1,016	12,1	16	13,7	47	8,6

⁷Facultad de ingeniería y arquitectura mecánica de suelos Universidad Privada Del Norte. (abril de 2011). Ensayo de Plasticidad. Cajamarca. Recuperado el 20 de junio de 2017

HIDRÓMETRO 151H		HIDRÓMETRO 152H			
Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva, L,cm	Lectura actual del hidrometro	Profundidad efectiva, L,cm	Lectura actual del hidrómetro	Profundidad efectiva, L,cm
1,017	11,8	17	13,5	48	8,4
1,018	11,5	18	13,3	49	8,3
1,019	11,3	19	13,2	50	8,1
1,020	11	20	13	51	7,9
1,021	10,7	21	12,9	52	7,8
1,022	10,5	22	12,7	53	7,6
1,023	10,2	23	12,5	54	7,4
1,024	10	24	12,4	55	7,3
1,025	9,7	25	12,2	56	7,1
1,026	9,4	26	12	57	7
1,027	9,2	27	11,9	58	6,8
1,028	8,9	28	11,7	59	6,6
1,029	8,6	29	11,5	60	6,5
1,030	8,4	30	11,4		
1,031	8,1				
1,032	7,8				
1,033	7,6				
1,034	7,3				
1,035	7				
1,036	6,8				
1,037	6,5				
1,038	6,2				

Fuente: (Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia (ABC))

Tabla 2.5. Corrección por temperatura.

Temperatura	15.00	16.00	17.00	18.00	19.00	20.00	21.00	22.00	23.00	24.00	25.00	26.00	27.00	28.00	29.00	30.00
Ct	-1,10	-0,90	-0,70	-0,50	-0,30	0	0,20	0,40	0,70	1,00	1,30	1,65	2,00	2,50	3,05	3,80

Fuente: (Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia (ABC))

Tabla 2.6. Valores de “k” a ser usados en el cálculo del diámetro de las partículas.

Temperatura °C	Peso específico de las partículas de suelo								
	2,45	2,5	2,55	2,6	2,65	2,7	2,75	2,8	2,85
16	0,0151	0,01505	0,01481	0,01457	0,01435	0,01414	0,01394	0,01374	0,01356
17	0,01511	0,01486	0,01481	0,01439	0,01417	0,01396	0,01376	0,01356	0,01338
18	0,01492	0,01467	0,01481	0,01421	0,01399	0,01378	0,01359	0,01339	0,01321
19	0,01474	0,01449	0,01481	0,01403	0,01382	0,01361	0,01342	0,01323	0,01305
20	0,01456	0,01431	0,01408	0,01386	0,01365	0,01344	0,01325	0,01307	0,01289
21	0,01438	0,01414	0,01391	0,01369	0,01348	0,01328	0,01309	0,01291	0,01273
22	0,01421	0,01397	0,01374	0,01353	0,01332	0,01312	0,01294	0,01276	0,01258
23	0,01404	0,01381	0,01358	0,01337	0,01317	0,01297	0,01279	0,01261	0,01243
24	0,01388	0,01365	0,01342	0,01321	0,01301	0,01282	0,01264	0,01246	0,01229
25	0,01372	0,01349	0,01327	0,01306	0,01286	0,01267	0,01249	0,01232	0,01215
26	0,01357	0,01334	0,01312	0,01291	0,01272	0,01253	0,01235	0,01218	0,01201
27	0,01342	0,01319	0,01297	0,01277	0,01258	0,01239	0,01221	0,01204	0,01188
28	0,01327	0,01304	0,01283	0,01264	0,01244	0,01225	0,01208	0,01191	0,01175
29	0,01312	0,0129	0,01269	0,01249	0,0123	0,01212	0,01195	0,01178	0,01162
30	0,01298	0,01276	0,01256	0,01236	0,01217	0,01199	0,01182	0,01165	0,01149

Fuente: (Manuales Técnicos para el Diseño de Carreteras en Bolivia (ABC))

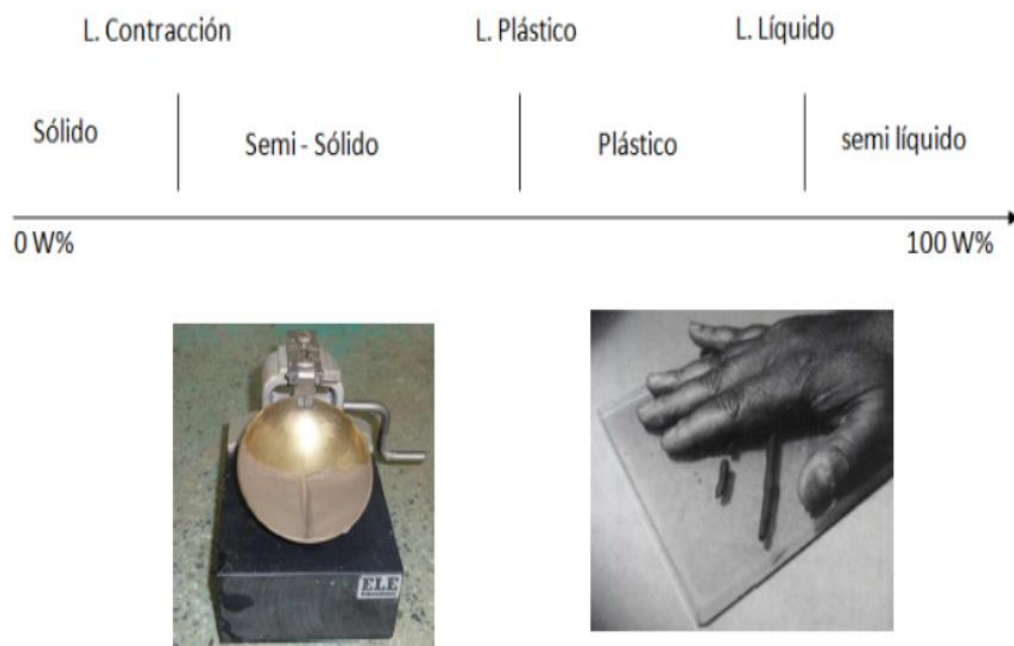
- **“Plasticidad:** Variación de consistencia del agregado en función del contenido de agua.

Límite Plástico: % de contenido de humedad con que un suelo cambia al disminuir su humedad de la consistencia plástica a la semisólida, o, al aumentar su humedad, de la consistencia semisólida a la plástica.

Límite Líquido: % de contenido de humedad con que un suelo cambia, al disminuir su humedad, de la consistencia líquida a la plástica, o, al aumentar su humedad, de la consistencia plástica a la líquida.

Índice de Plasticidad: Es un parámetro físico que se relaciona con la facilidad de manejo del suelo, por una parte, y con el contenido y tipo de arcilla presente en el suelo.

Figura N° 2.1. Estado de consistencia del suelo.



Fuente: (Facultad de ingeniería y arquitectura mecánica de suelos Universidad Privada Del Norte, 2011)

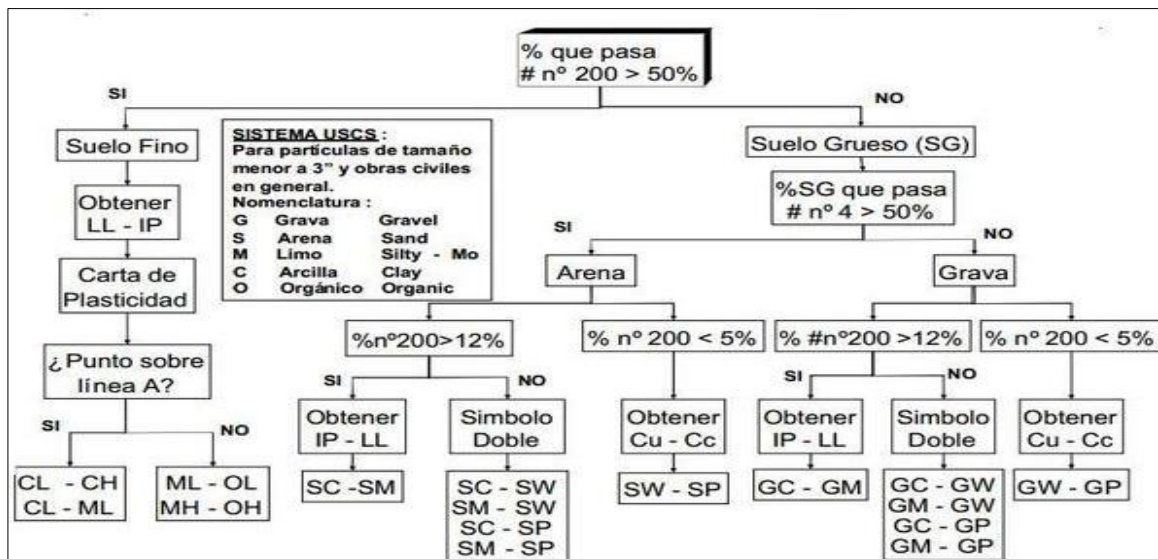
Tablas de clasificación de los suelos mediante la norma AASHTO y S.U.C.S.

Tabla 2.7. Sistema de clasificación de suelos (AASHTO)

Clasificación	MATERIALES GRANULARES (35% O MENOS DEL TOTAL PASA EL TAMIZ N° 200)							MATERIALES LIMO ARCILLOSOS MAS DEL 35% DEL TOTAL PASA EL TAMIZ N°200			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Clasificación de grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
Porcentaje de material que pasa el tamiz											A-7-6
N° 10	50 max		51 min								
N° 40	30 max	50 max	10 max								
N° 200	15 max	25 max		35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min	36 min
Características de la Fracción que pas el tamiz N°40											
LL				40 max	41 min	40 max	40 min	40 max	41 min	40 max	41 min
IP	6 max		NP	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min	11 min
Indice de grupo	0			0				4 max	8 max	12 max	16 max
											20 max

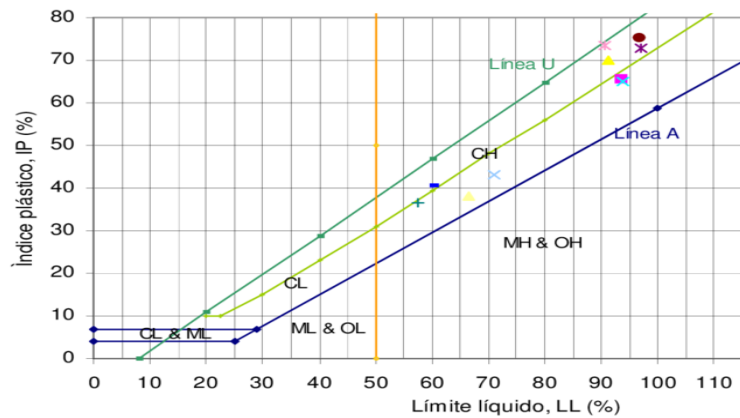
Fuente: Texto guía para el laboratorio mecánica de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho

Tabla 2.8. Sistema de clasificación de suelos (S.U.C.S.)



Fuente: (Facultad de ingeniería y arquitectura mecánica de suelos Universidad Privada Del Norte, 2011)

Figura N° 2.2. Carta de plasticidad de los suelos



Fuente: (Facultad de ingeniería y arquitectura mecánica de suelos Universidad Privada Del Norte, 2011)

- **Parámetro de estado:** Fundamental son la humedad y la densidad
 - **Contenido de humedad,** cantidad de agua en la masa del suelo:
 - Densidad, referida al grado de compacidad que muestren las partículas constituyentes. La densidad de un suelo es el peso del suelo correspondiente a un volumen determinado.”⁸

Figura N° 2.3. Método del cono de arena

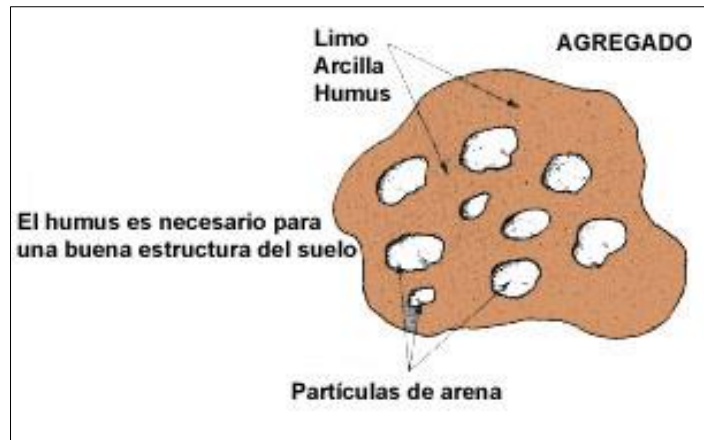


Fuente: Elaboración Propia

⁸ Facultad de ingeniería y arquitectura mecánica de suelos Universidad Privada Del Norte. (abril de 2011). Ensayo de Plasticidad. Cajamarca. Recuperado el 20 de junio de 2017

2.2.2. Estructura.

Figura N° 2.4. Estructura del suelo



Fuente: (Jhojan A Herrera Barbosa, s.f.)

“La estructura del suelo se define por la forma en que se agrupan las partículas individuales de arena, limo y arcilla. Cuando las partículas individuales se agrupan, toman el aspecto de partículas mayores y se denominan agregados.

También se refiere a la forma en la que el suelo está compuesto y al modo en que se encuentran dispuestas sus diversas partes. El suelo en su evolución natural origina una estructura vertical, conocida como perfil.

En la estructura del suelo se pueden observar diferentes capas que es producto de su movimiento interno y del transporte vertical, estas capas son conocidas como estratos.

2.2.3. Color

El color es un carácter del suelo, fácil de observar y de uso cómodo para identificar un tipo de suelo dentro del cuadro regional o local.

El color del suelo depende de sus componentes y puede usarse como medida indirecta de ciertas propiedades.

Figura N° 2.5. Perfil del suelo



Fuente: (Cristhiam Montalvan, 2014)

2.2.4. Porosidad.

Como consecuencia de la textura y estructura del suelo tenemos su porosidad, es decir su sistema de espacios vacíos o poros. Los poros en el suelo se distinguen en: macroscópicos y microscópicos. Los primeros son de notables dimensiones, y están generalmente llenos de aire, en efecto, el agua los atraviesa rápidamente, impulsada por la fuerza de la gravedad. Los segundos en cambio están ocupados en gran parte por agua retenida por las fuerzas capilares.

Los suelos de textura fina tienen mayor porosidad que los de textura gruesa. Los suelos arcillosos tienen gran número de poros pequeños (microporos), mientras que los arenosos tienen un número escaso de poros grandes (macroporos) comunicados entre sí.

Figura N° 2.6. Porosidad de suelos arenosos y suelos arcillosos



Fuente: (Cristhiam Montalvan, 2014)

2.2.5. Drenaje.

El drenaje de un suelo es su mayor o menor rapidez o facilidad para evacuar el agua por escurrimiento superficial y por infiltración profunda.

Si el drenaje es malo o bueno se identifica si tras una lluvia o riego copioso se forman charcos en el suelo que permanecen varios días, es síntoma de mal drenaje.

Si el drenaje es malo se mejora instalando red de tuberías de drenaje o también se puede crear pendientes, canaletas o zanjias, etc.”⁹

2.3. Propiedades hidráulicas del suelo.

2.3.1. Flujo de agua en los suelos.

“Al tratar con el tema de permeabilidad de los suelos, es necesario mantener en mente los conceptos más importantes referentes al estado energético del agua.

⁹ Dicson Campos. (2 de Julio de 2013). <https://es.slideshare.net/vandick20/propiedades-fsica-de-los-suelos>. Recuperado el 3 de Enero de 2017, de Propiedades físicas de los suelos.

Existen varios fenómenos que tienen relación directa con la permeabilidad de los suelos; ya que la permeabilidad es un valor altamente alterable que depende de la naturaleza del suelo, de sus características mecánicas y de las fuerzas de la superficie cuando el tamaño de partículas principal es el correspondiente a finos.

2.3.1.1. Fenómeno capilar en suelos.

El fenómeno capilar en suelos es la respuesta a las fuerzas de cohesión y adhesión que se generan en los líquidos en la interface con un cuerpo sólido.

Las fuerzas básicas responsables de la retención y movimiento del agua en el suelo, se define como cohesión y adhesión.

La fuerza de cohesión: Es la atracción entre moléculas de agua, las moléculas unidas por fuerzas de cohesión sobre superficie de los granos de suelo pueden ser fácilmente removidas.

La adhesión: La fuerza de adhesión hace que algunas moléculas de agua estén rígidamente unidas a las partículas de suelo y se llama agua absorbida.

Las fuerzas de **cohesión** y **adhesión** juntas regulan el movimiento de agua. En suelos arcillosos la adhesión y cohesión ejercen sus fuerzas sobre sus propiedades de plasticidad.”¹⁰

2.3.2. Permeabilidad.

“Permeabilidad es la propiedad que tiene el suelo de transmitir el agua y el aire. Mientras más permeable sea el suelo, mayor será la filtración. Algunos suelos son tan permeables y la filtración tan intensa que para construir en ellos cualquier tipo de estructuras es preciso aplicar técnicas de construcción especiales.

El suelo está constituido por varios horizontes, y que, generalmente, cada uno de ellos tiene propiedades físicas y químicas diferentes. Para determinar la permeabilidad del suelo en su totalidad, se debe estudiar cada horizonte por separado.

¹⁰ Suelos y sus propiedades Universidad de Oriente San Miguel el Salvador Centro America. (s.f.). Obtenido de <https://es.scribd.com/doc/315592826/Cohesion>

La permeabilidad del suelo se relaciona con su textura y estructura

El tamaño de los poros del suelo reviste gran importancia con respecto a la tasa de filtración (movimiento del agua hacia dentro del suelo) y a la tasa de percolación (movimiento del agua a través del suelo). El tamaño y el número de los poros guardan estrecha relación con la textura y la estructura del suelo y también influyen en su permeabilidad.

Variación de la permeabilidad según la textura del suelo

Por regla general, como se muestra a continuación, mientras más fina sea la textura del suelo, más lenta será la permeabilidad.

Tabla N° 2.9. Variación de la permeabilidad según la textura del suelo

Suelo	Textura	Permeabilidad
Suelo arcillosos	Fina	De muy lenta a muy rápida
Suelos limosos	Moderadamente fina	
	Moderadamente gruesa	
Suelos arenosos	Gruesa	
Permeabilidad media para diferentes texturas de suelo en cm/hr		
Arenoso		5.00
Franco arenoso		2.50
Franco		1.30
Franco arcilloso		0.80
Arcilloso limoso		0.25
Arcilloso		0.05

Fuente: (Dicson Campos, 2013)

Clases de permeabilidad del suelo

La permeabilidad del suelo suele medirse en función de la velocidad del flujo de agua a través de éste durante un período determinado. Generalmente se expresa o bien como

una tasa de permeabilidad en centímetros por hora (cm/h), milímetros por hora (mm/h), o centímetros por día (cm/d), o bien como un coeficiente de permeabilidad en metros por segundo (m/s) o en centímetros por segundo (cm/s).

Tabla N° 2.10. Coeficientes de permeabilidad (K) según el tipo de suelo

K m/s	Coeficiente de permeabilidad (k) tipo de suelo - permeabilidad		K m/s	
10	Grava limpia	Rapida	10	
10E-1			10E-1	
10E-2			10E-2	
10E-3			10E-3	
10E-4			10E-4	
10E-5	Arenas limpias arena limpia y mezcla de grava	Rapida	10E-5	
10E-6			Moderada	10E-6
10E-7				10E-7
10E-8	10E-8			
10E-9	Arenas muy finas Limos organicos e inorganicos	Lenta	10E-9	
10E-10			10E-10	
10E-11			10E-11	
	Mezclas de arena, limo y arcilla			
	Depositos estratificados de arcillas, etc.			
	Suelos impermeables, por ejemplo, arcillas			
	homogeneas por debajo de la zona de meteorizacion			

Fuente: (Dicson Campos, 2013)

Tabla N° 2.11. Coeficientes de permeabilidad

Tipo de suelos	Grado relativo de permeabilidad	Coeficiente de permeabilidad K (cm/s)	propiedades de drenaje
Grava limpia	alto	1E-01	Buena
Arena limpia	medio	1E-03	Buena
Grava arenosa	medio	1E-03	Buena
Arena fina	bajo	1E-3 a 1E-5	Franca a pobre
Limos	bajo	1E-3 a 1E-6	Franca a pobre
Arena limo arcilloso	muy bajo	1E-4 a 1E-7	Pobre o prácticamente impermeable
Arcilla homogénea	muy bajo a prácticamente impermeable	1E-07	Pobre o prácticamente impermeable

Fuente: (Dicson Campos, 2013)

Factores que intervienen en la permeabilidad:

- a) **La relación de vacíos:** Es cuando el suelo es comprimido o vibrado, el volumen ocupado por sus elementos sólidos permanece invariable, mientras que el volumen de vacíos disminuye, por lo tanto la permeabilidad del suelo también disminuye.
- b) **La estructura y estratificación del suelo:** En un suelo se pueden encontrar diferentes permeabilidades en estado inalterado y remoldeado, aun cuando la relación de vacíos sea la misma en ambos casos; esto puede ser debido a los cambios en la estructura y estratificación del suelo inalterado o una combinación de los factores.

