



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

**FACULTAD AGROPECUARIA Y DE RECURSOS  
NATURALES RENOVABLES**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**TÍTULO**

**“ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE  
ARCILLAS EXISTENTES EN EL CANTÓN GONZANAMÁ COMO  
MATERIAL IMPERMEABILIZANTE EN PEQUEÑOS EMBALSES  
DE USO AGRÍCOLA”**

*Tesis de grado previa a la  
obtención del título de Ingeniero  
Agrícola*

**AUTOR:**

Leonso Ismael González González

**DIRECTOR:**

Ing. María del Cisne Veintimilla Ortega Mg. Sc.

**1859**  
**LOJA – ECUADOR**

**2020**

## CERTIFICACIÓN DE DIRECTOR DE TESIS

Ing. María del Cisne Veintimilla Mg. Sc.

**DOCENTE DE LA FACULTAD AGROPECUARIA DE RECURSOS NATURALES  
RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.**

### **CERTIFICA:**

En calidad de directora de tesis titulada “**ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE ARCILLAS EXISTENTES EN EL CANTÓN GONZANAMÁ COMO MATERIAL IMPERMEABILIZANTE EN PEQUEÑOS EMBALSES DE USO AGRÍCOLA**”, de la autoría del señor egresado de la carrera de Ingeniería Agrícola Leonso Ismael González González, ha concluido de acuerdo al cronograma aprobado y autorizo se continúe con el trámite de graduación.

Loja 20 de febrero de 2020



Ing. María del Cisne Veintimilla Mg. Sc.

**DIRECTORA DE TESIS**

## CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

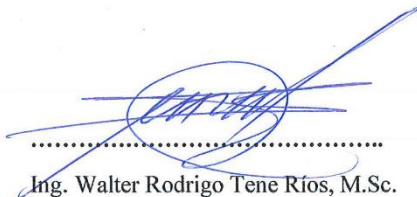
En calidad de tribunal calificador de la tesis titulada, “**ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE ARCILLAS EXISTENTES EN EL CANTÓN GONZANAMÁ COMO MATERIAL IMPERMEABILIZANTE EN PEQUEÑOS EMBALSES DE USO AGRÍCOLA**”, de autoría del señor egresado de la carrera de Ingeniería Agrícola, **Leonso Ismael González González**, certificamos que se ha incorporado al trabajo final de tesis, todas las sugerencias efectuadas por sus miembros, por lo que autorizamos su impresión y publicación.

Loja, 29 de julio del 2020



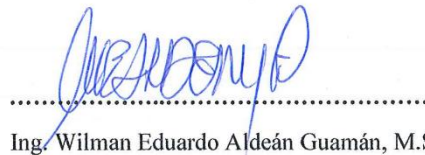
.....  
Ing. Miguel Ángel Villamagua, M.Sc.

**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



.....  
Ing. Walter Rodrigo Tene Ríos, M.Sc.

**VOCAL DEL TRIBUNAL**



.....  
Ing. Wilman Eduardo Aldeán Guamán, M.Sc.

**VOCAL DEL TRIBUNAL**

## AUTORÍA

Yo, **Leonso Ismael González González**, declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos, de posibles reclamos o acciones legales, por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional-Biblioteca Virtual.

**Autor:** Leonso Ismael González González.

**Firma:** .....

**Cédula:** 1900706571

**Fecha:** Loja, 03 de agosto del 2020

## CARTA DE AUTORIZACIÓN

### CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO

Yo, **Leonso Ismael González González**, declaro se autor de la tesis titulada “**ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE ARCILLAS EXISTENTES EN EL CANTÓN GONZANAMÁ COMO MATERIAL IMPERMEABILIZANTE EN PEQUEÑOS EMBALSES DE USO AGRÍCOLA**”, como requisito para optar al grado de Ingeniero Agrícola, autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la reproducción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el RDI, en las redes de información del país y el exterior, con los cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, a los tres días del mes de agosto de dos mil veinte, firma el autor.

Firma:  .....

**Autor:** Leonso Ismael González González

**Número de cédula:** 1900706571

**Dirección:** Loja, calles México y Brasil

**Correo electrónico:** ligonzalezg@unl.edu.ec

**Celular:** 0985177234

#### DATOS COMPLEMENTARIOS

**Director de Tesis:** Ing. María del Cisne Veintimilla Ortega M.Sc.

**Tribunal de Grado:** Ing. Miguel Ángel Villamagua, M.Sc.

Ing. Walter Rodrigo Tene Ríos, M.Sc.

Ing. Wilman Eduardo Aldeán Guamán, M.Sc.

## **AGRADECIMIENTO**

Primeramente, agradecer a DIOS por guiarme en esta etapa de mi vida, y brindarme toda la fuerza necesaria para superar todas las dificultades con las que me tropezaba en el camino y superarlas, para así poder llegar a culminar con este objetivo.