La permeabilización sufre variaciones debido a que en el remoldeo quedan libres algunas partículas del suelo y al fluir el agua, ésta las mueve y las reacomoda, tapando los canales o arrastrándolas a la superficie o al exterior de la muestra causando turbidez en el agua.

- c) **Tamaño de las partículas:** La permeabilidad de un suelo será más baja cuando más pequeñas sean sus partículas y por ende menor serán los vacíos que forman los canales de flujo. La permeabilidad en algunos suelos es provocada por arrastre de sus finos, causando filtración.
- d) **Grado de saturación:** Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos de una muestra de suelo; cuan mayor sea el grado de saturación mayor será la permeabilidad, debido a la reducción en los canales disponibles al flujo del agua.
- e) **Densidad del suelo:** La densidad es una propiedad índice de los suelos y se emplea normalmente en gravas y arenas, es decir, en suelos que contienen casi exclusivamente partículas mayores a 0.074 mm.

La densidad es una manera de indicar el grado de compacidad (compactación) de un suelo y se puede emplear tanto para suelos en estado natural como para rellenos compactados artificialmente.

2.3.3. Conductividad hidráulica.

“La conductividad hidráulica (**K**) es la propiedad del suelo que describe la facilidad con la cual los poros del suelo permiten el flujo de agua. Cuando el suelo se satura, todos los poros pueden dirigir el agua y la conductibilidad está en su máxima expresión y es representada como K_s , mientras que en condiciones insaturadas o no saturadas es representada como K_q . En cualquier caso, depende del tamaño, número, orientación, distribución y continuidad de los poros especialmente los de retención, el tamaño de las partículas, tipo de fluido, cantidad relativa de fluido presente en la matriz del suelo.

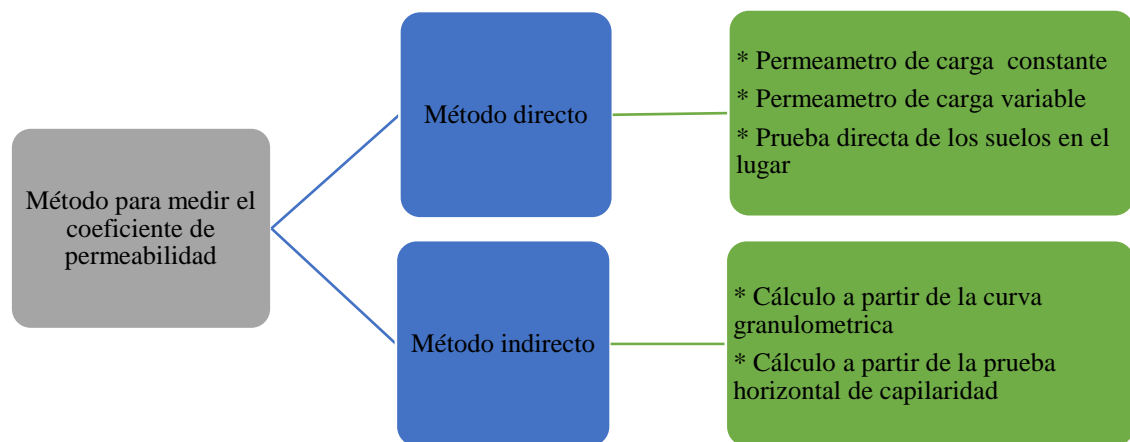
La conductividad hidráulica es una de las características de mayor importancia de los suelos, por cuanto son muchos los problemas referidos al riego y drenaje que, para su solución satisfactoria, requieren de este parámetro. La conductividad hidráulica se considera como la velocidad de infiltración que se presenta en un medio saturado (suelo), cuando el gradiente de energía o hidráulico es igual a la unidad y constituye una expresión numérica.

Reynolds et al., (1983), presentaron el permeámetro Guelph como una modificación del permeámetro presentado por Talsma y Hallam (1980). Este permeámetro consiste en un Mariotte construido con dos tubos concéntricos que actúan como depósito manteniendo la carga hidráulica constante en un hoyo practicado en el suelo. Los mismos autores desarrollaron además el procedimiento numérico para la determinación de los valores de la conductividad saturada en campo (K_s) a partir de las mediciones de velocidad de flujo infiltrándose en estado estacionario. La medida de (K_s) con el método Guelph es una técnica sencilla y relativamente rápida, aunque requiere un esfuerzo experimental considerable en el caso de muestreos de gran cantidad de puntos.”¹¹

Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad del suelo.

Hay varios procedimientos para la determinación de permeabilidad de los suelos: unos "directos", así llamados porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros "indirectos", proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines y los métodos del terreno que permiten identificar la conductividad hidráulica de un suelo en forma directa.

Figura N° 2.7. Métodos para medir el coeficiente de permeabilidad del suelo.



Fuente: Mecánica de suelos Juárez Badillo Rico Rodríguez

2.3.3.1. Conductividad hidráulica método de carga variable en laboratorio

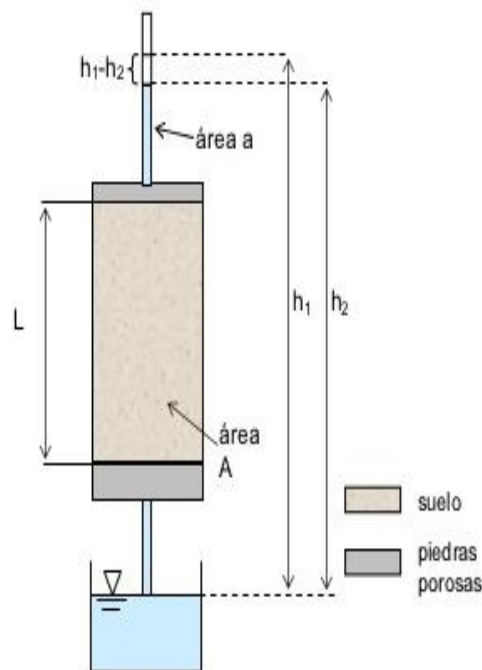
“La prueba de carga variable se usa para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos, tales como arenas finas, limos y arcillas. Para estos suelos, el flujo de agua que los atraviesa es demasiado pequeño para permitir mediciones precisas con el permeámetro de carga constante.

¹¹ Amgelone, S. (24 de Septiembre de 2012). <https://es.slideshare.net/JoseManuelAurisAparco/7-permeabilidad-en-suelossss>. Recuperado el 12 de Septiembre de 2016, de Permeabilidad de los suelos.

En un cilindro de 100 mm de diámetro generalmente se introduce una muestra del suelo, si la muestra que se va a ensayar es inalterada el cilindro puede ser un tubo U100 de muestreo o bien el tubo corta núcleos que se usa en los ensayos de densidad de campo. Las muestras también pueden prepararse por compactación haciendo uso del permeámetro de pared flexible.

Permeámetro de pared flexible: se presenta el permeámetro que mide la conductividad hidráulica para suelos finos, tanto para las muestras inalteradas como compactadas (remoldeadas), cuya principal ventaja es la saturación de los suelos finos. Realiza ensayos de conductividad hidráulica a un nivel controlado de esfuerzos efectivos.”¹²

Figura N° 2.8. Permeámetro de carga variable



Fuente: (Amgelone, 2012)

¹² Alva hurtado j.e. iv congreso nacional de ingeniería civil - chiclayo – Perú, (1982) Ensayos de permeabilidad usando el permeámetro de pared flexible (ASTM D5084-90)

Ley de Darcy

“Este tipo de dispositivo, brinda mayor exactitud para suelos menos permeables, como arcilla y limo. En este caso la cantidad de agua escurrida es medida en forma indirecta por medio de la observación de la relación entre la caída del nivel de agua en un tubo recto colocado sobre la muestra y el tiempo transcurrido. El longitud L, el área A de la muestra y el área “a” del tubo recto son conocidos. En adición, las observaciones deben ser hechas en no menos de 2 niveles diferentes de agua en el tubo recto.

Considerando un tiempo dt, la cantidad de agua (cm³) que atraviesa la muestra será, según la ley de Darcy:”¹³

$$dV = k \cdot A \cdot i \cdot dt = k \cdot A \cdot \frac{h}{L} \cdot dt \quad \text{Ec 2.1.}$$

Al mismo tiempo, en el tubo vertical, el agua habrá tenido un descenso dh y el volumen del agua que atravesó la muestra en el tiempo dt podrá expresarse:

$$dV = -adh \quad \text{Ec. 2.2.}$$

De la Ec.2.1 y Ec. 2.2 pueden igualarse, pues ambas se refieren a lo mismo:

$$k \cdot A \cdot \frac{h}{L} \cdot dt = -adh \quad a \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = \frac{kA}{L} \int_0^t dt$$

Se obtiene el valor del coeficiente de permeabilidad k, expresado en:

$$d_v = k * A * d_t \quad k = 2.3 * \frac{L * a}{A * t} * \log \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde:

a: Área del tubo vertical de carga

A: Área de la muestra

¹³ JUÁREZ BADILLO / RICO RODRÍGUEZ. Teoría y aplicaciones de la Mecánica de Suelos. Tomo I”. Editorial Limusa. México (2001)

L: Longitud de la muestra

h_1 : Carga hidráulica al principio de la prueba

h_2 : Carga hidráulica al final de la prueba

t: tiempo requerido para que la carga hidráulica pase de h_1 a h_2

2.3.3.2. Conductividad hidráulica in situ carga variable

Permeámetro Guelph

“El permeámetro Guelph es un instrumento de fácil manejo que permite medir in-situ la conductividad hidráulica de una manera rápida y precisa. Permite obtener una evaluación exacta en todo tipo de suelo de la conductividad hidráulica y capacidad de absorción del suelo, y la matriz de potencial del flujo.

Estado del Agua del Suelo

Lecturas realizadas por cualquier tipo de Permeámetro son válidas únicamente cuando el suelo alrededor del pozo está saturado con agua y cuando la Saturación de Bulbo ha sido establecida. Para obtener los mejores resultados en un relativo corto espacio de tiempo, se recomienda saturar el suelo alrededor del pozo antes de instalar el Permeámetro Guelph. Otra forma sería instalar el Permeámetro Guelph y empezar las lecturas en un suelo insaturado, las lecturas continuarán hasta que el suelo se sature. En un suelo insaturado, los valores de las lecturas no varían con el tiempo (Estado Estacionario).

Tasa de Caída en Estado Estacionario

La tasa de caída de agua para cada lectura es la diferencia en las lecturas en intervalos consecutivos, dividida entre la duración de los intervalos equivale a la tasa de caída del agua, R, en el depósito. En suelos con permeabilidad muy lenta, la medición de estas tasas con flujos muy lentos, podría no ser muy exactas y deberían usarse otra clase de procedimientos.

Tabla 2.12 Lecturas del campo

Lectura con la altura de agua en el pozo (H) establecida a 10 cm				
Tiempo t (min)	Δt (min)	Nivel de agua en el reservorio h (cm)	Δh (cm)	Tasa de infiltración $\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
0	0.00	42.80		
4	2.00	42.90	0.10	0.05
6	2.00	43.10	0.20	0.10
8	2.00	43.30	0.20	0.10
10	2.00	43.30	0.00	0.00
12	2.00	43.50	0.20	0.10
14	2.00	43.60	0.10	0.05
16	2.00	43.70	0.10	0.05
18	2.00	43.80	0.10	0.05
20	2.00	43.90	0.10	0.05
22	2.00	44.00	0.10	0.05
24	2.00	44.00	0.00	0.00
26	2.00	44.00	0.00	0.00
28	2.00	44.00	0.00	0.00
30	2.00	44.00	0.00	0.00
32	2.00	44.00	0.00	0.00
34	2.00	44.00	0.00	0.00
36	2.00	44.00	0.00	0.00
38	2.00	44.00	0.00	0.00
40	2.00	44.00	0.00	0.00
42	2.00	44.00	0.00	0.00
R cm/s				0.00083

Fuente: Elaboración propia

Para hallar R la tasa de flujo en estado estacionario se alcanza cuando R es igual a 3 intervalos de tiempo consecutivo.

$$R=0.05/60=0.00083 \text{ cm/s}$$

Donde

h: Nivel de agua en el reservorio (cm)

Δt : Intervalo de tiempo (min)

Δh : Diferencia de altura (cm)

$\Delta h/\Delta t$: Tasa de infiltración (cm/min)

R: tasa de infiltración en estado estacionario (cm/s)

Caudal infiltrado en el agujero se puede escribir como:

$$Q = \int_{AP} V_{rp} * dA_p + \int_{Ab} V_{zp} * dA_b + \int_{Ab} V_g * dA_b \quad \text{Ec. (2.4.)}$$

Donde

V_{rp} : Es el flujo a través de las paredes del pozo inducido por el gradiente radial de presión.

V_{zp} : Es el flujo a través de la base del pozo inducido por el gradiente vertical de presión.

V_g : Es el valor del flujo gravitacional.

dA_p y dA_b : Es la diferencial de área de las paredes y la base del pozo respectivamente.

Si se considera como caso particular que el terreno que rodea al pozo está totalmente saturado

Desarrollando de manera teórica, numérica y empírica la ecuación (2.4) se puede obtener la siguiente expresión para el caudal de infiltración:

$$Q = \frac{2\pi H^2}{c} K_{fs} + \frac{2\pi H}{c} \frac{K_{fs}}{\alpha} + \pi a^2 K_{fs} \quad \text{Ec. (2.5.)}$$

Los dos primeros términos de la Ec. (2.5) representan el flujo de agua a través del fondo y de las paredes del pozo debido al gradiente de presión. El primero considera el flujo

en condiciones saturadas y el segundo considera el efecto de la zona no saturada que rodea al pozo. El tercer término se refiere al flujo gravitacional.

Reynolds et al. (1983), recomiendan expresar el factor de forma “C” mediante una solución numérica que se expresa como:

Cálculos para determinar el factor de la forma “C”

Tabla N° 2.13. Factor de la forma

Categoría de textura y estructura del suelo	α (cm)	Factor de la forma C
Compactado, menos estructura, arcilloso o materiales limosos como tapas de rellenos sanitarios y revestimientos, sedimentos.	0.01	$C1 = \left(\frac{H1/a}{2.102+0.118(H1/a)} \right)^{0.655}$
		$C2 = \left(\frac{H2/a}{2.102+0.118(H2/a)} \right)^{0.655}$
Suelos que son tanto de textura fina(arcillosos o limosos) como sin estructura, también puede incluir algunas arenas finas	0.04	$C1 = \left(\frac{H1/a}{1.992+0.091(H1/a)} \right)^{0.683}$
		$C2 = \left(\frac{H2/a}{1.992+0.091(H2/a)} \right)^{0.683}$
Mayoría de los suelos estructurados desde arcillas hasta barros, también incluye arena fina y medias sin estructura. Esta es la categoría más frecuentemente aplicable para la agricultura	0.12	$C1 = \left(\frac{H1/a}{2.074+0.093(H1/a)} \right)^{0.754}$
		$C2 = \left(\frac{H2/a}{2.074+0.093(H2/a)} \right)^{0.754}$
Arenas gruesas y de grava, también puede incluir altamente estructurados con grandes y/o numerosas grietas, macro poros, etc.	0.36	$C1 = \left(\frac{H1/a}{2.074+0.093(H1/a)} \right)^{0.754}$
		$C2 = \left(\frac{H2/a}{2.074+0.093(H2/a)} \right)^{0.754}$

Fuente: (Manual de operaciones del permeámetro, s.f.)

Se calcula el caudal de infiltración “Q” y la conductividad hidráulica saturada “K_{fs}” usando las fórmulas de la Tabla 2.14, la fórmula cambia dependiendo del método usado (una cabeza o dos cabezas) y del tipo de depósito usado en la medición (Interno o Combinado).”¹⁴

Tabla N° 2.14. Ecuaciones calibradas del equipo permeámetro Guelph

Una cabeza, combinación de depósitos	$Q_1 = R_1 * 35.22$	$k_{fs} = \frac{C_1 * Q_1}{2\pi H^2 + \pi a^2 C_1 + 2\pi \left(\frac{H_1}{a}\right)}$
Una cabeza, depósito interno	$Q_1 = R_1 * 2.16$	$\Phi = \frac{C_1 * Q_1}{(2\pi H^2 + \pi a^2 C_1) a + 2\pi H_1}$
Dos cabezas combinación de depósitos	$Q_1 = R_1 * 35.22$ $Q_2 = R_2 * 35.22$	$G_1 = \frac{C_2 * H_1}{\pi(2H_1 H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 C_2 - H_2 C_1))}$ $G_2 = \frac{C_1 * H_2}{\pi(2H_1 H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 C_2 - H_2 C_1))}$ $k_{fs} = G_2 Q_2 - G_1 Q_1$
Dos cabezas depósito interno	$Q_1 = R_1 * 2.16$ $Q_2 = R_2 * 2.16$	$G_3 = \frac{(2H_2^2 + a^2 C_2) C_1}{2\pi(2H_1 H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 C_2 - H_2 C_1))}$ $G_4 = \frac{(2H_1 + a^2 C_1) C_2}{2\pi(2H_1 H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 C_2 - H_2 C_1))}$ $\Phi_m = G_3 Q_1 - G_4 Q_2$

Fuente: (Manual de operaciones del permeámetro, s.f.)

Donde

Q: Caudal de infiltración cm³/s. Ver Tabla N° 2.14

R: tasa de infiltración en estado estacionario (cm/s). Ver Tabla N° 2.12

K_{fs}: Coeficiente de permeabilidad. Ver Tabla N° 2.14

Φ: Potencial de Flujo matrico. Ver Tabla N° 2.14

C: Factor de la forma. Ver Tabla N° 2.13

a: Radio del hoyo del pozo. Dato obtenido del campo

H: Altura de agua en el hoyo. Dato obtenido del campo

2.4.Suelos de subrasante

“Se denominará subrasante a la superficie de los terraplenes en corte o relleno de suelo natural o mejorado sobre la cual se construirá un pavimento.

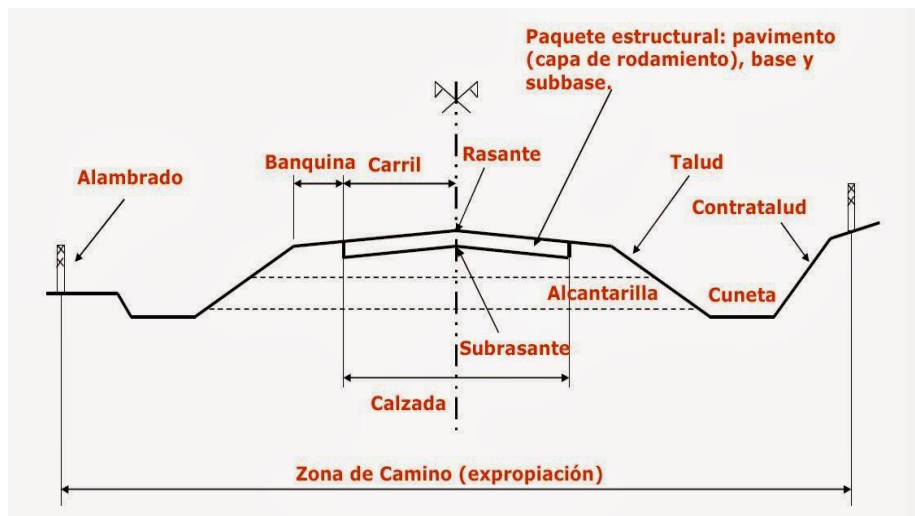
Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, tanto en lo que se refiere a la resistencia como a las eventuales variaciones de volumen.

Figura 2.9. Subrasante



Fuente: (Jaga 126, 2010)

Figura 2.10. Estructura de la carretera



Fuente:(Jaga 126, 2010)

¹⁴ Instrucción de operación . (s.f.). obtenido de

http://www.academia.edu/5086545/guia_estudiantes_permeametro_de_guelph

El nivel especificado de la subrasante se logra con el movimiento de tierras. Una vez que llegue al nivel de la subrasante, si esta no tiene la firmeza requerida. Se deberá estabilizar mediante procesos especiales que se detallarán posteriormente.

En términos generales el movimiento de tierras consiste en todos los trabajos que se realizan sobre el suelo en estado natural. Básicamente consta de las siguientes etapas:

Limpieza y desbroce, excavación para la plataforma del camino, excavación ordinaria, rellenos compensados, terraplenes con préstamo lateral, excavación en rocas a cielo abierto, rellenos y terraplenes, terminación (conformación y compactación).

Propiedades físicas de la subrasante:¹⁵

Son propiedades relacionadas con el tipo de material a utilizar y las características constructivas de los mismos.

- Granulometría (propiedades iniciales de los suelos)
- Clasificación de los suelos
- Relación humedad-densidad

2.5. Drenaje subterráneo

“El drenaje de vías generalmente puede ser definido como los procesos de control y transporte de agua subterránea localizada dentro de los límites de la vía y sus terrenos adyacentes.

En una vía se debe considerar el agua de:

Nivel freático, filtración de las precipitaciones y de flujos subterráneos o de la existencia de supresiones o materiales que acumulan agua en su interior.

El propósito del drenaje subterráneo es eliminar el exceso de agua del suelo a fin de garantizar la estabilidad de la plataforma y de los taludes de la carretera.

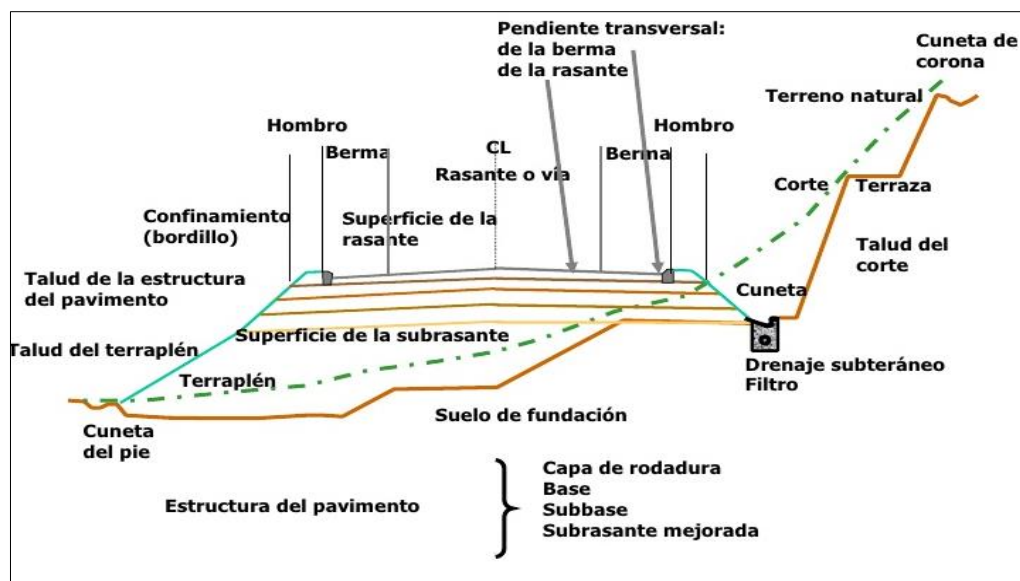
¹⁵ [Nevely](https://es.slideshare.net/nevely/subrasante-presentation) Publicado el 18 de nov. De 2008 Subrasante <https://es.slideshare.net/nevely/subrasante-presentation>

Ello se consigue interceptando los flujos subterráneos, y haciendo descender el nivel freático con el objetivo de disminuir las presiones de poro o impedir que estas aumenten. La cantidad de aguas recolectadas por un sistema de subdrenaje depende de la permeabilidad de los suelos o rocas y de los gradientes hidráulicos. Cuando se instala un dren generalmente, el nivel piezométrico se disminuye al igual que el gradiente hidráulico, lo cual disminuye el caudal inicial recolectado por los drenes.

Según acostumbra clasificar a los sistemas de drenaje subsuperficial en 3 categorías generales:

- Drenes longitudinales
- Drenes transversales
- Capa permeable

Figura 2.10. Estructura de la carretera y drenaje subterráneo



Fuente:(Jaga 126, 2010)

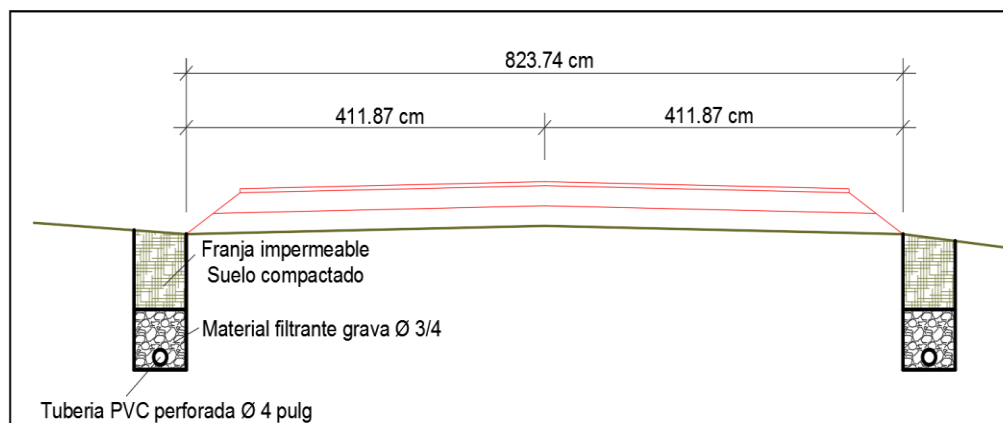
2.5.1 Subdren longitudinal

Son zanjas paralela a la dirección de la vía, en la cual se coloca materiales permeables (agregados pétreos, geotextiles, geodrenes) y eventualmente una tubería.

Los subdrenes longitudinales se emplean para:

- Cortar el agua subterránea, impidiendo que alcancen las inmediaciones del pavimento.
- Encauzar el agua que ingrese al pavimento por filtraciones a través de su superficie en la figura 2.11 se muestra el encause del agua por filtración en el pavimento.

Figura N° 2.11. Detalles de dimensionamiento del dren

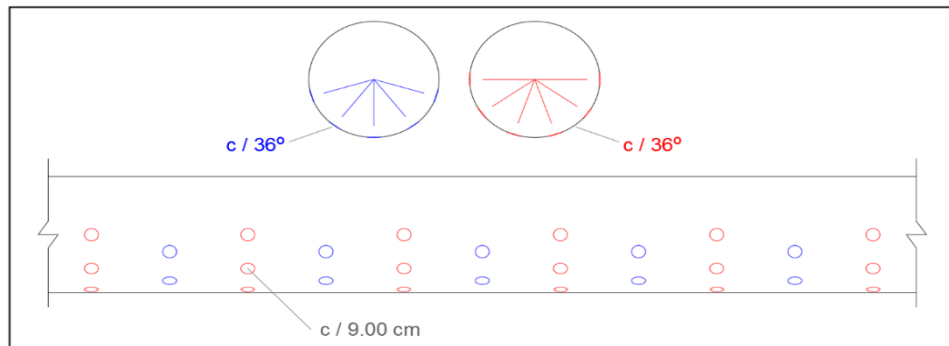


Fuente: Elaboración propia

2.5.2. Características de los subdrenes longitudinales.

- Deben de tener la capacidad hidráulica suficiente para conducir toda el agua que reciba.
- Si están unidos con una base permeable, su material de relleno debe de ser el mismo de la base para asegurar su capacidad, además debe llevar una tubería.
- Puede ser de concreto, arcilla, metal, fibra bituminosa o plástico.
- Los tubos de concreto y arcilla se podrán proyectar con juntas abiertas o perforaciones que permitan la entrada del agua en su interior.
- Los tubos de hormigón poroso permiten la entrada del agua a través de sus paredes.
- Los tubos de plástico, metal y fibra bituminosa tiene orificios circulares o ranuras para el mismo fin.
- Los orificios circulares o ranuras de la tubería perforadas se disponen de preferencia a la mitad inferior de los tubos.”¹⁶

Figura 2.12. Tubería longitudinal



Fuente: Elaboración propia

2.5.3. Diseño

Para el diseño del subdren longitudinal se toma en cuenta la hidrología como veremos a continuación:

2.5.3.1. Hidrología

Determinación de la ecuación de **I Max** y las curvas IDT, cuando solo se cuenta con datos de precipitaciones diarias totales.

Como frecuentemente, no se disponen de registros suministrados por pluviógrafos, se requiere establecer relaciones (formulas) para convertir los valores de precipitaciones diarias en alturas de precipitación para cortas duraciones. En este caso, los datos de precipitaciones máximas en 24 hr (P_{max} diarias), deben ser sometidos a un tratamiento que permita conocer su distribución temporal, para lo cual se utiliza algún algoritmo de desagregación de los datos globales diarios, en incrementales Criterio de Grobe, conocido como de Dyck y Peschke.”¹⁷

Construcción de curvas Intensidad - Duración - Periodo de retorno o IDT.

Descomponer la precipitación de 24 horas, en diferentes duraciones.

¹⁶ Marín Hernández Elizabeth-Pérez Callejas Ivette Mareli Drenaje y subdrenaje en carreteras (México D.F. agosto del 2014)

¹⁷ Máximo Villón Béjar Hidroesta 2 Cálculos hidrológicos

1. Discretizar la precipitación, aplicando la ecuación empírica.

$$P_D = P_{max_{24Hr}} * \left(\frac{D}{1440} \right)^{0.25} \quad \text{Ec. 2.6.}$$

2. Transformar las lluvias máximas en mm a intensidades en mm/hr.

$$I_D = \left(\frac{60 * PD}{D} \right) \quad \text{Ec. 2.7.}$$

3. Ordenar las intensidades máximas y calcular sus periodos de retorno con la fórmula de Weibull.

Para cada duración, las intensidades máximas se ordenan en forma descendente y se determina el periodo de retorno (T) para cada una de ellas.

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad \text{Ec. 2.8.}$$

4. Reordenar los datos de las trietas I máx. T y D en forma adecuada.

Para el proceso de cálculo de la correlación múltiple, resulta más conveniente reordenar los datos en forma adecuada.

5. Calculo de los parámetros K, a y b de la correlación potencial múltiple.

$$I_{max} = \frac{K * T^a}{D^b} \quad \text{Ec. 2.9.}$$

2.5.3.2. Hidráulica

Estimación del caudal de diseño

Para diseñar subdrenajes laterales en una vía, se debe considerar primero la distancia entre alcantarillas, o los sitios en donde los subdrenes realizan la descarga de agua. Para establecer las distancias de los tramos de los subdrenes, se debe tener en cuenta que cada tramo conserve, en lo posible, características similares. Por ejemplo igual pendiente, condiciones geomorfológicas similares o condiciones geométricas de la vía

similar. Entre más largo sea el recorrido de agua dentro de un subdren, mayor tendrá que ser su capacidad de transporte, debido a que a lo largo del subdren se van sumando caudales de aporte.

Posteriormente se identifica las posibles fuentes a tener en cuenta para el cálculo del caudal total.

Los subdrenajes son sistemas que se utilizan para retirar el agua infiltrada o subterránea que ha entrado en la estructura. También existen métodos que evitan la entrada de agua a la estructura de un pavimento, éstos son básicamente los que manejan el agua de escorrentía como son: zanjas de coronación, trincheras drenantes, cunetas, etc.

Los posibles caudales de aporte, que conforman el caudal total, los cuales pueden afectar la estructura de un pavimento son:

- El caudal generado por la infiltración de agua de lluvia.
- El caudal generado por el abatimiento del nivel de agua subterránea.
- El caudal proveniente de taludes adenaños.

El caudal generado por la infiltración de agua de lluvia y por el abatimiento del nivel de agua subterránea, en la mayoría de los casos, van a estar presentes en el diseño de los subdrenajes para vías.

Caudal por infiltración.

El agua de lluvia cae directamente en la capa del pavimento. Una parte de éste inevitablemente se infiltra en la estructura del pavimento debido a que las carpetas de pavimento, rígidas como flexibles, no son impermeables.

Por tanto, el caudal de infiltración se calcula de la siguiente forma:

$$Q_{inf} = I_R * B * L * F_i * F_R \quad \text{Ec. 2.10.}$$

Donde

IR: Intensidad de precipitación (Diseño hidrológico) (cm/s)

B: 50 % del ancho de la vía + 50% del berma (cm)

L: Longitud del tramo de drenaje (cm)

Fi: Factor de infiltración (Adim)

FR: Factor de retención en la base (Adim)

Tabla2.15. Valores recomendados para Fi

TIPO DE CARPETA	Fi
Carpetas asfálticas muy bien conservadas	0,30
Carpetas asfálticas normalmente conservadas	0,40
Carpetas asfálticas pobremente conservadas	0,50
Carpeta de concreto de cemento Portland	0,67

Fuente: PAVCO. Manual de diseño de geotextiles.

Tabla 2.16. Valores recomendados para FR

TIPO DE BASE	FR
Bases bien gradadas, en servicio 5 años o más	0,30
Bases bien gradadas, en servicio menos 5 años	0,40
Bases de gradación abierta, en servicio 5 años o más	0,50
Bases de gradación abierta, en servicio menos 5 años	0,67

Fuente: PAVCO. Manual de diseño de geotextiles.

Figura N° 2.13. Caudal por abatimiento del nivel freático



En sitios donde el nivel freático o el agua proveniente a presión alcancen una altura tal, que supere el nivel de subrasante afectando a la estructura del pavimento, es necesario abatir este nivel de manera que no genere.

$$Q_{NF} = K * i * A \quad \text{Ec. 2.11.}$$

$$i = \frac{(N_d - N_f)}{B} \quad \text{Ec. 2.12.}$$

$$A_a = (N_d - N_f) * L \quad \text{Ec. 2.13.}$$

Donde

- Nd:** Cota inferior del subdren con respecto a la cota de la subrasante (cm)
- Nf:** Cota superior del nivel freático con respecto a la cota de la subrasante (cm)
- K:** Coeficiente de permeabilidad del suelo adyacente (cm/s)
- I:** Gradiente hidráulico (Adim)
- Aa:** Es el área efectiva para el caso de abatimiento del nivel freático (m²)
- B:** 50 % del ancho de la vía + 50% del berma (cm)
- L:** Longitud del tramo de drenaje (cm)

Caudal por escorrentia superficial

Este caudal puede ser controlado con metodos de captacion, de manera tal, que se minimice la entrada a la estructura del pavimento. En tramos en donde se considere el caudal de agua filtrada proveniente de taludes como un caudal de aporte, se debe estimar para ser considerado en el diseño.

Caudal de diseño

Una vez estimados los caudales de aporte al sistema de drenaje subterráneo se determina el caudal de diseño no siendo más que la sumatoria de los caudales de infiltración, abatimiento del nivel freático y escorrentía.

$$Q_T = Q_{Imf} + Q_{NF} + Q_{ES} \quad \text{Ec. 2.14.}$$

2.5.3.3. Estructura

Teniendo el caudal final Q_T , el cual es la suma de los caudales calculados, se realiza el siguiente procedimiento.

$$Q_T = V_F * i_h * A \quad \text{Ec. 2.15.}$$

Donde

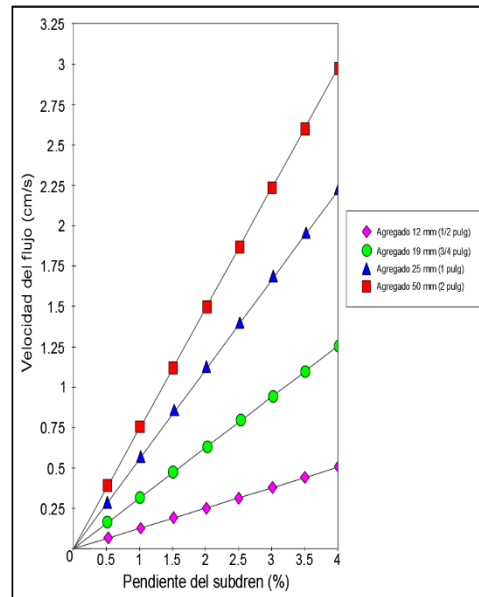
Q_T: Caudal de diseño cm³/s

V_F: Velocidad del flujo en el filtro cm/s

A: Área de la sección transversal del subdren, normalmente se fija el ancho y se despeja su altura cm²

i_h: Gradiente hidráulico que para subdrenes es 1 Adim

Figura N° 2.14. Pendiente vs velocidad, según el tamaño del agregado (para agregados de tamaño uniforme)



Fuente: PAVCO. Manual de diseño de geotextiles.

La línea superior de flujo o nivel freático no debe superar en ningún momento la cota de subrasante, con este criterio se debe establecer la profundidad del subdren Nd.

Optimización de los filtros

Dimensionamiento

El dimensionamiento de la sección de la tubería se la realiza mediante la aplicación de la ecuación de Manning, incorporando los criterios de la eficiencia hidráulica.

$$d = \sqrt{\frac{Q_T * n}{K * i}} \quad \text{Ec. 2.16.}$$

Donde

Q_T: Caudal de diseño (cm³/s)

N: Coeficiente de rugosidad del material empleado (Adim)

P_D: Pendiente longitudinal del drenaje (%)

K: Eficiencia hidráulica (Adim)

d: Diámetro mínimo de la tubería (cm²)

La transferencia de flujo desde el material filtrante hacia la tubería se realiza mediante una serie de agujeros.

Perforaciones

Para la determinación del diámetro de las perforaciones se debe ser consecuente con el material a ser empleado en el filtro, para no permitir el ingreso de partículas dentro de la tubería generando obstrucciones y reduciendo la capacidad de la misma.

El número de perforaciones está estrechamente ligada al caudal y la velocidad de ingreso a la tubería.

Disposición de las perforaciones en tuberías

No conviene perforar la parte superior del tubo, pues ello favorecería la entrada de partículas finas del material del filtro, tampoco conviene colocar perforaciones en la parte más abajo del tubo pues se proporcionaría la salida del agua captada, cuando su velocidad disminuya o cuando se tenga un gasto bajo. Se recomienda utilizar tuberías mayores a 15 cm de diámetro.

Figura N° 2.15. Recomendaciones para la disposición de perforaciones en tuberías de subdrenaje



Fuente: Rico Alonso, 2005

CAPÍTULO III

INGENIERÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Antecedentes.

Con la presente investigación se tiene previsto realizar ensayos de laboratorio, estudios geotécnicos en los puntos del posible emplazamiento para drenes con el objetivo de cumplir los alcances propuestos en esta investigación , ya que la problemática de drenes se debe a la falta de valores confiables y reales de coeficientes de permeabilidad para la subrasante al grado de compactación que se encuentra la misma, es en ese sentido como aporte para los profesionales del medio y las instituciones se procede a desarrollar la ingeniería de la investigación.

3.2. Ubicación.

Figura N° 3.1. Extracción de muestras de la Av. Libertad del barrio Fray



Fuente: Elaboración propia

La presente investigación “**Análisis de la conductividad hidráulica mediante el uso del Permeámetro Guelph aplicado a la subrasante**”, se encuentra ubicada en el departamento de Tarija Provincia Cercado entre Latitud Sur $21^{\circ}28'$ a $21^{\circ}30'$ y Longitud Oeste $64^{\circ}43'$ a $64^{\circ}44'$ tal cual se muestra en la tabla adjunta.

El área de estudio para la extracción de muestras en la subrasante está localizada en la Av. Libertad del barrio Fray Quebracho, limita al Norte con Sella Cercado, al Sur con el barrio Los Chapacos y barrio 15 de Junio, al Este con la Quebrada el Monte y al Oeste con San Mateo.

Tabla N° 3.1.

País:	Bolivia
Departamento:	Tarija
Provincia:	Cercado
Sección Municipal:	1ª Sección
Distrito:	N° 7

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.2. Vista de la zona



Fuente: Elaboración propia

3.2.1. Características del tramo.

La superficie delimitada para la caracterización de suelos comprende un total de 5 km.

Tiene un ancho de calzada de 6 m, una pendiente máxima de 10% y una pendiente mínima de 2%, su radio de curvatura mínimo es de 24 m.

Es un barrio que sufre de muchas necesidades pero una de las más críticas, es la falta de alcantarillado.

Esta avenida presenta suelos finos como ser arcillas, arenas finas y limo, siendo estas las predominantes en la mencionada avenida, características que son adecuadas para el estudio de la investigación que este tramo se encuentra nivel subrasante.

Topografía y suelo.

En esta Avenida presenta una topografía semi plana a ondulada, la pendiente máxima de 10% y una mínima de 2%.

Condiciones climatológicas.

Tarija tiene un clima cálido y seco característico de los Valles. En tiempo de verano es ligeramente cálido y agradable, con algunas lluvias.

Su temperatura promedio es de 18°C y con precipitaciones anuales que van de 300 a 600 mm.

3.3. Ensayos de laboratorio requeridos para la investigación.

3.3.1. Caracterización del suelo.

Se realizó una inspección del lugar de estudio, haciendo observaciones e identificaciones visuales de la zona.

Luego se procedió a la extracción de muestras de suelos para sus posteriores ensayos, los cuales son detallados a continuación.

3.3.1.1. Extracción de muestras.

Figura N° 3.3. Extracción de las muestras



Fuente: Elaboración propia

Herramientas

- Bolsas de yute para recoger muestra.
- Pala y picota para remover y realizar la excavación de suelos.
- Marcador para identificar las muestras.