A mis abuelitos, por su constante motivación y su apoyo tanto moralmente, económicamente y por siempre brindándome sus consejos para ser una mejor persona.

A mi madre por haberme apoyado en todo momento, y que gracias a ella aprendí a nunca rendirme ante ninguna circunstancia y siempre persistir y además fue uno de los pilares fundamentales para poder llegar a culminar esta meta de ser un profesional.

A mi padre quien siempre me apoyado, por los valores que me ha inculcado y por el sacrificio realizado para brindarme una buena educación.

A mis hermanas y a toda mi familia que, gracias a sus palabras de esfuerzo a su cariño y comprensión brindada pude culminar esta etapa de mi vida.

A la Ingeniera María del Cisne Veintimilla por guiarme y compartir todas sus enseñanzas, además por el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto de titulación, su amistad y consejos.

A mis amigos y compañeros quienes conocieron mis virtudes y defectos me supieron brindar su amistad, y con quienes he vivido momentos muy queridos.

A la Universidad Nacional de Loja por ser un egresado más de esta gloriosa institución, y un especial agradecimiento a la carrera de Ingeniería Agrícola y a todos sus docentes por saber brindarme todas las bases y el conocimiento necesario para así poder desenvolverme en mi futura vida como profesional.

Leonso Ismael González González

## **DEDICATORIA**

Una vez finalizado el presente proyecto de titulación quiero dedicarle este trabajo de manera especial a DIOS el cual supo guiarme y me ha dado fortaleza para siempre sobresalir ante todos los problemas que se me han suscitado en transcurso de este tiempo.

A mis adorables abuelitos por brindarme todo su apoyo y amor, los mismos que son mi ejemplo de vida y los cuales siempre me están inculcando buenos valores para poder ser una persona de bien.

A mi admirable y querida madre quien a pesar de todas las circunstancias siempre me ha brindado todo su apoyo incondicional, siempre ha creído en mí y me ha echo crecer como persona con buenos valores, principios y ganas de superación.

A mis hermanas y toda mi familia que siempre me brindaron todo su amor, cariño y apoyo y siempre estar pendientes de mí, motivándome para poder así terminar y salir adelante con mis estudios y poder tener una carrera profesional.

A todos mis amigos y compañeros con los que he compartido buenos momentos y quienes siempre han estado ahí apoyándome para que culmine con este proyecto de titulación.

Leonso Ismael González González

## TABLA DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS .....	ii
CERTIFICACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	iii
AUTORÍA.....	iv
CARTA DE AUTORIZACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
DEDICATORIA.....	vii
TABLA DE CONTENIDO.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xii
RESUMEN.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Revisión de literatura .....</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Origen del suelo</i> .....	3
2.1.1. Rocas.....	3
2.1.2. Clasificación de las rocas.....	3
2.1.3. Intemperismo de las rocas.....	4
2.2. <i>Formación de suelos</i> .....	4
2.2.1. Sedimentario.....	4
2.2.2. Suelos residuales.....	5
2.2.3. Suelos desde la perspectiva de la ingeniería.....	5
2.2.4. El suelo como material de construcción.....	5
2.3. <i>Arcillas</i> .....	6
2.3.1. Clasificación de los minerales arcillosos.....	6
2.4. <i>Propiedades físicas y mecánicas de los suelos</i> .....	8
2.4.1. Propiedades físicas.....	8
2.4.2. Propiedades mecánicas.....	10
2.5. <i>Caracterización de suelos</i> .....	10
2.6. <i>Pruebas de laboratorio para la caracterización física-mecánica de los suelos</i> .....	11
2.6.1. Análisis mecánico del suelo.....	11
2.6.2. Compactación.....	13
2.6.3. Consistencia del suelo o límites de Atterberg.....	15