Instrucciones de muestreo

- Se determinó los puntos para que la extracción de muestras sea representativa.
- Se retiró de 5 cm a 10 cm de la superficie del terreno en cada punto con el fin de limpiar y eliminar los residuos frescos de materia orgánica, polvo de la carretera u otros contaminantes artificiales.
- Con la picota se hizo una excavación de aproximadamente 40 cm a 50 cm de profundidad para llegar a nivel de subrasante y se procedió al retiró la muestra, así también a esa profundidad se procedió a realizar las pruebas de permeabilidad con el permeámetro Guelph.
- Las muestras fueron depositadas en bolsas de yute, y con un marcador se identificó cada bolsa de yute con su respectiva progresiva y su ficha de registro.

Las observaciones de la toma de muestras del terreno en este ensayo proporcionan un análisis visual de color de textura y estructura.

De esta manera al momento de extraer la muestra, también se observó que el suelo no varía cada 500 metros, motivo por el cual se procedió a realizar los ensayos respectivos cada 500 metros.

3.3.1.2. Ensayo de la granulometría de los suelos (ASTM D422 AASHTO T88).

La granulometría no es más que obtener la distribución porcentual de los tamaños de partículas que conforman un suelo.

El análisis granulométrico se realiza con ayuda de un juego de tamices, que tienen un tamaño graduado establecido por las normas ASTM y AASHTO, en donde se obtienen los pesos retenidos para luego realizar posteriores cálculos y la curva granulométrica.

Material

- Muestra de suelo
- Juego de tamices
- Balanza de sensibilidad 0.1 gr.
- Bandejas

Metodología para suelos finos (método del lavado)

A partir del material extraído del campo use una muestra representativa de suelo. Reduciendo los terrones de la muestra a tamaños de partículas elementales en algunos casos. La cantidad para suelo granular aproximadamente es 5000 gramos, para suelos arcillosos sin presencia de piedras varía entre 300 a 500 gramos.

Use 300 gramos de la muestra dejando reposar 24 horas en agua hasta que esta sature completamente.

Sin perder material puse en la malla N° 200, luego con ayuda del agua se lavó el suelo, hasta que el agua pasante tome aspectos más claros sin sedimentación.

Este material retenido en el tamiz N° 200, fue llevado al horno en un plato para realizar un secado del suelo y proceder a tamizar por las mallas N° 40 y N° 200.

Posteriormente se pesó el material retenido en cada malla dispuesta para el fino.

Figura N° 3.4. Ensayo de granulometría por el metodo del lavado



Metodo del Lavado por el tamiz N 200

Pasa el tamiz N 10

Pasa el tamiz N 200

Fuente: Elaboración propia

3.3.1.2.1 Resultado obtenido de la granulometría por método del lavado.

Tabla N° 3.2. Resultado de % acumulado de los pesos retenidos.

Ensayo		Muestra									
		Muestra 01 Prog 0+500	Muestra 02 Prog 1+000	Muestra 03 Prog 1+500	Muestra 04 Prog 2+000	Muestra 05 Prog 2+500	Muestra 06 Prog 3+000	Muestra 07 Prog 3+500	Muestra 08 Prog 4+000	Muestra 09 Prog 4+500	Muestra 10 Prog 5+000
Granulometría	% Pasa N° 40	97,33	97,13	77,93	78,13	80,53	80,50	82,13	83,00	84,03	81,17
	% Pasa N° 200	86,60	85,40	8,20	11,80	18,20	22,17	42,10	37,90	38,17	40,83

Fuente: Elaboración propia

Las curvas granulométricas de cada ensayo ver anexo B.2.

Se observa en la tabla N° 3.2. Resultados de % acumulado de los pesos retenidos en cada progresiva, como se puede ver en toda la avenida tenemos presencia de suelo fino, de esta manera podemos ver como es nuestra distribución granulométrica en cada progresiva, con los siguientes ensayos se podrá realizar la clasificación para definir el tipo de suelo cada 500 metros

3.3.1.3. Ensayo para la Calibración del frasco volumétrico (ASTM D854 T100).

El material volumétrico tiene por finalidad la medición exacta de volúmenes y debe ser controlado antes de utilizarlo.

Su objetivo es determinar la curva de calibración de la botella volumétrica que brindará información para la realización del ensayo del peso específico de un suelo.

Material

- Frasco volumétrico, con marca de enrase
- Termómetro con aproximación de 0,01°C
- Balanza de aproximación de 0,01 a 0,1 gramos
- Accesorios a baño maría frío y caliente
- Pipeta
- Hielo

Metodología

Limpieza del frasco volumétrico

Para registrar la masa del picnómetro vacío primero se lava el frasco con agua jabonosa, luego se enjuaga y se debe esperar a su secado para proceder al pesaje del mismo.

Calibración

Llene el frasco con agua un 50% de la capacidad, luego instale el frasco a baño María caliente hasta llegar a un incremento de temperatura de 60 °C.

Rápidamente retirando el frasco a baño María para completar agua hasta el enrase a temperatura ambiente, pese el frasco con el agua para luego llevarlo a baño María frío, colocamos el hielo en una bandeja e introducimos el matraz dentro.

Del cual obtuve 5 pesos del frasco a cinco temperaturas diferentes, en un rango de 15 a 30 °C.

Figura N° 3.5. Ensayo de Calibración del Frasco



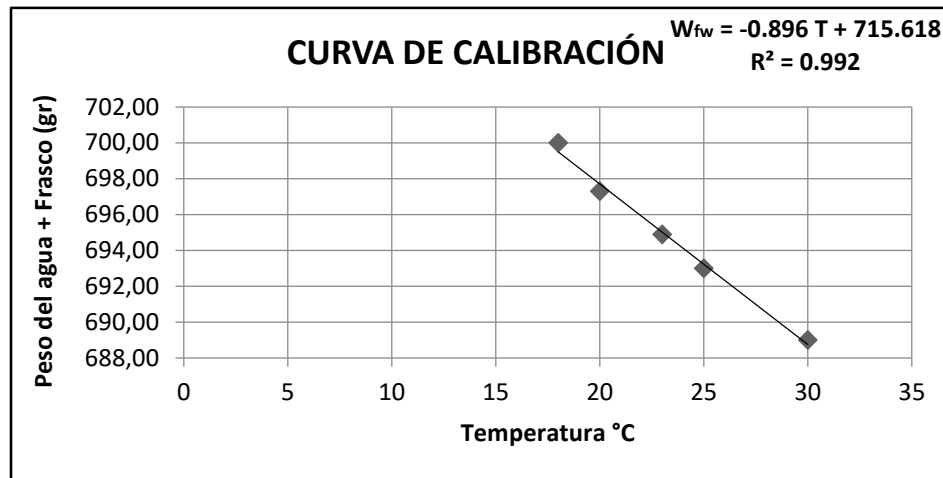
Fuente: Elaboración propia

3.3.1.3.1 Resultado obtenido de la calibración del frasco volumétrico

Tabla N° 3.3. Resultado de peso obtenido en función de la temperatura

N°	W_{fw} (gr)	T °C
1	18,00	700,00
2	20,00	697,30
3	23,00	694,90
4	25,00	693,00
5	30,00	689,00

Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Ver anexos B.3

Se observa la importancia que es calibrar el frasco volumétrico, porque se obtiene la ecuación que se usa para realizar el ensayo de peso específico del suelo en el siguiente ensayo. Como se ve en la Tabla N° 3.3. Los valores obtenidos son graficados para obtener la ecuación de calibración, la cual se ajusta a una correlación de $R = 0.992$.

3.3.1.4. Ensayo del peso específico de los suelos (ASTM D854 AASHTO T100)

Este método establece el procedimiento para determinar mediante un picnómetro, la densidad de partículas sólidas de suelos compuestos por partículas menores que 5 mm.

$$\gamma = \frac{W_s}{W_{fw} + W_s - W_{fsw}} \quad \text{Ec. 3.1.} \quad G_s = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad \text{Ec. 3.2.}$$

Donde:

γ : Peso específico relativo de un suelo (gr/cm^3)

W_s : Peso del Suelo Seco (gr)

W_{fw} : Peso del Frasco lleno de agua (se obtiene de la calibración del frasco volumétrico)
(gr)

W_{fsw} : Peso del frasco con suelo y agua (gr)

G_s : Gravedad Específica con respecto al agua (adim.)

γ_w : Peso específico del agua (1 gr/cm³)

Material

- Frasco volumétrico con marca de enrase y con curva de calibración
- Termómetro con aproximación de 0,01°C
- Balanza de aproximación de 0,01 a 0,1 gramos
- Accesorios a baño María frío y caliente
- Pipeta
- Hielo

Metodología

Para suelos arcillosos

Limpieza del frasco volumétrico

Hice la limpieza del frasco con agua jabonosa y agua, espere a su secado para proceder al pesaje del mismo y registrar la masa del picnómetro vacío.

Pese 80 gramos de suelo que pase el tamiz N° 10 , este mismo se fue mezclado con agua hasta que se forme una pasta.

Coloqué la pasta dentro del frasco para llenarlo a 50 % de su capacidad, seguidamente batimos hasta que se forme una suspensión uniforme.

Inmediatamente puse el frasco a baño María caliente para someter a un incremento de temperatura de 60 °C. Retire el frasco de baño María para completar agua a temperatura ambiente, pesamos el frasco con el agua más el suelo.

Luego puse el matraz a baño María frío dentro de una bandeja con hielo para realizar la obtención de 5 pesos del frasco a 5 temperaturas diferentes, en un rango de 15 a 30 °C. Una vez obtenido los pesos se desocupa el contenido del frasco dentro de un plato para introducirlo al horno y obtener el peso del suelo seco.

Figura N° 3.6. Ensayo del peso específico de los suelos



Limpieza del Frasco

Se observa el vaciado y el batido de la muestra en el Matraz

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.7. Ensayo del peso específico de los suelos sometido a baño María caliente y frío



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.4.1 Resultado obtenido del ensayo peso específico de los suelos.

Tabla N° 3.4. Resultado de pesos específicos

Ensayo	Muestra									
	Muestra 01 Prog 0+500	Muestra 02 Prog 1+000	Muestra 03 Prog 1+500	Muestra 04 Prog 2+000	Muestra 05 Prog 2+500	Muestra 06 Prog 3+000	Muestra 07 Prog 3+500	Muestra 08 Prog 4+000	Muestra 09 Prog 4+500	Muestra 10 Prog 5+000
Peso Específico g/cm³	2,55	2,55	2,52	2,52	2,50	2,55	2,72	2,70	2,65	2,53

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar Tabla N° 3.4. Tenemos resultado de pesos específicos donde se observa valores de 2.52 a 2.72 g/cm³. Este peso específico me sirve de dato para poder realizar el ensayo de la Granulometría del Hidrómetro que veremos a continuación.

3.3.1.5. Ensayo granulométrico por medio del hidrómetro (ASTM D422).

El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo.

El objetivo es determinar la distribución granulométrica del material que pase el tamiz N°200 basándonos en la relación de la velocidad de una esfera que cae libremente a través de un fluido y su diámetro.

Material

- Hidrómetro
- Tamices N° 10 y N° 200
- Termómetro de 0 a 100 °C
- Probeta graduada de vidrio de 100 ml
- Silicato de sodio (de floculante)
- Cronometro

Metodología

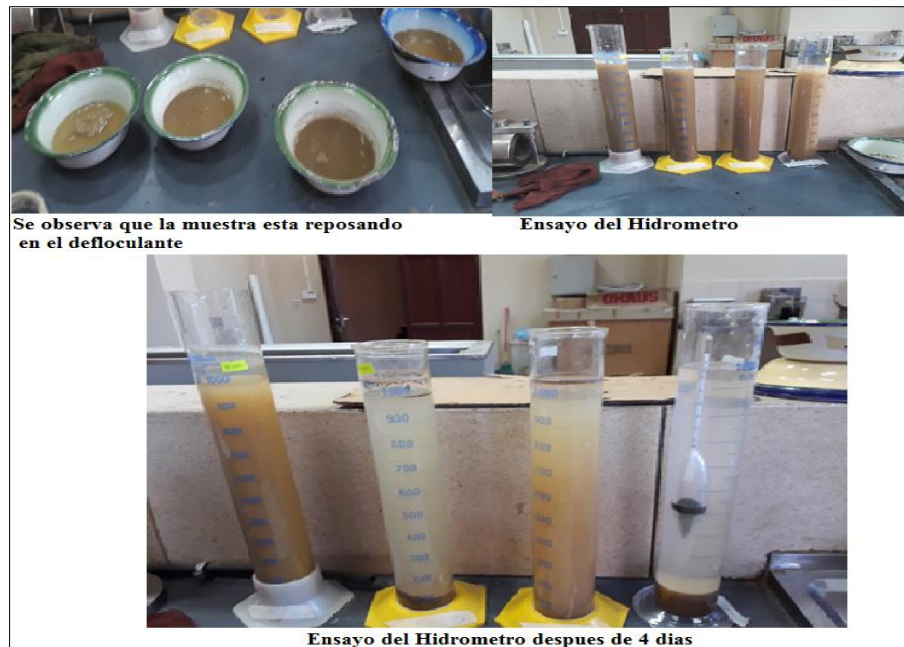
Para suelos arenosos, utilice el tamiz N° 10 pesando 75 a 100 gramos.

Para suelos limos y arcillas que pasan el tamiz N° 200 pese 50 a 60 gramos. Consecutivamente prepare 125 ml de agua con de floculante para dejar reposar la muestra con el de floculante durante 24 horas, esto con el fin y la importancia de la separación de las particular adheridas entre sí.

Pasada las 24 horas con ayuda de un embudo vacié la muestra en la probeta graduada, posteriormente se llena de agua la probeta a los 1000 ml para realizar el batido correspondiente y así proceder a las lecturas.

Se registró lecturas con el hidrómetro a diferentes tiempos y diferentes días.

Figura N° 3.8. Ensayo del Hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.9. Ensayo del Hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.5.1 Resultado obtenido del ensayo granulométrico por medio del hidrómetro.

Tabla N° 3.5. Resultado en % de partículas de diámetro más fino,

Muestra % Finos	Muestra 01 Prog 0+500	Muestra 02 Prog 1+000	Muestra 03 Prog 1+500	Muestra 04 Prog 2+000	Muestra 05 Prog 2+500	Muestra 06 Prog 3+000	Muestra 07 Prog 3+500	Muestra 08 Prog 4+000	Muestra 09 Prog 4+500	Muestra 10 Prog 5+000
% Limos	88,10	94,90	93,20	96,00	90,90	95,30	90,90	96,50	98,00	95,60
% Arcilla	11,90	5,11	6,85	3,97	9,12	4,67	9,06	3,45	1,97	4,38

Fuente: Elaboración propia

El análisis granulométrico por medio del hidrómetro se realiza para determinar el porcentaje de limos y arcillas, en los suelos que pasan el tamiz N ° 200

La distribución granulométrica por el método del hidrómetro ver en anexo B.5.

3.3.1.6. Ensayo de Consistencia de los suelos (Límites de Atterberg)

Los estados de consistencia son fases generales por las que pasa el suelo al irse secando y los límites de consistencia son las fronteras convencionales entre estos estados y están definidos por un contenido de humedad.

El límite entre esos estados se denomina límites de Consistencia y son:

Límite Plástico: % de contenido de humedad con que un suelo cambia al disminuir su humedad de la consistencia plástica a la semisólida, o, al aumentar su humedad de la consistencia semisólida a la plástica.

Límite Líquido: Es un contenido de humedad (%), que corresponde a la frontera entre los estados de consistencia semilíquido y plástico de un suelo.

$$LL = -a \cdot \ln(N^{\circ}) + b \quad \text{Ec. 3.3.}$$

Donde:

LL: Límite líquido en (%).

A y b: Contantes Características de la Curva (% Humedad vs N° Golpes).

N°: Número de golpes (25 golpes) para saber el % humedad en que se encuentra el Límite líquido.

Índice de Plasticidad: Es un parámetro físico que se relaciona con la facilidad de manejo del suelo, por una parte, y con el contenido y tipo de arcilla presente en el suelo.

$$IP = LL - LP \quad \text{Ec. 3.4.}$$

Donde:

IP: Índice de Plasticidad (%)

LL: Límite líquido (%)

LP: Límite Plástico (%)

Material

- Aparato de Casagrande
- Ranurador
- Espátula
- Recipiente
- Taras
- Placa de vidrio
- Horno a temperatura de 110° C
- Tamiz No 40
- Mínimo 100 gr. de suelo (pasa tamiz No 40)
- Balanza con precisión de 0,01 gr.

Metodología

Metodología Límite líquido de los suelos (ASTM D4318 AASHTO T89)

Se tomó 100 a 300 gr de material que pasa el tamiz No 40.

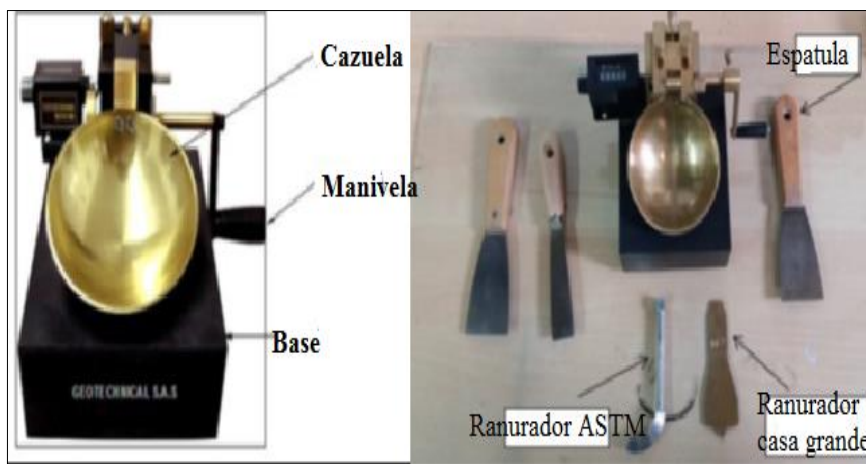
Este material tamizado puse en un recipiente, para posteriormente poner un poco de agua y mezclarlo cuidadosamente hasta lograr una pasta uniforme.

Procedí a poner dentro del aparato de Casagrande una pequeña cantidad de suelo, empareje la superficie de la pasta de suelo cuidadosamente con una espátula, y mediante el uso del ranurador, se cortó una ranura clara y recta, que separo completamente la masa del suelo en dos partes, luego se hace el conteo de golpes hasta que la masa se cierre.

Seguidamente hice un corte en la parte que se unió la muestra, extraje la porción del suelo entre los cortes para depositarlas en capsulas de donde se obtienen el peso, luego se llevó al horno.

De esta manera repetí 5 veces el mismo procedimiento haciendo variar la humedad del suelo de (15 a 35 golpes), con la finalidad de tener una gráfica fiable del comportamiento plástico del suelo para, todo esto para poder calcular el límite líquido a los 25 golpes.

Figura N° 3.10. Equipo Casa Grande



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.11. Ensayo límites de Atterberg (límite líquido)



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.12. Ensayo límites de Atterberg (límite líquido)



Fuente: Elaboración propia

Metodología Límite Plástico (ASTM D4318 AASHTO T90).

Para el límite plástico use la misma muestra preparada con agua y agregando material seco lo mezcle homogéneamente hasta que forme una consistencia plástica.

Procedí a tomar una porción de material y con las manos forme bolitas, luego rodando sobre el vidrio para forman rollitos de aproximadamente de 3mm.

Una vez que los rollitos presentaron agrietamientos, corte pequeños trocitos de material para llevarlos a las capsulas obteniendo su pesaje y posterior llevarlos al horno.

Figura N° 3.13. Ensayo límite líquido y límite plástico



Fuente: Elaboración propia

3.3.1.6.1 Resultado obtenido de la Consistencia de los suelos (Límites de Atterberg)

Tabla N° 3.6. Resultado de contenido de humedad (límites de Atterberg)

Ensayo		Muestra									
		Muestra 01 Prog 0+500	Muestra 02 Prog 1+000	Muestra 03 Prog 1+500	Muestra 04 Prog 2+000	Muestra 05 Prog 2+500	Muestra 06 Prog 3+000	Muestra 07 Prog 3+500	Muestra 08 Prog 4+000	Muestra 09 Prog 4+500	Muestra 10 Prog 5+000
Límites	L. Líquido (%)	50	50	NP	NP	22	25	29	29	25	42
	L. Plástico (%)	21	20	NP	NP	NP	NP	18	13	21	37
	I. de Plasticidad (%)	29	30	NP	NP	22	25	11	16	4	4

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas de contenido de humedad y el número de golpes llamadas Curva de fluidez ver en anexo B.6.

En la Tabla N° 3.6. Se observa que en la progresiva 1+500 y 2+000 no tiene límite líquido ni plástico, mientras tanto en la progresiva 2+500 y 3+000 solo tiene límite plástico, debido a la presencia de un suelo arenoso fino con contenido limoso

Mientras tanto el resto de las progresivas es arcilla, por ejemplo, añadiendo agua adquiere una consistencia similar a una pasta, y añadiendo más agua adquiere una consistencia fluida.

3.3.1.7. Clasificar el suelo por la norma AASHTO Y S.U.C.S.

Resumen de Clasificación

La caracterización de los suelos es muy importante en la presente investigación para poder terminar un comportamiento en los diferentes tipos de suelos utilizados se procedió a realizar el ensayo correspondiente para poder clasificarlos como ser: Granulometría, Hidrómetro, Límites de Atterberg, Peso Específico.

Material

- Granulometría del suelo
- Plasticidad del suelo
- Tablas de clasificación del AASHTO
- Tabla de clasificación del S.U.C.S.
- Carta de plasticidad

Tabla N° 3.7. Resultado de clasificación de los suelos.

Muestra		Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Muestra 04	Muestra 05	Muestra 06	Muestra 07	Muestra 08	Muestra 09	Muestra 10
		Prog 0+500	Prog 1+000	Prog 1+500	Prog 2+000	Prog 2+500	Prog 3+000	Prog 3+500	Prog 4+000	Prog 4+500	Prog 5+000
Ensayos											
Peso Especifico		2,55	2,55	2,52	2,52	2,50	2,55	2,72	2,70	2,65	2,53
Granulometría	% Pasa N° 40	97,33	97,13	77,93	78,13	80,53	80,50	82,13	83,00	84,03	81,17
	% Pasa N° 200	86,60	85,40	8,20	11,80	18,20	22,17	42,10	37,90	38,17	40,83
	% Limos	88,10	94,90	93,20	96,00	90,90	95,30	90,90	96,50	98,00	95,60
	% Arcilla	11,90	5,11	6,85	3,97	9,12	4,67	9,06	3,45	1,97	4,38

Muestra Ensayos		Muestra 01 Prog 0+500	Muestra 02 Prog 1+000	Muestra 03 Prog 1+500	Muestra 04 Prog 2+000	Muestra 05 Prog 2+500	Muestra 06 Prog 3+000	Muestra 07 Prog 3+500	Muestra 08 Prog 4+000	Muestra 09 Prog 4+500	Muestra 10 Prog 5+000
		Límites	L. Líquido (%)	50	50	NP	NP	22	25	29	29
L. Plástico (%)	21		20	NP	NP	NP	NP	18	13	21	37
I. de Plasticidad (%)	29		30	NP	NP	22	25	11	16	4	4
Clasificación	AASHTO	A-7-6(18)	A-7-6(18)	A-3(0)	A-3 (0)	A-2-6(0)	A-2-6(1)	A-6(2)	A-6(2)	A-4(1)	A-5(8)
	I. de Grupo	18	18	0	0	0	1	2	2	1	8
	S.U.C.S.	CH	CH	NP	NP	SC	SC	SC	SC	SM	SM

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en esta tabla son 4 tipos de suelos finos a lo largo de la avenida de estudio, con el uso de las tablas de clasificación sistema AASHTO y S.U.C.S. se pudo llegar a este resultado. Ver tablas de clasificación Cap. II

Tabla N° 3.7 Tipo de suelo

Tipo de suelo	
A-7-6(18)	Suelo arcilloso inorgánico
A-7-6(18)	
A-3(0)	Suelo con arena fina y contenido limoso
A-3 (0)	
A-2-6(0)	Arcilla mediana a alta plasticidad
A-2-6(1)	
A-6(2)	
A-6(2)	
A-4(1)	Suelos limoso
A-5(8)	

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Ensayo de compactación (AASHTO T272).

Antes de realizar el ensayo de compactación es importante conocer el contenido de humedad del suelo.

3.3.2.1. Contenido de humedad.

El método para determinar la humedad del suelo en laboratorio, existen varios métodos pero el más preciso es del secado al horno por ser un método estandarizado, donde la humedad del suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas solidad.

$$w(\%) = \frac{P_a}{P_{ss}} \cdot 100 \quad \text{Ec. 3.5.}$$

Donde:

$w(\%)$: Contenido de Humedad, en por ciento.

P_a : Peso del agua presente en el Suelo (gr)

P_{ss} : Peso del Suelo después del secado (gr)

Material

- Taras
- Balanza de precisión de 0,1 gr
- Horno

Metodología

Para el ensayo de contenido de humedad se empleó el método del horno que es un método estandarizado.

Se toma una muestra representativa, luego se coloca las muestras en unas cápsulas y se anota el valor del peso de la tara más el suelo húmedo.

Se debe colocar en el horno durante 24 horas, transcurrido el tiempo, se determina el peso de la tara más la muestra seca.

3.3.2.1.1 Resultado obtenido mediante el ensayo de contenido de humedad (método del horno).

Tabla N° 3.8. Resultado de humedades %

Muestra Ensayo	Muestra 01 Prog 0+500	Muestra 02 Prog 1+000	Muestra 03 Prog 1+500	Muestra 04 Prog 2+000	Muestra 05 Prog 2+500	Muestra 06 Prog 3+000	Muestra 07 Prog 3+500	Muestra 08 Prog 4+000	Muestra 09 Prog 4+500	Muestra 10 Prog 5+000
Contenido de humedad %	2,18	2,73	2,68	2,87	2,83	2,68	2,27	2,50	2,09	2,59

Fuente: Elaboración propia

El contenido de humedad que obtuve es un dato inicial que se usa para realizar el ensayo de compactación.

De esta manera también se observa los valores de humedad en las que se encontraba la subrasante de la Avenida Libertad del Barrio Fray Quebracho.

3.3.2.2. Ensayo de Compactación (AASHTO T272)

La compactación de suelos es el proceso artificial por el cual las partículas de suelo son obligadas a estar más en contacto las unas con las otras, mediante una reducción del índice de vacíos, empleando medios mecánicos, lo cual se traduce en un mejoramiento de sus propiedades ingenieriles. El agua juega un papel importante, especialmente en suelos finos. Es así como existe un contenido de humedad óptima para suelos finos, para el cual el proceso de compactación dará un peso máximo de suelo por unidad de volumen, es decir, un peso específico seco máximo.

Material

- Molde de forma cilíndrica
- Collarín para el molde

- Pistón o apisonador.
- Balanza.
- Horno eléctrico.
- Regla de acero para enrasar.
- Probeta
- Taras.
- Brocha
- Fuentes

Metodología

Tome una muestra haciendo pasar por el tamiz N° 4, la cantidad de muestra utilizada es de 15 Kg.

Seguidamente puse cinco bandejas cada una con 3 kg de muestra ya tamizada.

Haciendo uso de la humedad natural del suelo que se determinó con el ensayo del contenido de humedad, a partir de esta humedad inicial se incrementa agua a cada muestra para ir cambiando su densidad de acuerdo a los cambios de humedad.

Posteriormente se procede a pesar el molde que se utiliza para la compactación.

Para la primera muestra se compacto con un contenido de humedad inicial y con ayuda de una cuchara puse parte de esa muestra en el molde de compactación dando 56 golpes por capa, se realizó a 3 capas por molde.

Quitando el collarín del molde y haciendo uso de la regla de acero procedí a enrasar la muestra compactada que sobrepasa el molde, de esta manera obteniendo el peso de la muestra compactada más el molde, rápidamente se tomó una pequeña porción de muestra del centro del molde y fue pesada en una cápsula para luego llevarla al horno. Se repite el mismo procedimiento 5 veces, con la única diferencia de que en cada muestra se aumentará más agua para poder tener diferentes densidades y así poder realizar la curva de compactación.

Figura N° 3.14. Ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.15. Ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.16. Ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.17. Ensayo de compactación



Fuente: Elaboración propia

3.3.2.2.1 Resultado obtenido mediante el ensayo de Proctor T-180

En la presente tabla se realiza un resumen de los Resultado obtenido para distintos tipos de suelo, Proctor T-180.

Tabla N° 3.9. Resultado de Compactación

Muestra \ Ensayo	Densidad Máxima (gr/cm ³)	Humedad Óptima (%)
Muestra 01 Prog 0+500	1.73	11.03
Muestra 02 Prog 1+000	1.75	11.97
Muestra 03 Prog 1+500	1.78	7.59
Muestra 04 Prog 2+000	1.75	7.98
Muestra 05 Prog 2+500	1.87	10.07
Muestra 06 Prog 3+000	1.91	10.26
Muestra 07 Prog 3+500	1.97	7.06
Muestra 08 Prog 4+000	1.71	8.97
Muestra 09 Prog 4+500	1.74	10.93
Muestra 10 Prog 5+000	1.76	8.82

Fuente: Elaboración propia

Las gráficas de curva de compactación ver anexo C.1.

3.3.3. Ensayo para medir la conductividad in situ y en laboratorio.

Hay varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos: unos “directos”, así llamados porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición de tal coeficiente; otros “indirectos”, proporcionados, en forma secundaria, por pruebas y técnicas que primariamente persiguen otros fines.

3.3.3.1. Ensayo de permeabilidad in situ mediante el uso del permeámetro Guelph.

Este ensayo es un método directo de carga variable haciendo uso el Permeámetro Guelph que nos proporciona la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

El permeámetro Guelph es un instrumento de fácil manejo que permite medir in situ la conductividad hidráulica de una manera rápida y precisa. Permite obtener una evaluación exacta en todo tipo de suelo de la conductividad hidráulica. El equipo puede ser transportado, armado y operado fácilmente por una sola persona.

Figura N° 3.17. Permeametro Guelph



Fuente: Elaboración propia

Material

- Permeámetro Guelph
- Perforadores cilíndricos
- Cepillo
- Bidón de agua con capacidad de al menos 5 litros
- Cronómetro
- Huincha para medir

Metodología

Armado del Instrumento

Para el armado o ensamblaje de las piezas del equipo se usó los pasos del manual del Permeámetro Guelph.

Guía de trabajo

En primer lugar hice un reconocimiento del lugar donde se realizó la experiencia.

Posteriormente procedí a excavar un agujero cilíndrico de radio y profundidad constante, haciendo uso del Kit de herramientas para perforación, se construye el agujero de 6 cm de diámetro y de 30-40 cm de profundidad.

Se instala el permeámetro en el agujero con ayuda del trípode como se ve en la Figura N° 3.18.

Figura N° 3.18. Permeámetro Guelph



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.19. Ensayo de permeabilidad con el Permeámetro Guelph



Fuente: Elaboración propia

Luego se llenan los reservorios con agua usando el bidón plástico para saturar el suelo.

Una vez hecha la instalación, se levanta el tubo de Mariotte lentamente hasta el nivel deseado. Esto hará que se llene el agujero al mismo nivel indicado por la regla superior del permeámetro. Luego de que el nivel en el agujero se estabilizó comienza a bajar los niveles en el reservorio, el cual nos permite realizar las lecturas correspondientes obteniendo como datos la altura de descarga en un tiempo de 2 minutos, se deja de hacer lecturas cuando la tasa de infiltración me dé como dato 3 o más lecturas iguales.

De esta manera realice 7 pozos de permeabilidad in situ por cada tramo.

Tabla N° 3.10 Obtención de datos para la infiltración

Lectura con la altura de agua en el pozo (H) establecida a 10 cm				
Tiempo t (min)	Δt (min)	Nivel de agua en el reservorio h (cm)	Δh(cm)	Tasa de infiltración $\Delta h/\Delta t$ (cm/min)
0	0.00	27.70		
4	2.00	27.80	0.10	0.05
6	2.00	28.10	0.30	0.15
8	2.00	28.40	0.30	0.15
10	2.00	28.70	0.30	0.15
12	2.00	28.80	0.10	0.05
			R cm/s	0.00250

Fuente: Elaboración propia

Cálculo

Para hallar R la tasa de flujo en estado estacionario se alcanza cuando R es igual a 3 intervalos de tiempo consecutivo es decir $\Delta h/\Delta t$ debe tener 3 valores iguales consecutivos, el cual será el valor de R en cm/s obtenidos de la tabla de datos.

Donde

h: Nivel de agua en el reservorio (cm)

Δt : Intervalo de tiempo (min)

Δh : Diferencia de altura (cm)

$\Delta h/\Delta t$: Tasa de infiltración (cm/min)

R: tasa de infiltración en estado estacionario (cm/s)

Tabla N° 3.11. Resultado de tasa de infiltración in situ

PROGRESIVAS		0+500	1+000	1+500	2+000	2+500	3+000	3+500	4+000	4+500	5+000
Clasificación	AASTHO	A-7-6(18)	A-7-6(18)	A-3 (0)	A-3(0)	A-2-6(0)	A-2-6(1)	A-6 (2)	A-6 (2)	A-4(1)	A-5(8)
TASA DE INFILTRACIÓN IN SITU (cm/s)	1	0.002	0.003	0.003	0.014	0.018	0.010	0.010	0.010	0.008	0.017
	2	0.001	0.001	0.003	0.015	0.012	0.012	0.011	0.014	0.012	0.012
	3	0.002	0.001	0.003	0.014	0.020	0.010	0.011	0.013	0.012	0.008
	4	0.001	0.002	0.010	0.012	0.020	0.013	0.008	0.015	0.013	0.018
	5	0.004	0.004	0.005	0.013	0.020	0.010	0.012	0.016	0.015	0.015
	6	0.004	0.002	0.008	0.008	0.012	0.005	0.010	0.011	0.010	0.009
	7	0.00330	0.003	0.002	0.015	0.023	0.010	0.006	0.010	0.013	0.027
Promedio		0.002	0.002	0.005	0.013	0.018	0.010	0.010	0.013	0.012	0.015
Desviacion		0.001	0.001	0.003	0.002	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.006
Mínimo		0.001	0.001	0.002	0.008	0.012	0.005	0.006	0.010	0.008	0.008
Maximo		0.004	0.004	0.010	0.015	0.023	0.013	0.012	0.016	0.015	0.027

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.20. Realizando las lecturas en el Permeámetro Guelph



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.21. Reservorio interno y externo del equipo



Fuente: Elaboración propia

Ecuaciones calibradas para el permeámetro Guelph para hallar la conductividad hidráulica

Ecuación general caudal de infiltración:

$$Q = \frac{2\pi H^2}{c_1} kfs + \frac{+2\pi H}{c} \frac{Kfs}{\alpha^*} + \pi a^2 Kfs \quad \text{Ec. 3.6.}$$

Conductividad hidráulica:
$$Kfs = \frac{c_1 * Q_1}{2\pi H^2 + \pi a^2 c_1 + 2\pi \frac{H}{\alpha^*}} \quad \text{Ec. 3.7.}$$

Caudal de infiltración:
$$Q_2 = R_2 * 2,16 \quad \text{Ec. 3.8.}$$

Potencial de flujo matricio:
$$\Phi_m = \frac{c_1 * Q_1}{(2\pi H^2 + \pi a^2 c_1) \alpha^* + 2\pi H} \quad \text{Ec. 3.9.}$$

Donde

Q: Caudal de infiltración cm³/s.

R: tasa de infiltración en estado estacionario (cm/s).

Kfs: Coeficiente de permeabilidad.

Φ: Potencial de Flujo matricio.

C: Factor de la forma. Ver Tabla N° 3.12

a: Radio del hoyo del pozo. Dato proporcionado por el equipo

H: Altura de agua en el hoyo. Dato obtenido del campo

Datos del permeámetro Guelph

Radio del pozo (a) cm	3	Área reservorio interno	2,16	cm ²
Altura de agua dentro del pozo (H) cm	10	Área reservorio externo	35,39	cm ²

Tabla N° 3.12. Factor de la forma

Categoría de textura y estructura del suelo	α (cm)	Factor de la forma
Compactado, menos estructura, arcilloso o materiales limosos como tapas de rellenos sanitarios y revestimientos, sedimentos .	0.01	$C1 = \left(\frac{H1/a}{2.102 + 0.118(H1/a)} \right)^{0.655}$ $C2 = \left(\frac{H2/a}{2.102 + 0.118(H2/a)} \right)^{0.655}$

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.13. Resultados de caudal y conductividad hidráulica

Muestra	Tasa de flujo (R cm/s)	α (cm ²)	C ₁	PARCIALES			PROMEDIOS		
				Caudal de infiltración Q (cm ³ /s)	Potencial de flujo matrico Φ_m (cm ²)	Conductividad hidráulica in situ Kfs (cm/s)	Caudal de infiltración Q (cm ³ /s)	Potencial de flujo matrico Φ_m (cm ²)	Conductividad hidráulica in situ Kfs (cm/s)
0+500	0.002	0.01	1.21	0.01	62.83	9.40E-07	5.40E-03	6.28E+01	9.40E-07
	0.001		1.21	0.00	62.83	3.13E-07			
	0.002		1.21	0.00	62.83	6.27E-07			
	0.001		1.21	0.00	62.83	3.13E-07			
	0.004		1.21	0.01	62.83	1.57E-06			
	0.004		1.21	0.01	62.83	1.57E-06			
	0.003		1.21	0.01	62.83	1.25E-06			
1+000	0.003	0.01	1.21	0.01	62.83	9.40E-07	4.63E-03	6.28E+01	8.06E-07
	0.001		1.21	0.00	62.83	3.13E-07			
	0.001		1.21	0.00	62.83	3.13E-07			
	0.002		1.21	0.01	62.83	9.40E-07			
	0.004		1.21	0.01	62.83	1.57E-06			
	0.002		1.21	0.00	62.83	6.27E-07			
	0.003		1.21	0.01	62.83	9.40E-07			
1+500	0.003	0.01	1.21	0.01	62.83	1.25E-06	1.08E-02	6.28E+01	1.88E-06
	0.003		1.21	0.01	62.83	1.25E-06			
	0.003		1.21	0.01	62.83	1.25E-06			
	0.010		1.21	0.02	62.83	3.76E-06			
	0.005		1.21	0.01	62.83	1.88E-06			
	0.008		1.21	0.02	62.83	3.13E-06			
	0.002		1.21	0.00	62.83	6.27E-07			

Muestra	Tasa de flujo (R cm/s)	α (cm ²)	C ₁	PARCIALES			PROMEDIOS		
				Caudal de infiltración Q (cm ³ /s)	Potencial de flujo matricio Φ_m (cm ²)	Conductividad hidráulica in situ Kfs (cm/s)	Caudal de infiltración Q (cm ³ /s)	Potencial de flujo matricio Φ_m (cm ²)	Conductividad hidráulica in situ Kfs (cm/s)
2+000	0.014	0.010	1.21	0.031	62.832	5.33E-06	2.80E-02	6.28E+01	4.88E-06
	0.015		1.21	0.032	62.832	5.64E-06			
	0.014		1.21	0.031	62.832	5.33E-06			
	0.012		1.21	0.025	62.832	4.39E-06			
	0.013		1.21	0.027	62.832	4.70E-06			
	0.008		1.21	0.018	62.832	3.13E-06			
	0.015		1.21	0.032	62.832	5.64E-06			
2+500	0.018	0.010	1.21	0.040	62.832	6.89E-06	3.86E-02	6.28E+01	6.71E-06
	0.012		1.21	0.025	62.832	4.39E-06			
	0.020		1.21	0.043	62.832	7.52E-06			
	0.020		1.21	0.043	62.832	7.52E-06			
	0.020		1.21	0.043	62.832	7.52E-06			
	0.012		1.21	0.025	62.832	4.39E-06			
	0.023		1.21	0.050	62.832	8.77E-06			
3+000	0.010	0.010	1.21	0.022	62.832	3.76E-06	2.16E-02	6.28E+01	3.76E-06
	0.012		1.21	0.025	62.832	4.39E-06			
	0.010		1.21	0.022	62.832	3.76E-06			
	0.013		1.21	0.029	62.832	5.01E-06			
	0.010		1.21	0.022	62.832	3.76E-06			
	0.005		1.21	0.011	62.832	1.88E-06			
	0.010		1.21	0.022	62.832	3.76E-06			
3+500	0.010	0.010	1.21	0.022	62.832	3.76E-06	2.06E-02	6.28E+01	3.58E-06
	0.011		1.21	0.023	62.832	4.07E-06			
	0.011		1.21	0.023	62.832	4.07E-06			
	0.008		1.21	0.016	62.832	2.82E-06			
	0.012		1.21	0.025	62.832	4.39E-06			
	0.010		1.21	0.022	62.832	3.76E-06			
	0.006		1.21	0.013	62.832	2.19E-06			
4+000	0.010	0.010	1.21	0.022	62.832	3.76E-06	2.73E-02	6.28E+01	4.74E-06
	0.014		1.21	0.031	62.832	5.33E-06			
	0.013		1.21	0.027	62.832	4.70E-06			
	0.015		1.21	0.032	62.832	5.64E-06			
	0.016		1.21	0.034	62.832	5.95E-06			
	0.011		1.21	0.023	62.832	4.07E-06			
	0.010		1.21	0.022	62.832	3.76E-06			

3.3.3.2. Ensayo de densidad in situ.

Este ensayo se usa para determinar la densidad de los suelos compactos en terraplenes, bases y subbases de carreteras, viales, etc. Respecto a un porcentaje dado de la densidad máxima obtenida en el ensayo de compactación Proctor correspondiente al tipo de suelo que se ensayó.