2.6.4.	Permeabilidad. ....	18
2.7.	<i>Clasificación de los suelos</i> .....	19
2.7.1.	Sistema de clasificación AASHTO (Norma ASTM D-3282; método AASHTO M145) .....	20
2.7.2.	Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) (Norma ASTM D- 2487). ..	22
2.8.	<i>Embalses</i> .....	24
2.8.1.	Embalses para riego. ....	24
2.9.	<i>Reservorios para almacenamiento de agua</i> .....	24
2.9.1.	Tipos de reservorios. ....	25
2.9.2.	Elementos por considerar para la construcción de reservorios. ....	26
2.9.3.	Construcción de un reservorio. ....	27
2.9.4.	Calidad de los materiales empleados para la construcción de reservorios. ....	28
2.10	<i>Investigaciones referenciales sobre impermeabilización de reservorios</i> .....	28
<b>3.</b>	<b>Materiales y métodos</b> .....	<b>30</b>
3.1.	<i>Ubicación de la investigación</i> .....	30
3.1.1.	Descripción del área de investigación.....	30
3.1.2.	Universo de la investigación.....	31
3.2.	<i>Métodos de investigación</i> .....	32
3.3.	<i>Materiales y metodología</i> .....	33
3.3.1.	Materiales.....	33
3.3.2.	Metodología para la caracterización físico-mecánica de las arcillas. ....	34
3.3.3.	Metodología para determinar la permeabilidad. ....	39
<b>4.</b>	<b>Resultados</b> .....	<b>44</b>
4.1.	<i>Caracterización física-mecánica de las arcillas</i> .....	44
4.1.1.	Contenido de humedad. ....	44
4.1.2.	Granulometría por tamizado. ....	44
4.1.3.	Granulometría por método del hidrómetro. ....	46
4.1.4.	Consistencia del suelo.....	48
4.1.5.	Clasificación del suelo. ....	50
4.1.6.	Compactación. ....	51
4.2.	<i>Determinación de la permeabilidad</i> .....	52
4.2.1.	Determinación de la conductividad hidráulica por medio del permeámetro de cabeza constante. ....	52
4.2.2.	Determinación de la conductividad hidráulica (k) por medio de la batería de permeámetro de cabeza constante. ....	53

<b>5. Discusión.....</b>	<b>54</b>
5.1. <i>Caracterización física-mecánica de las arcillas.....</i>	54
5.1.1. Contenido de humedad del suelo.....	54
5.1.2. Clasificación del suelo.....	54
5.1.3. Curva de compactación del suelo.....	55
5.2. <i>Permeabilidad del suelo.....</i>	56
5.2.1. Determinación de la conductividad hidráulica por medio del permeámetro de cabeza constante.....	56
5.2.2. Determinación de la conductividad hidráulica (k) por medio de la batería de permeámetro de cabeza constante.....	57
5.3. <i>Análisis de los resultados de los suelos en estudio como material impermeabilizante en pequeños embalses.....</i>	57
<b>6. Conclusiones.....</b>	<b>59</b>
<b>7. Recomendaciones.....</b>	<b>60</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>61</b>
<b>9. Anexos.....</b>	<b>67</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los suelos según su índice plástico (IP).....	17
Tabla 2. Actividad de minerales de arcilla.....	17
Tabla 3. Valores típicos de la conductividad hidráulica para suelos saturados .....	19
Tabla 4. Grado de permeabilidad del suelo .....	19
Tabla 5. Sistema de clasificación ASSHTO .....	21
Tabla 6. Clasificación de suelos (SUCS).....	23
Tabla 7. Calidad de los materiales empleados para la construcción de presas .....	28
Tabla 8. Clasificación de la permeabilidad.....	43
Tabla 9. Contenido de humedad de la muestra S de suelo.....	44
Tabla 10. Contenido de humedad de la muestra H de suelo.....	44
Tabla 11. Granulometría por tamizado de la muestra S de suelo .....	45
Tabla 12. Granulometría por tamizado de la muestra H de suelo.....	45
Tabla 13. Granulometría por método del hidrómetro de la muestra S de suelo. ....	46
Tabla 14. Granulometría por método del hidrómetro de la muestra H de suelo.....	47
Tabla 15. Granulometría correspondiente a las dos muestras de suelo en estudio .....	47
Tabla 16. Resultados del límite líquido de la muestra de suelo S.....	48
Tabla 17. Resultados del límite líquido de la muestra de suelo H.....	48
Tabla 18. Valores de límite líquido de las muestras en estudio a 25 golpes.....	49
Tabla 19. Valores de límite plástico de las muestras de suelo en estudio. ....	49
Tabla 20. Valores del índice de plasticidad de las muestras en estudio .....	49
Tabla 21. Datos para la clasificación de suelos SUCS .....	50
Tabla 22. Tipo de suelo de las muestras estudiadas, según SUCS .....	50
Tabla 23. Resultados de la curva de compactación de las dos muestras de suelo .....	52
Tabla 24. Valores de permeabilidad de las muestras en estudio.....	52
Tabla 25. Valores de permeabilidad correspondientes a las muestras de suelo no disturbadas ...	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Minerales de arcilla. ....	8
<b>Figura 2.</b> Curva de distribución granulométrica por tamizado. ....	11
<b>Figura 3.</b> Principios de compactación. ....	14
<b>Figura 4.</b> Límites de Atterberg. ....	15
<b>Figura 5.</b> Clasificación fracción limo-arcillosa (AASHTO). ....	21
<b>Figura 6.</b> Reservorio Dique-Represa .....	25
<b>Figura 7.</b> Reservorio Excavado. ....	26
<b>Figura 8.</b> Reservorio tipo estanque revestido con plástico .....	26
<b>Figura 9.</b> Elementos necesarios por considerar para construir un reservorio. ....	27
<b>Figura 10.</b> Ubicación geográfica del Cantón Gonzanamá. ....	30
<b>Figura 11.</b> División Política del Cantón Gonzanamá. ....	31
<b>Figura 12.</b> Ubicación de los sitios de Sunamanga. ....	32
<b>Figura 13.</b> Curva granulométrica de la muestra S de suelo por medio del tamizado. ....	45
<b>Figura 14.</b> Curva granulométrica de la muestra H de suelo por medio del tamizado. ....	46
<b>Figura 15.</b> Curva Granulométrica del pasante del Tamiz N° 200 de la muestra S de suelo. ....	46
<b>Figura 16.</b> Curva Granulométrica del pasante del Tamiz N° 200 de la muestra H de suelo. ....	47
<b>Figura 17.</b> Límite líquido de la muestra de suelo S. ....	48
<b>Figura 18.</b> Límite líquido de la muestra de suelo H. ....	49
<b>Figura 19.</b> Clasificación de las muestras de suelo en estudio. ....	51
<b>Figura 20.</b> Curva de compactación correspondiente a la muestra de suelo S. ....	51
<b>Figura 21.</b> Curva de compactación correspondiente a la muestra de suelo H. ....	52