Material

- Balanza
- Cono metálico con placa
- Envase de plástico con cono
- Cíncel
- Arena calibrada

Metodología

Tomar en cuenta la calibración del frasco para obtener el peso del equipo.

Calibración de la arena: esta debe ser limpia y tener una granulometría comprendida entre los tamices N°16 y N°30.

Secar el equipo y llenar con arena desde una altura de 2" por arriba del cono, en forma constante.

Hay que tomar intervalos de tiempo, durante el llenado de arena, y hacer girar sobre su propio eje el equipo, de tal manera que el acomodamiento de la arena sea uniforme en toda la sección del frasco.

Cuando ya se encuentre la arena al nivel de la llave de paso del cono, cerrar éste y proceder a pesar, para luego restar el peso del equipo y obtener el peso de la arena pura.

Inmediatamente calcular la densidad de la arena, dividiendo el peso de arena entre el volumen del frasco

Seguidamente sobre una superficie plana, volcar el equipo y proceder a abrir la llave de paso del cono, esperar que este se llene y cerrar la llave, luego proceder a pesar el equipo con el saldo de arena disponible.

La diferencia entre el peso del equipo lleno de arena y después de llenar el cono, nos proporciona el peso de arena disponible en el cono.

Metodología en el campo: Se limpia el sitio escogido, se instala la placa ajustando con clavos

Seguidamente se procedió a excavar un hoyo de profundidad de acuerdo al espesor de la capa compactada puede variar entre 15 a 20 cm.

El material extraído se guarda en una bolsa donde no pierda humedad, éste me sirve para obtener el peso de suelo húmedo retirado del hoyo.

Luego se ajusta la llave de paso, se vuelca el equipo y se instala sobre la placa, luego se abre la llave para dejar caer la arena en el hoyo.

Seguidamente se cierra la llave para proceder a pesar el equipo con el saldo de arena.

Figura N° 3.22. Densidad in situ método del cono de arena



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.23. Densidad in situ método del cono de arena



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.2.1 Resultado de densidad in situ método del cono de arena

En la presente tabla se realiza un resumen de los Resultado obtenido de densidades in situ que se realizó dos hoyos por progresiva, el promedio de ambos es muy importante para poder realizar el ensayo de permeabilidad a una densidad in situ.

Tabla N° 3.14. Resumen de densidad in situ

Muestra	Parciales				Promedio	
	Densidad pozo 1	Contenido de humedad %W	Densidad Pozo 2	Contenido de humedad %W	Densidad Promedio	Contenido de humedad %W
0+500	1.64	2.52	1.60	2.24	1.62	2.38
1+000	1.66	3.16	1.65	3.19	1.66	3.17
1+500	1.67	3.43	1.70	3.04	1.68	3.24
2+000	1.69	2.42	1.64	2.56	1.66	2.49
2+500	1.51	1.58	1.60	2.26	1.56	1.92
3+000	1.59	2.64	1.35	2.50	1.47	2.57
3+500	1.84	2.66	1.81	2.30	1.83	2.48

4+000	1.62	2.95	1.59	2.16	1.61	2.56
4+500	1.61	2.06	1.66	2.25	1.63	2.16
5+000	1.63	1.40	1.56	2.37	1.59	1.89

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 3.15. Densidades

Muestra	Densidad máxima seca	Densidad in situ
	gr/cm ³	gr/cm ³
0+500	1.73	1.62
1+000	1.75	1.66
1+500	1.78	1.68
2+000	1.75	1.66
2+500	1.87	1.56
3+000	1.91	1.47
3+500	1.97	1.83
4+000	1.71	1.61
4+500	1.74	1.63
5+000	1.76	1.59

Fuente: Elaboración propia

Los valores de densidad in situ son valores aproximados a los valores de densidad máxima seca obtenido de la compactación como podemos ver en la siguiente Tabla N°

3.15

3.3.3.3. Ensayo de permeabilidad en laboratorio mediante el uso del permeámetro de pared flexible en laboratorio (ASTMD 5084-90) en función de las densidades

Se presenta el permeámetro de pared flexible para suelos finos, tanto para las muestras inalteradas como compactadas (remoldeadas), cuya principal ventaja es la saturación de los suelos finos.

Material

- Permeámetro de pared flexible
- Preparación de la muestra
- Cronometro
- Fuentes

Metodología

Muestras remoldeadas (compactadas)

Basándome en la norma de ensayo ASTMD 5084-90 usé un cilindro de 7.5 cm de diámetro y una altura de 16 cm.

Antes de realizar este ensayo es importante tener los ensayos de compactación y densidad in situ del lugar en estudio.

Con las densidades in situ se entra a la curva de compactación para saber a qué humedad realizar el ensayo, de esta manera prepare los moldes a diferentes humedades.

Luego mezclé la muestra con el agua de manera uniforme y procedí a poner la muestra en el permeámetro de pared flexible. El remoldeado del espécimen se hizo en cinco capas y cada capa se compactará hasta llegar a la altura determinada ($h/5$).

Se toma como datos la altura de descarga en intervalo de tiempo de 2 segundos.

Este mismo procedimiento se usó para una densidad mínima.

Figura N° 3.24. Ensayo de permeabilidad con el permeámetro de pared flexible



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.25. Ensayo de permeabilidad con el permeámetro de pared flexible



Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.26. Permeámetro de pared flexible



Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3.1. Resultados obtenidos de conductividad hidráulica en laboratorio en función a la densidad in situ.

Para la obtención de los valores de conductividad se aplica la Ley de Darcy para carga variable.

Con las densidades in situ se podrá saber a qué humedad realizar el ensayo, de esta manera preparar los moldes a diferentes humedades

Método de la ley de Darcy

$$dv = k \cdot A \cdot i \cdot dt \quad \text{Ec. 3.10.}$$

$$K = 2,3 \frac{L \cdot a}{At} \cdot \log \frac{h_1}{h_2} \quad \text{Ec. 3.11.}$$

Donde

K: Conductividad hidráulica

a: Área del tubo vertical de carga

A: Área de la muestra

L: Longitud de la muestra

h₁: Carga hidráulica al principio de la prueba

h₂: Carga hidráulica al final de la prueba

t: tiempo requerido para que la carga hidráulica pase de h₁ a h₂

Tabla N° 3.16 Resultado de conductividad hidráulica en laboratorio en función a la densidad in situ.

Muestra	Tiempo (s)	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	Conductividad hidráulica K (cm/s)	Conductividad hidráulica "K" Promedio
0+500	1080	75.00	49.50	5.29E-07	3.25E-08
	1440	73.00	17.60	1.36E-06	
	1800	54.00	1.00	3.05E-06	
	1920	70.50	38.00	4.42E-07	
	1920	70.60	35.00	5.02E-07	
1+000	1560	99.20	96.90	2.07E-08	4.31E-08
	1920	73.60	71.70	1.87E-08	
	1920	50.00	47.50	3.67E-08	

	1560	40.70	38.00	6.05E-08	
	1440	30.20	27.80	7.90E-08	
1+500	1920	70.00	26.00	7.09E-07	5.78E-07
	1680	99.20	67.50	3.15E-07	
	1440	50.30	18.50	9.55E-07	
	1800	83.60	48.70	4.13E-07	
	1080	60.70	41.00	4.99E-07	
2+000	1800	78.00	54.20	2.78E-07	4.88E-07
	960	64.60	50.80	3.44E-07	
	1560	90.40	66.00	2.77E-07	
	1440	50.70	24.50	6.94E-07	
	1560	43.00	16.50	8.44E-07	
2+500	1560	85.00	61.30	2.88E-07	8.25E-07
	1200	70.30	10.00	2.23E-06	
	1560	58.00	34.00	4.71E-07	
	1440	45.70	23.10	6.51E-07	
	1200	50.30	33.10	4.79E-07	

Muestra	Tiempo (s)	h1 (cm)	h2 (cm)	Conductividad hidráulica K (cm/s)	Conductividad hidráulica "K" Promedio
3+000	1320	52.80	30.90	5.58E-07	6.53E-07
	1680	40.70	15.30	8.01E-07	
	1680	40.80	11.82	1.01E-06	
	1320	47.00	27.80	5.47E-07	
	1560	68.00	45.90	3.46E-07	
3+500	1680	80.10	54.70	3.12E-07	4.74E-07
	1440	50.80	27.40	5.89E-07	
	1440	60.30	37.20	4.61E-07	
	1920	90.10	58.70	3.07E-07	

	1440	45.30	21.70	7.03E-07	
4+000	1320	70.90	52.80	3.07E-07	4.62E-07
	1320	40.50	19.90	7.40E-07	
	1800	91.60	62.90	2.87E-07	
	1800	48.30	20.90	6.40E-07	
	1320	70.90	51.30	3.37E-07	
4+500	840	50.60	37.20	5.03E-07	5.14E-07
	1440	45.80	23.10	6.53E-07	
	1440	60.50	38.70	4.27E-07	
	1080	42.80	26.90	5.91E-07	
	1080	58.60	43.00	3.94E-07	
5+000	1440	52.20	30.50	5.13E-07	5.28E-07
	1440	70.40	49.30	3.40E-07	
	1320	48.90	27.80	5.88E-07	
	1080	62.50	46.30	3.82E-07	
	1080	70.60	55.00	3.18E-07	

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3.2 Resultado obtenido de conductividad hidráulica en laboratorio en función a la densidad máxima seca.

En la siguiente tabla se presenta valores de permeabilidad con el equipo de permeámetro de pared flexible, para una condición de densidad máxima obtenida del Proctor T180.

Tabla N° 3.17 Resultado de conductividad hidráulica en laboratorio en función a la densidad máxima seca.

Muestra	Tiempo (s)	h1 (cm)	h2 (cm)	Conductividad hidráulica K (cm/s)	Densidad máxima seca
---------	------------	---------	---------	-----------------------------------	----------------------

0+500	1080.00	75.00	73.90	1.88E-08	1.73
1+000	1680.00	90.30	87.60	2.48E-08	1.75
1+500	1080.00	77.30	74.70	4.35E-08	1.78
2+000	2000.00	53.60	51.20	3.15E-08	1.75
2+500	1080.00	41.30	39.80	4.71E-08	1.87
3+000	840.00	58.00	57.00	2.85E-08	1.91
3+500	840.00	89.60	87.20	4.44E-08	1.97
4+000	840.00	80.00	79.00	2.06E-08	1.71
4+500	1440.00	70.60	67.80	3.86E-08	1.74
5+000	1320.00	57.00	51.60	1.04E-07	1.76

Fuente: Elaboración propia

3.3.3.3.3 Resultados obtenido de conductividad hidráulica en laboratorio en función a la densidad media.

En la siguiente tabla se presenta valores de permeabilidad con el equipo de permeámetro de pared flexible, para una condición de densidad obtenida del Proctor T180.

Tabla N° 3.18 Resultados de conductividad hidráulica en laboratorio en función a la densidad media

Muestra	Tiempo (s)	h1 (cm)	h2 (cm)	Conductividad hidráulica K (cm/s)	Densidad media gr/cm ³
0+500	1080.00	45.60	44.80	2.25E-08	1.67
1+000	1680.00	50.30	48.50	2.98E-08	1.69
1+500	1080.00	40.20	39.30	2.88E-08	1.73

2+000	1680.00	52.60	50.00	4.15E-08	1.67
2+500	1080.00	56.90	39.00	4.81E-07	1.60
3+000	840.00	58.00	57.00	2.85E-08	1.50
3+500	840.00	70.00	67.50	5.95E-08	1.90
4+000	1080.00	56.30	53.50	6.49E-08	1.66
4+500	1440.00	70.60	67.80	3.86E-08	1.67
5+000	1440.00	70.60	67.80	3.86E-08	1.70

Fuente: Elaboración propia

3.4. Comparación de conductividad hidráulica in situ y en laboratorio.

Para poder tener un criterio de comparación que facilitará el análisis de los Resultado obtenido, se generaron gráficos donde se detallan los valores obtenidos de la conductividad hidráulica in situ y en laboratorio como se muestra en la Tabla N° 3.19

Tabla N° 3.19 Tabla de comparación de conductividad hidráulica in situ y de laboratorio

Muestra	Densidad in situ	Conductividad hidráulica en laboratorio	Conductividad hidráulica in situ	Clasificación	
	gr/cm ³	cm/s	cm/s		
0+500	1.62	3.25E-08	9.40E-07	A-7-6(18)	Suelo arcilloso inorgánico
1+000	1.66	4.31E-08	8.06E-07	A-7-6(18)	
1+500	1.68	5.78E-07	1.88E-06	A-3(0)	Suelo con arena fina y contenido limoso
2+000	1.66	4.88E-07	4.88E-06	A-3 (0)	
2+500	1.56	8.25E-07	6.71E-06	A-2-6(0)	Arcilla mediana a alta plasticidad
3+000	1.47	6.53E-07	3.76E-06	A-2-6(1)	
3+500	1.83	4.74E-07	3.58E-06	A-6(2)	
4+000	1.61	4.62E-07	4.74E-06	A-6(2)	
4+500	1.63	5.14E-07	4.48E-06	A-4(1)	Suelos limoso

5+000	1.59	4.28E-07	5.68E-06	A-5(8)	
Promedio	1.63	4.50E-07	3.75E-06		
Max	1.83	8.25E-07	6.71E-06		
Min	1.59	3.25E-08	8.06E-07		

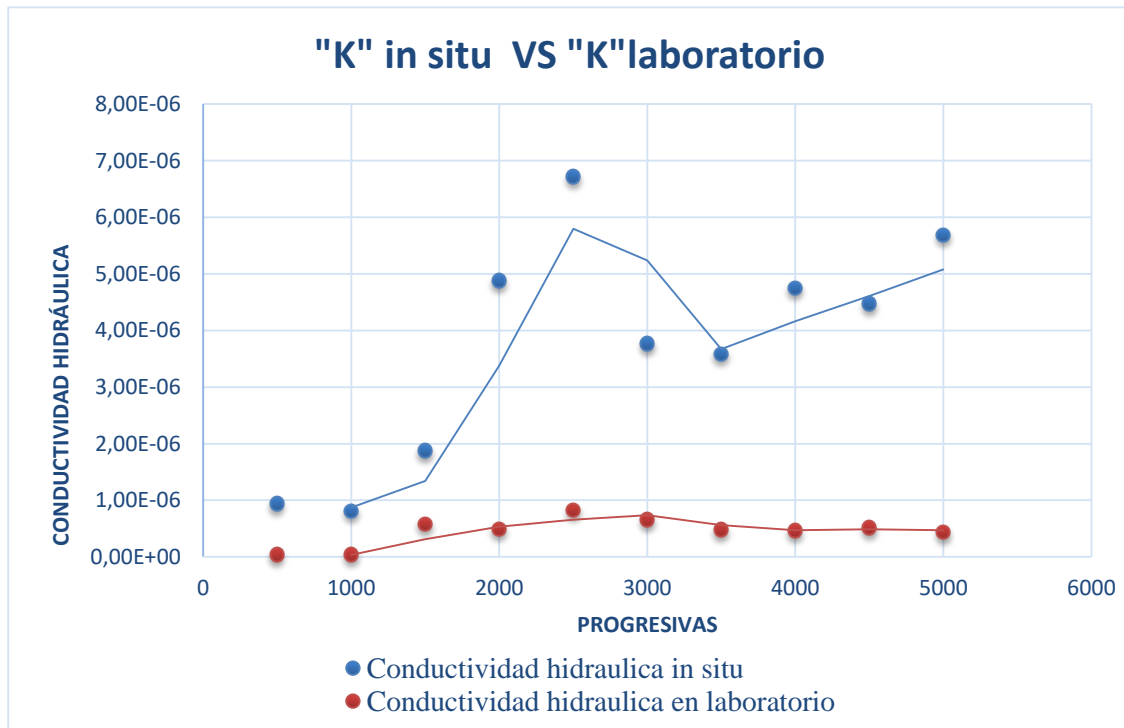
Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar en la tabla N° 3.19 del estudio de permeabilidad en la avenida en la cual se aplica este estudio a 4 diferentes tipos de suelos según la clasificación AASHTO, siendo estos suelos de arcillas inorgánica, arenas finas y limos.

Como se puede apreciar en la tabla N° 3.19 existe una variación de 3,3E-6 entre la conductividad hidráulica in situ y en laboratorio.

Por otra parte podemos observar que la conductividad hidráulica in situ presenta valores mayores a la conductividad hidráulica en laboratorio, esto debido a que el ensayo in situ literalmente es realizado en el mismo lugar donde se encuentra el objeto de análisis por lo tanto los valores de conductividad hidráulica in situ son valores del comportamiento real de la subrasante, mientras tanto el ensayo en laboratorio con el permeámetro de pared flexible recibe otro tratamiento que altera la estructura, la composición del suelo y que al realizar las lecturas presenta valores de infiltración menores.

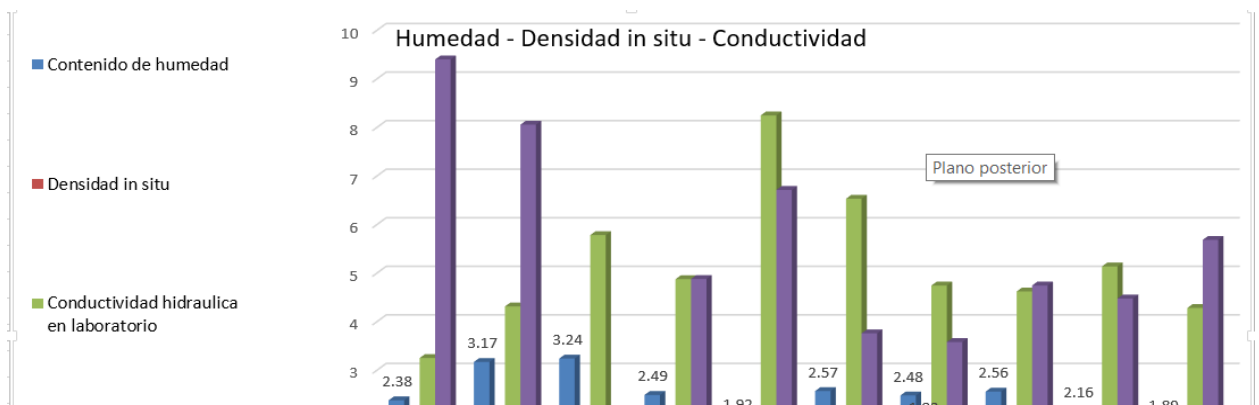
Figura N° 3.27. Análisis comparativo entre la conductividad hidráulica in situ y conductividad hidráulica de laboratorio



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con las gráficas, se puede observar que los valores obtenidos en laboratorio son menores a los valores obtenidos in situ ya que este es el que refleja el comportamiento de una manera más real y aproximada de los valores de la conductividad hidráulica, puesto que este considera en su análisis real de la subrasante.

Figura N° 3.28 Análisis de la conductividad hidráulica - densidad in situ – humedad



3.25E-08	4.31E-08	5.78E-07	4.88E-07	8.25E-07	6.53E-07	4.74E-07	4.62E-07	5.14E-07	4.28E-07
9.40E-07	8.06E-07	1.88E-06	4.88E-06	6.71E-06	3.76E-06	3.58E-06	4.74E-06	4.48E-06	5.68E-06

Fuente: Elaboración propia

En la Figura N° 3.28 muestra como varía la conductividad hidráulica respecto a la densidad y respecto a la humedad, la densidad máxima en el tramo es de 1,83gr/cm³ en la progresiva 3+500 y una mínima de 1,47 gr/cm³ en la progresiva 3+000

La conductividad hidráulica de la misma manera presenta valores diferentes a lo largo del tramo con una máxima de 6.71E-06 cm/s en la progresiva 2+500 y una mínima de 8.06E-07 cm/s en la progresiva 1+000.

Para el diseño de drenaje se puede considerar la permeabilidad promedio o en su efecto la mayor permeabilidad, en caso que exista una variación considerable de permeabilidad debe analizarse por tramo.

3.5. Determinación de la permeabilidad a diferentes densidades y grados de compactación.

Tabla N° 3.20. Valores conductividad hidráulica en función a sus densidades

Muestra	Densidad in situ	Conductividad hidráulica	Densidad	Conductividad hidráulica	Densidad máxima seca	Conductividad hidráulica	CLASIFICACIÓN AASTHO	
	gr/cm ³	cm/s	gr/cm ³	cm/s	gr/cm ³	cm/s		
0+500	1.62	3.25E-08	1.67	2.25E-07	1.73	1.78E-08	A-7-6(18)	Suelo arcilloso inorgánico
1+000	1.66	4.31E-08	1.69	2.18E-07	1.75	2.48E-08	A-7-6(18)	
1+500	1.68	5.78E-07	1.73	2.28E-07	1.78	4.35E-08	A-3(0)	Suelo con arena fina y contenido limoso
2+000	1.66	4.88E-07	1.67	4.15E-07	1.75	3.15E-08	A-3 (0)	
2+500	1.56	8.25E-07	1.50	4.81E-07	1.87	4.71E-08	A-2-6(0)	Arcilla mediana a alta plasticidad
3+000	1.47	6.53E-07	1.50	2.85E-07	1.91	2.85E-08	A-2-6(1)	
3+500	1.83	4.74E-07	1.90	5.95E-07	1.97	4.44E-08	A-6(2)	
4+000	1.61	4.62E-07	1.66	6.49E-07	1.71	2.06E-08	A-6(2)	
4+500	1.63	5.14E-07	1.67	3.86E-07	1.74	3.86E-08	A-4(1)	Suelos limoso
5+000	1.59	4.28E-07	1.70	3.86E-07	1.76	1.04E-07	A-5(8)	

Fuente: Elaboración propia

3.6. Selección del Mejor Modelo de Ajuste

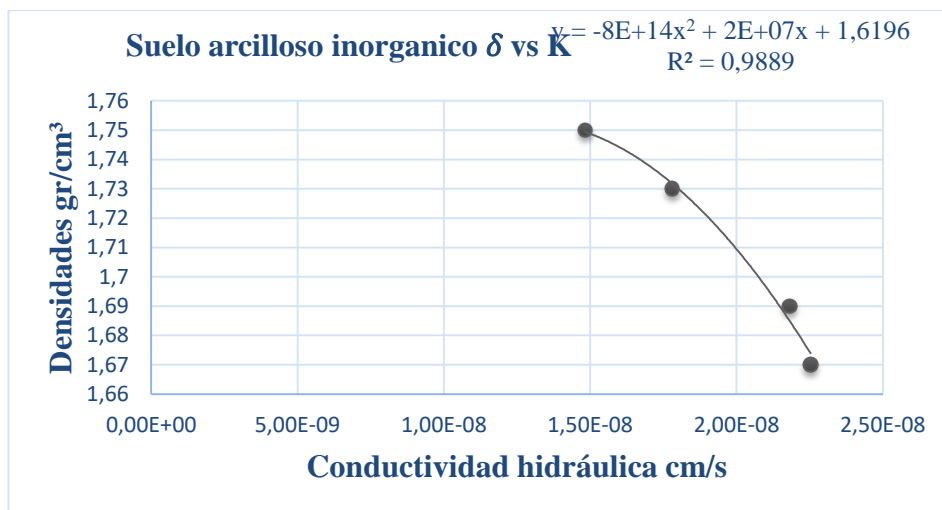
a) Determinación de la ecuación de correlación de Conductividad hidráulica y densidad, en la progresiva 0+500 a 1+000 con presencia de suelos arcillosos inorgánico.

Tabla N° 3.21. Valores Valores de “ δ ” VS “K” de suelos arcillosos Inorgánicos

Densidades gr/cm ³	Conductividad hidráulica "k" cm/s
1.73	1.78E-08
1.75	1.48E-08
1.67	2.25E-08
1.69	2.18E-08
1.62	3.25E-08
1.66	4.31E-08

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.29. Ecuación de correlación que refleje la permeabilidad a diferentes grados de densidad en suelos arcillosos inorgánicos



Fuente: Elaboración propia

Del análisis realizado se ha podido identificar que la ecuación presenta un mayor ajuste que refleja el comportamiento de la conductividad hidráulica vs la densidad es una ecuación polinómica de grado 2.

Para este tipo de suelo como se observa en la tabla 3.21 presenta una densidad menor con permeabilidad Max de 4.31E-08 cm/s y densidad mayor con una permeabilidad mínima de 1.78E-08 cm/s, teniendo una variación entre el Máximo y la mínima de 2,53E-08 cm/s.

b) Determinación de la ecuación de correlación de Conductividad hidráulica y densidad, en la progresiva 1+500 a 2+000 con presencia de suelo con arena fina y contenido limoso

Tabla N° 3.22. Valores de “ δ ” VS “K” de arenas finas con contenido limoso

Densidades gr/cm ³	Conductividad hidráulica "k" cm/s
1.78	4.25E-08
1.75	3.15E-08
1.73	2.28E-08
1.67	4.15E-07
1.68	4.78E-07
1.66	4.88E-07

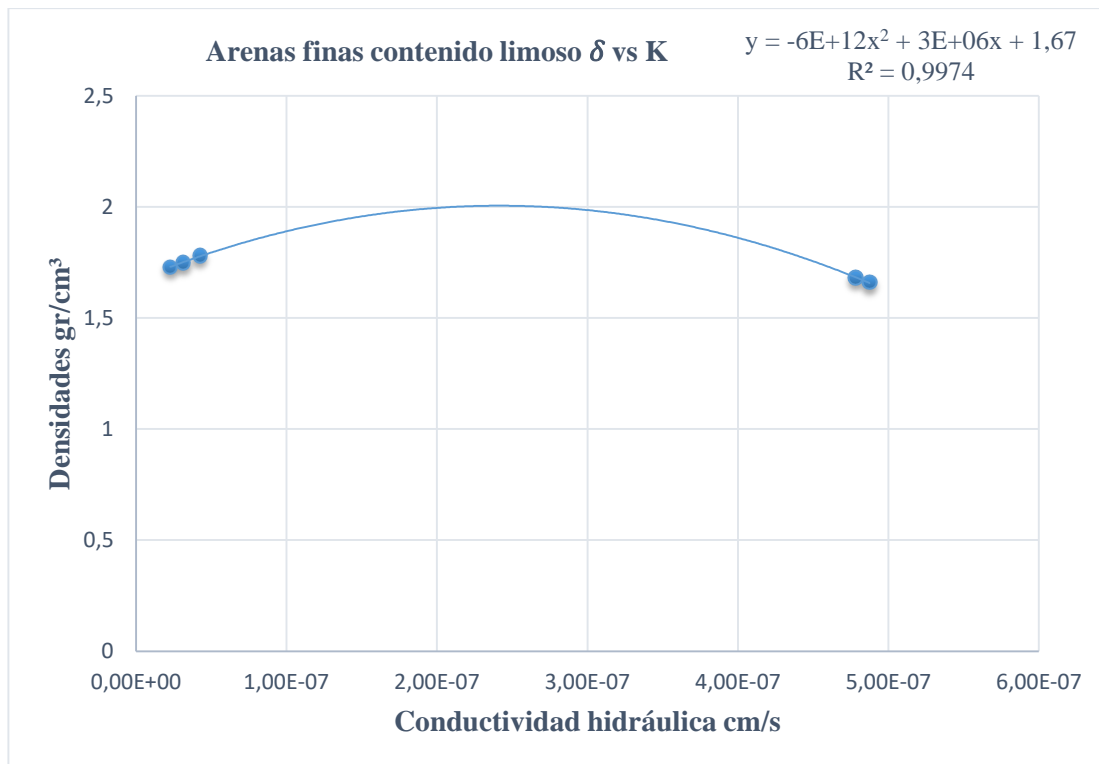
→ Valor depurado

Fuente: Elaboración propia

Densidades gr/cm ³	Conductividad hidráulica "k" cm/s
1.78	4.25E-08
1.75	3.15E-08
1.73	2.28E-08
1.68	4.78E-07
1.66	4.88E-07

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.30. Ecuación de correlación que refleje la permeabilidad a diferentes grados de densidad de arenas finas con contenido limoso



Fuente: Elaboración propia

En este análisis se observa que la ecuación presenta también un mayor ajuste que refleja el comportamiento de la conductividad hidráulica vs la densidad es una ecuación polinómica de grado 2.

Para este tipo de suelo como se observa en la tabla 3.22 presenta a menor densidad una permeabilidad Max de $4.88E-07\text{cm/s}$ y a mayor densidad una permeabilidad mínima de $2.28E-08\text{cm/s}$ teniendo una variación entre el Máximo y la mínima de $4,652E-07\text{cm/s}$.

c) Determinación de la ecuación de correlación de Conductividad hidráulica y densidad, en la progresiva 2+500 a 4+000 con presencia de arcilla de mediana a alta plasticidad

Tabla N° 3.23. Valores de “ δ ” VS “K” de arcilla de mediana a alta plasticidad

Densidades gr/cm ³	Conductividad hidráulica "k" cm/s
1.97	4.44E-08
1.9	5.95E-07
1.83	4.74E-07
1.71	2.06E-08
1.66	6.49E-07
1.61	4.62E-07
1.56	8.25E-07
1.87	4.71E-08
1.91	2.85E-08
1.50	4.81E-07
1.50	2.85E-07
1.47	6.53E-07

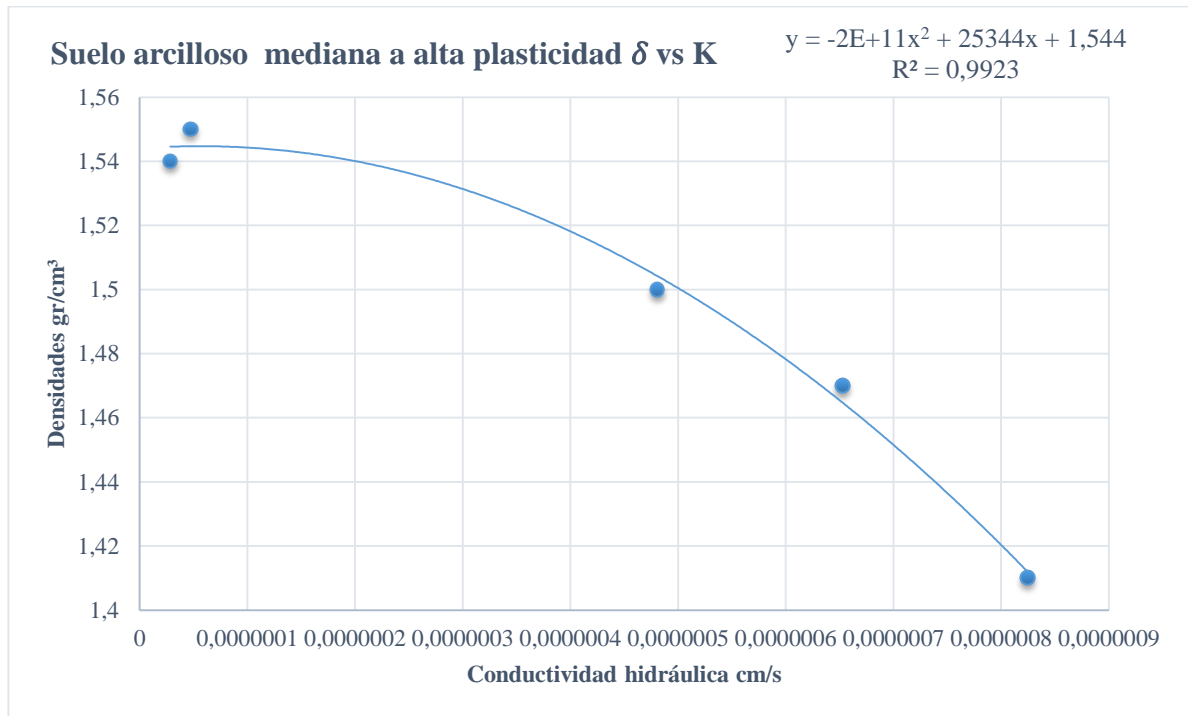
} Valor depurado

Fuente: Elaboración propia

Densidades gr/cm ³	Conductividad hidráulica "k" cm/s
1.91	2.85E-08
1.87	4.71E-08
1.50	4.81E-07
1.47	6.53E-07

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.31. Ecuación de correlación que refleje la permeabilidad a diferentes grados de densidad de arcilla de mediana a alta plasticidad



Fuente: Elaboración propia

En este análisis se observa que la ecuación presenta un mayor ajuste que refleja el comportamiento de la conductividad hidráulica vs la densidad es una ecuación polinómica de grado 2 al igual que las otras dos ecuaciones, la ecuación se ajusta depurando valores.

Para este tipo de suelo como se observa en la tabla 3.23 presenta a una menor densidad una permeabilidad Max de $6.53E-07$ cm/s, para una densidad mayor una permeabilidad mínima de $2.846E-08$ cm/s teniendo una variación entre el Máximo y la mínima de $6.25E-07$

d) Determinación de la ecuación de correlación de Conductividad hidráulica y densidad, en la progresiva 4+500 a 5+000 con presencia de suelo limoso

Tabla N° 3.24. Valores de “ δ ” VS “K” para un suelo limoso

Densidades gr/cm ³	Conductividad hidráulica "k" cm/s
1.76	1.04E-07
1.74	3.86E-08
1.67	3.86E-07
1.70	3.86E-08
1.63	5.14E-07
1.59	5.28E-07

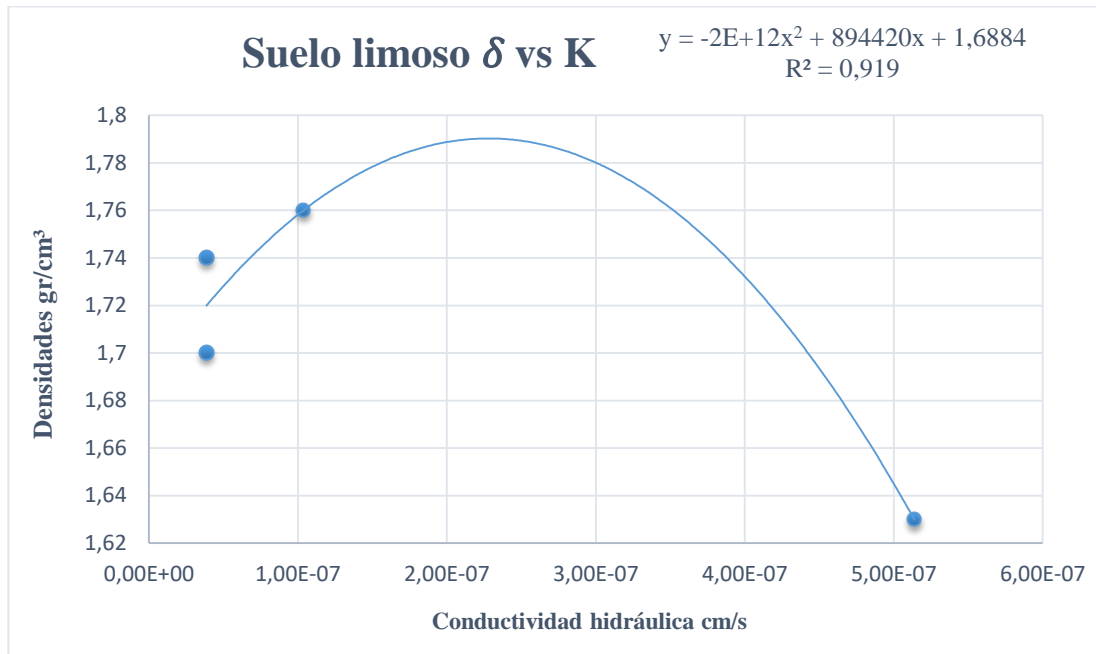
→ Valor depurado

Fuente: Elaboración propia

Densidades gr/cm ³	Conductividad hidráulica "k" cm/s
1.76	1.04E-07
1.74	3.86E-08
1.70	3.86E-08
1.63	5.14E-07
1.59	5.28E-07

Fuente: Elaboración propia

Figura N° 3.32. Ecuaciones de correlación que reflejen la permeabilidad a diferentes grados de densidad para un suelo limoso



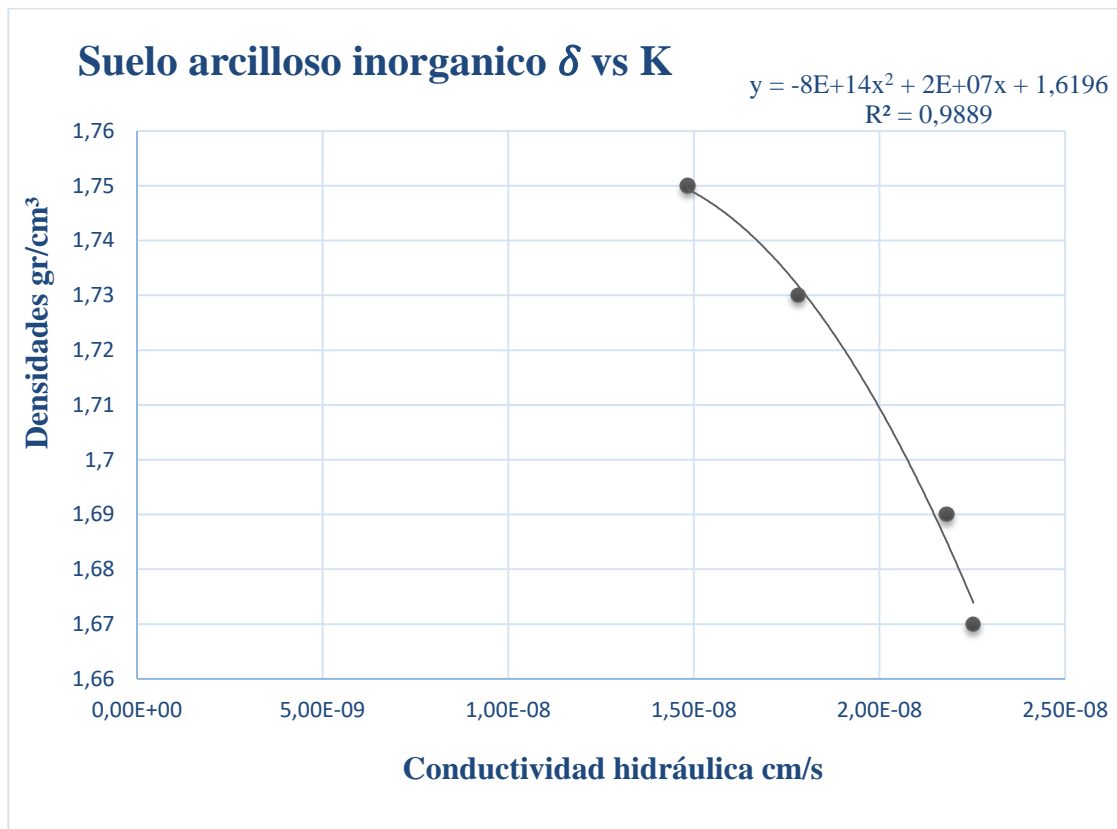
Fuente: Elaboración propia

Del análisis realizado se ha podido identificar que la ecuación presenta un mayor ajuste que refleja el comportamiento de la conductividad hidráulica vs la densidad es una ecuación polinómica de grado 2.

Para este tipo de suelo como se observa en la tabla 3.24 presenta una menor densidad con una permeabilidad Max de 5.282E-07 cm/s, para una mayor densidad una permeabilidad mínima de 3.863E-08 cm/s teniendo una variación entre el Máximo y la mínima de 4,36E-06 cm/s.

3.7. Correlaciones de la permeabilidad con la densidad para el diseño de drenes

Figura N° 3.33. Correlación para un suelo A-7-6(18) de la progresiva 0+000 a 0+500



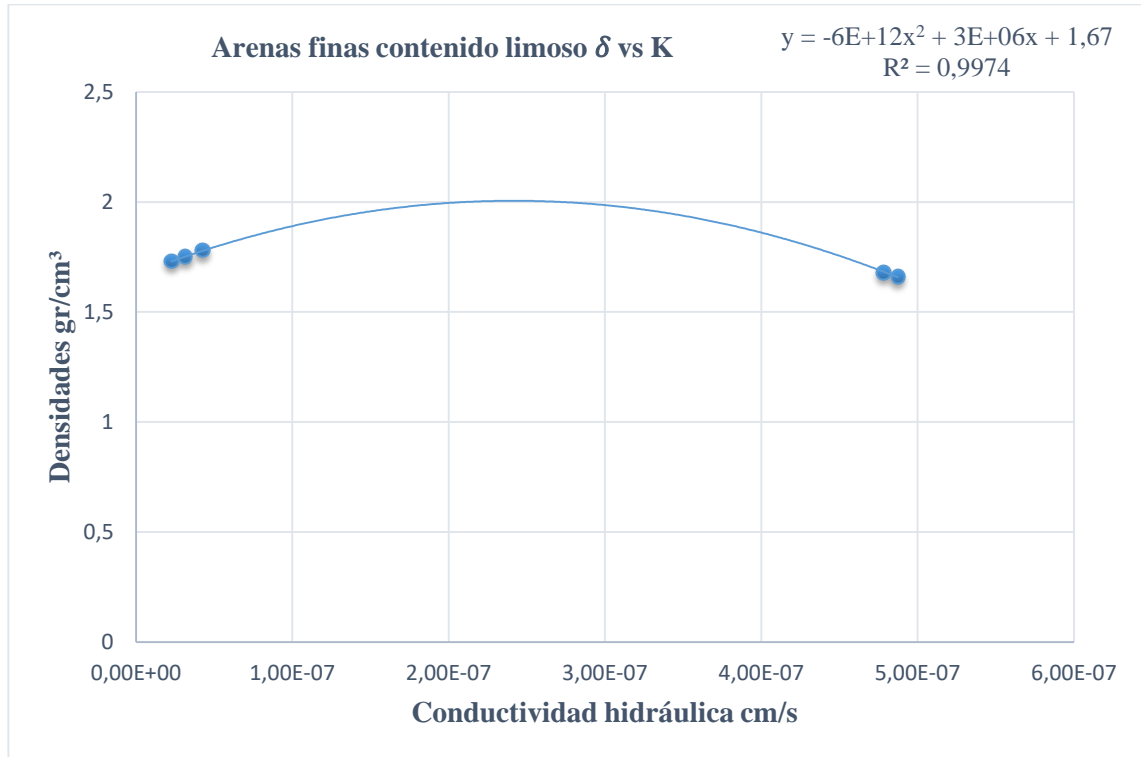
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 3.33. Se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la ecuación que representa el comportamiento de la conductividad hidráulica vs densidad es una ecuación polinómica de grado 2.

$$y = -8E+14x^2 + 2E+07x + 1.6196 \quad \text{Ec. 3.12.}$$

Con una correlación de 0.988 se considero esta ecuación aplicable para nuestro análisis ya que es un valor de correlación aceptable

Figura N° 3.34. Correlación para un suelo A-3(0) de la progresiva 1+500 a 2+000



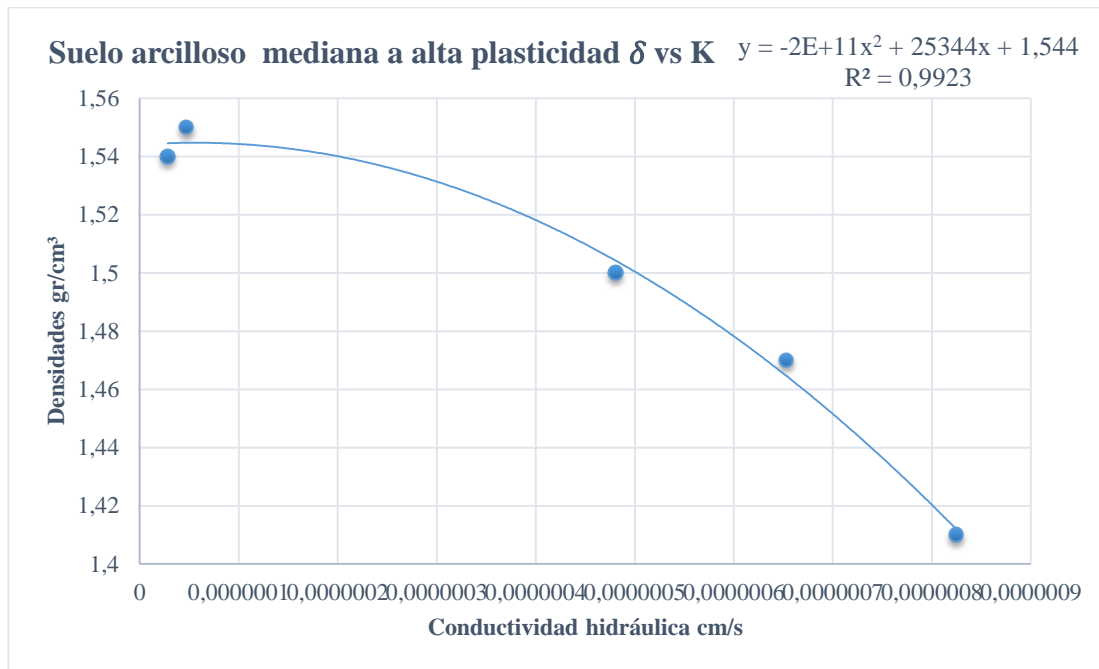
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 3.34. Se puede observar que la línea de tendencia obtenida es una ecuación de tipo polinómica de orden 2.

$$y = -6E+12x^2 + 3E+06x + 1.67 \quad \text{Ec. 3.13.}$$

No existe mucha diferencia de la otra ecuación, se puede observar que esta ecuación posee también una correlación de 0.997, la cual se adecúa para tener un criterio de análisis para un diseño de drenaje.

Figura N° 3.35. Correlación para un suelo A-2-6(1) y A-6 (2) de la progresiva 2+500 a 4+000



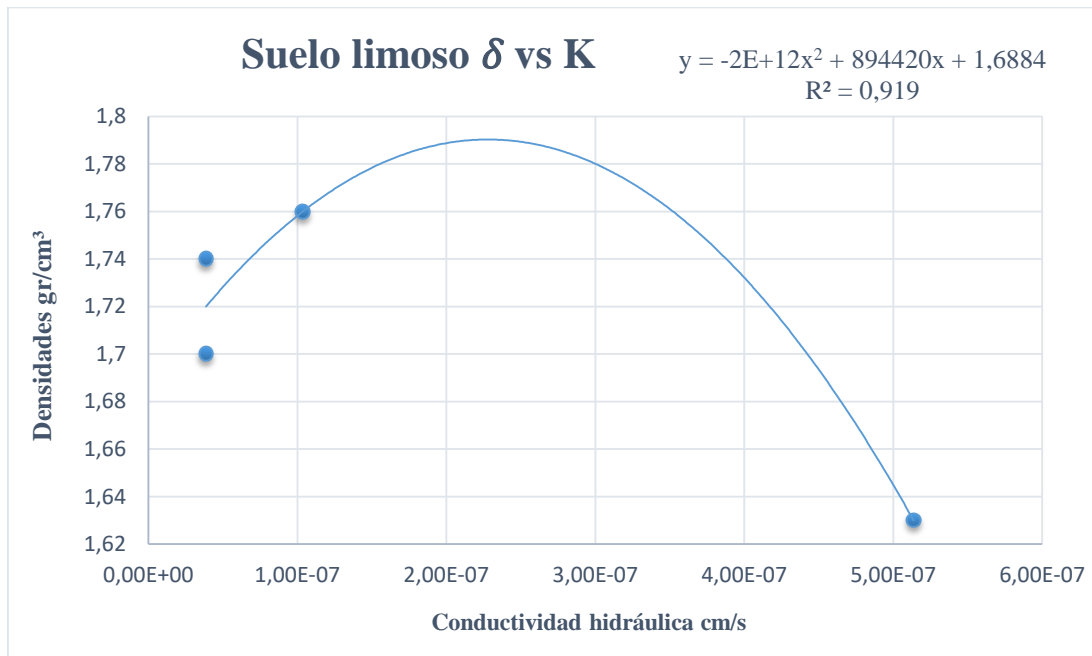
Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 3.35. Se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce una ecuación polinómica de orden 2, con una correlación de $R^2 = 0.9923$

$$y = -2E+11x^2 + 25344x + 1.544 \quad \text{Ec. 3.14.}$$

A diferencia de las otras dos ecuaciones, se puede observar que esta ecuación posee una correlación de 0.992, la cual se adecua para tener un criterio de análisis para un diseño de drenaje.

Figura N° 3.36. Correlación para un suelo A-4(1) y A-5(8) de la progresiva 4+500 a 5+000.



Fuente: Elaboración propia

En la figura N° 3.36. Se puede observar que la línea de tendencia obtenida produce la siguiente ecuación del tipo polinómica de orden 2, con una correlación de $R^2 = 0.9976$.

$$y = -2E+12x^2 + 894420x + 1.6884 \quad \text{Ec. 3.15.}$$

A diferencia de las otras dos ecuaciones, se puede observar que esta ecuación posee una correlación de 0.919, la cual se adecua para tener un criterio de análisis para un diseño de drenaje.

Tabla N° 3.25. Resumen de correlaciones

Tipo de suelo		Correlación polinómica	Ecuación polinómica
A-7-6(18)	Suelo arcilloso inorgánico	0.988	$y = -8E+14x^2 + 2E+07x + 1.6196$
A-7-6(18)			
A-3(0)	Suelo con arena fina y contenido limoso	0.997	$y = -6E+12x^2 + 3E+06x + 1.67$
A-3 (0)			
A-2-6(0)	Arcilla mediana a alta plasticidad	0.992	$y = -2E+11x^2 + 25344x + 1.544$
A-2-6(1)			
A-6(2)			
A-6(2)			
A-4(1)	Suelos limoso	0.919	$y = -2E+12x^2 + 894420x + 1.6884$
A-5(8)			

Fuente: Elaboración propia

3.8. Diseño de drenaje subterráneo

Se ha elaborado el diseño de un sistema de drenaje subterráneo de tipo longitud, considerando los parámetros geométricos del tramo como ser Bombeo transversal de la plataforma y pendiente longitudinal.

Diseño hidrológico

Siendo el estudio hidrológico uno de los parámetros más importantes dentro del diseño de drenajes subterráneos, se ha realizado un análisis minucioso de mismo.

Recopilación de información

Tabla N° 3.26. Recopilación de información

Estación	Distancia km	Periodo	Condición	Observación
Las Barrancas	2.65	2006 - 2009	Descartada	No cuenta con un registro suficiente
El Tejar	5.7	1970 - 2015	Seleccionada	-
Aeropuerto	6.4	1944 - 2016	Seleccionada	-

Fuente: Elaboración propia

Con el fin de realizar un análisis más preciso, se decidió trabajar con la estación Aeropuerto ASSANA Tarija, ya que se cuenta con un amplio registro de precipitaciones.

Para el análisis de intensidades se aplicó el criterio de Grobe, conocido como de Dyck y Peschke. Este criterio se ha desarrollado para realizar el análisis a partir de precipitaciones totales en este caso precipitaciones máximas en 24hs.

Ecuación de Intensidad máxima

$$I_{max} = \frac{129.1913 * T^{0.7142}}{D^{0.75}} \quad \text{Ec. 3.16.}$$

La intensidad máxima fue determinada para un tiempo de retorno de 10 años y una duración de 20 minutos, valores adoptados en función al tipo de obra en este caso Obra de drenaje.

$$I: 0.00196498 \text{ cm/s}$$

Drenaje subterráneo progresiva 2+500

Diseño hidráulico

Previo al análisis hidráulico se debe determinar la profundidad del drenaje subterráneo ya que el aporte por el abatimiento del nivel freático está directamente ligado a dicha profundidad. La profundidad fue definida a partir de los criterio del flujo en el suelo, tomando como criterio único que las líneas de flujo no alcancen o superen el nivel de la capa subrasante lo cual pondría en riesgo la estabilidad de la plataforma.

Profundidad del drenaje

N_d : 135,00 cm con respecto al nivel de la subrasante.

El sistema hidráulico se realizó siguiendo el procedimiento ya mencionado en el capítulo anterior dando como resultado el siguiente caudal de diseño, tomando como parámetros de diseño factores en función al mantenimiento y/o estado del pavimento, las características de la capa base y la respectiva intensidad de diseño para la zona en estudio.

Q_T : 711,41 cm³/s

Solo se contempla la infiltración en la superficie de la plataforma y el caudal por abatimiento, ya que la topografía de la zona en estudio no presenta condiciones para generar un caudal debido al escurrimiento en los taludes.

Diseño estructural

El diseño estructural consiste en determinar las dimensiones mínimas de la sección transversal del drenaje subterráneo, mismas que tienen que tener la capacidad para poder evacuar el caudal de diseño.

Para determinar las dimensiones del filtro, se determinó utilizar como material drenante Grava de 19 mm (3/4 pulg) de diámetro por ser un material muy común en nuestro medio. Teniendo definido el material de filtro se pudo estimar la velocidad del flujo en el filtro.

Con estos parámetros se pudo determinar las siguientes dimensiones:

b : 60,00 (cm)

h_{min} : 21,56 (cm)

Considerando la altura mínima calculada, el área que va a ocupar la tubería que ira emplazada dentro del dren y que la superficie superior será compactada provocando posibles daños a la tubería. Se ha adoptado la siguiente altura.

h: 60,00 (cm)

Para mejorar el funcionamiento y prolongar la vida útil del drenaje subterráneo, se determinó incorporar una tubería dentro de la sección del filtro aumentando la velocidad de descarga evitando el depósito de material fino dentro del filtro provocando la colmatación.

La tubería tiene un diámetro de 15 cm, diámetro mínimo establecido para soportar la reducción de resistencia a causa de las perforaciones Ver anexo G

Se ha elaborado el presupuesto del sistema de drenaje subterráneo de tipo longitud, Ver anexo G.10.

Segundo diseño de drenaje en la progresiva 4+000

Para realizar el cálculo de este drenaje subterráneo, solo se contemplan los aportes por infiltración del pavimento y el aporte de la escorrentía superficial de las laderas. El aporte por escorrentía superficial se lo ha tomado en cuenta considerando que las cunetas será de zampeado de piedra y hormigón el cuya infiltración es elevada, por este motivo se estableció que el 20 % del aporte total será infiltrada a través de la cuneta y el 80 % restante será evacuada de manera superficial a través de la cuneta.

El sistema hidráulico se realizó siguiendo el procedimiento ya mencionado en el capítulo anterior dando como resultado el siguiente caudal de diseño, tomando como parámetros de diseño factores en función al mantenimiento y/o estado del pavimento, las características de la capa base y la respectiva intensidad de diseño para la zona en estudio.

Qinf: 412.65 cm³/s Caudal por infiltración en el pavimento

Qes: 1432.47 cm³/s Caudal por aporte de la escorrentía superficial

Qt: 1845.12 cm³/s Caudal de diseño

Diseño estructural

El diseño estructural consiste en determinar las dimensiones mínimas de la sección transversal del drenaje subterráneo, mismas que tienen que tener la capacidad para poder evacuar el caudal de diseño.

Para determinar las dimensiones del filtro, se determinó utilizar como material drenante Grava de 19 mm (3/4 pulg) de diámetro por ser un material muy común en nuestro medio. Teniendo definido el material de filtro se pudo estimar la velocidad del flujo en el filtro.

Con estos parámetros se pudo determinar las siguientes dimensiones:

B: 60 cm Para la base del drenaje se adoptó 60 cm tomando en cuenta el ancho del cucharón ya que la excavación será realizada con maquinaria.

b 60,00 cm

h_{\min} 55.91 cm asumido 60.00 cm

Considerando que el drenaje subterráneo no tendrá aporte por nivel freático, se determinó que la profundidad del drenaje será igual a la profundidad o altura del material drenante 60 cm y emplazada por debajo de las cunetas para poder captar de mejor forma la cantidad de agua filtrada.

3.9. Análisis de costos

Precios unitarios

Los precios unitarios han sido desarrollados utilizando precios de mano de obra y materiales actuales, dando cumplimiento a las normativas vigentes de las leyes sociales y tributarias.

A continuación se detallan los componentes de los precios unitarios:

1 Materiales.

2 Mano de obra.

Cargas sociales (67.00% de subtotal mano de obra).

Impuestos IVA (14.94% del subtotal mano de obra + cargas sociales).

3 Equipo maquinaria y herramientas.

Herramientas menores (5.00% de total mano de obra).

4 Gastos generales y administrativos.

Gastos generales (10% de 1+2+3).

5 Utilidad.

Utilidad (10.00% de 1+2+3+4).

6 Impuestos.

Impuestos IT (3.09% de 1+2+3+4+5).

7 Total precio unitario.

(Suma 1+2+3+4+5+6). Véase: Anexo G.9. Precios unitarios.

Presupuesto

A continuación se presenta un resumen del presupuesto general por módulos en Bs.

Tabla N° 3.27. Presupuesto

N°	Descripción	Und.	Cantidad	Unitario	Literal	Parcial
MÓDULO - DRENAJE						
>	SUBTERRANEO					2,770.52
1	REPLANTEO Y CONTROL LINEAL	m	220.00	11.74	Once 74/100	2,582.80
2	EXCAVACIÓN C/MAQUINARIA	m ³	140.34	25.86	Veinticinco 86/100	3,629.19
3	FILTRO C/MATERIAL SELECCIONADO	m ³	82.66	282.65	Doscientos Ochenta y Dos 65/100	23,363.85
4	PROV. Y TEND. DE TUBERIA PERFORADA	m	130.00	201.48	Doscientos Uno 48/100	26,192.40
5	RELLENO Y COMPACTADO C/SALTARIN	m ³	58.50	89.55	Ochenta y Nueve 55/100	5,238.68
6	CABEZAL DE DRENAJE SUBTERRANEO	pza	4.00	1,684.77	Un Mil Seiscientos Ochenta y Cuatro 77/100	6,739.08
Total presupuesto:						67,746.00

Fuente: Elaboración propia

Son: Sesenta y Siete Mil Setecientos Cuarenta y Seis Bolivianos

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se logró realizar la caracterización del suelo subrasante de la Av. Libertad del Barrio Fray Quebracho encontrando 4 diferentes tipos de suelos como ser arcillosos y arena fina con contenido limoso.
- Mediante la aplicación del permeámetro de Guelph se pudo establecer la conductividad hidráulica de manera práctica y precisa obteniendo valores representativos para diferentes los tipos de suelos que compone la capa subrasante analizada.
- Fue posible realizar ensayos de la permeabilidad (conductividad hidráulica) en el laboratorio utilizando un permeámetro de pared flexible norma del ensayo ASTM D 5084-90 hechas a través de muestras remoldeadas.
- Como resultado del análisis comparativo se pudo evidenciar que usando el permeámetro Guelph se obtiene valores de permeabilidad más altos que en laboratorio debido a que en laboratorio se trabajan con muestras alteradas tanto estructura como en composición o granulometría ya que la muestra pasa por procesos de tamizado y compactado lo que hace que tenga valores de permeabilidad menores que en el ensayo in situ
- Como resultado del análisis comparativo se dio la similitud o proximidad de valores de conductividad hidráulica en laboratorio con in situ, esto nos permite realizar ensayos de permeabilidad en laboratorio a diferentes densidades mínima media y máxima seca para desarrollar una ecuación de correlación que nos permita determinar la permeabilidad en función a la densidad de manera rápida para diferentes densidades que se puede presentar a los largo de una subrasante.
- Como se pudo observar en esta investigación, la conductividad hidráulica de una subrasante se caracteriza por variar su comportamiento según el tipo de suelo y según su densidad, la permeabilidad se vio afectada por la densidad en

los ensayos realizados en los diferentes tipos de suelos que se presentó a lo largo de la subrasante.

- Es importante recalcar, que al realizar el ensayo de permeabilidad con el permeámetro Guelph la mayor ventaja es el tiempo al momento de realizar el ensayo y más práctico para obtener valores más reales haciendo uso de las ecuaciones calibradas del manual de operaciones. El Permeámetro Guelph se puede usar en cualquier lugar donde se puede barrenar un hoyo en el suelo. Estas instrucciones presentan un método generalizado para determinar la conductividad hidráulica de un suelo. Debido a las mejoras prácticas incorporadas en la operación del Permeámetro Guelph y al avanzado análisis que la teoría provee, es idealmente adecuado para aplicaciones que envuelven el diseño de: Sistemas de Irrigación, sistemas de drenaje, canales, depósitos, rellenos sanitarios, instalaciones de tratamiento de tierras, áreas de relaves, sitios de almacenamiento de desechos peligrosos, sistemas de tanques sépticos, sondeos y estudios de suelos e hidrología.
- Se puede concluir con la entrega del manual de operación del “Permeámetro Guelph” mismo que será para la utilización y la aplicación de este instrumento ya que será de gran beneficio para los profesionales del medio, estudiantes de la carretera y por ende lograr el grado académico en licenciatura en la ingeniería civil.

4.2. RECOMENDACIONES

A continuación se pueden señalar las siguientes recomendaciones para este trabajo de investigación:

- Se recomienda antes de aplicar el permeámetro Guelph, hacer la caracterización del suelo donde aplicaremos en ensayo de permeabilidad.
- Para el ensayo de permeabilidad con el permeámetro Guelph se recomienda que se pueda usar en cualquier lugar donde se puede barrenar un hoyo en el suelo.
- Revisar el instrumento antes de su uso, para asegurarse de que todas las piezas estén ajustadas, así proceder a una correcta lectura.

- En la prueba de permeabilidad, mantener el instrumento en posición vertical, caso contrario se debe nivelar con el nivel que proporciona el equipo.
- Se recomienda eliminar la presencia de aire en el reservorio del permeámetro, deben tomarse las precauciones necesarias para evitar burbujas dentro del tubo y así proceder a realizar lecturas correctas.
- Los intervalos de los tiempos de medición deberán ser los que se consideren necesarios para la correcta interpretación de resultados.