**“ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE ARCILLAS  
EXISTENTES EN EL CANTÓN GONZANAMÁ COMO MATERIAL  
IMPERMEABILIZANTE EN PEQUEÑOS EMBALSES DE USO  
AGRÍCOLA”**

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene el fin de presentar las características físico-mecánicas de las arcillas de los sectores de Sunamanga y la colina el Colambo pertenecientes al Cantón Gonzanamá, con fines de impermeabilización de reservorios; debido que la construcción con suelo es poco usada en la actualidad por falta de investigación. Con el estudio de este material, se puede mejorar las técnicas constructivas de reservorios en zonas rurales, dando una solución para un adecuado aprovechamiento del agua y poder suplir así las necesidades de riego de los cultivos que se presentan en la región sur.

Para la ejecución de la investigación se cumplieron trabajos de campo y laboratorio, el trabajo de campo consistió en la recolección de muestras de suelo. En un reconocimiento visual se comprobó la inexistencia del suelo materia de este estudio en el sector de la Colina el Colambo, por lo que se trabajó con muestras pertenecientes a Sunamanga, y, en el laboratorio se realizaron los ensayos correspondientes a la caracterización física-mecánica, los mismos efectuados según las normas NTE-INEN y AASHTO-ASTM,

Los resultados permitieron clasificar al suelo como, MH para el suelo de la vía antigua a Sacapalca y ML para la muestra de la salida de Sunamanga, siendo la primera, suelos limo elásticos de media a alta plasticidad con un peso específico seco de  $1.24 \text{ g/cm}^3$  y un óptimo contenido de humedad de 33%, mientras la segunda recae a suelos limos arcillosos con ligera plasticidad con un peso específico seco de  $1.35 \text{ g/cm}^3$  y un óptimo contenido de humedad de 28%. En cuanto a permeabilidad, para las muestras disturbadas se alcanzó resultados de  $4.40 \times 10^{-8}$  y  $2.13 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$  que corresponden a un grado de permeabilidad prácticamente impermeable, con los datos analizados se establece que las dos muestras de suelo pueden utilizarse como impermeabilizante, pero la que mejor presenta características impermeables, pertenece a la muestra de suelo de la salida de Sunamanga, es por ello que se permite considerar al material como una alternativa para impermeabilización de reservorios.

**Palabras clave:** arcilla, granulometría, límites de consistencia, compactación, permeabilidad y reservorios.

## ABSTRACT

The purpose of this research work is to present the physical-mechanical characteristics of the clays from the sectors of Sunamanga and the Colambo hill belonging to the Gonzanamá Canton, for waterproofing reservoirs; because the construction with soil is little used at present due to lack of research. With the study of this material, it is possible to improve the construction techniques of reservoirs in rural areas, providing a solution for an adequate use of water and thus being able to supply the irrigation needs of crops that occur in the southern region.

For the execution of the investigation, field and laboratory work were carried out, the fieldwork consisted of collecting soil samples. In a visual examination, the non-existence of the soil that was the subject of this study in the Colambo hill sector was verified, so samples were worked belonging to Sunamanga, and, in the laboratory, the tests corresponding to the physical-mechanical characterization were carried out, the same carried out according to the NTE-INEN and AASHTO-ASTM standards.

The results allowed classifying the soil as, MH for the soil of the old road to Sacapalca and ML for the sample at the exit of Sunamanga, the first being, silt elastic soils of medium to high plasticity with a dry specific weight of  $1.24 \text{ g/cm}^3$  and an optimal moisture content of 33%, while the second falls to clayey silt soils with slight plasticity with a dry specific weight of  $1.35 \text{ g/cm}^3$  and an optimal moisture content of 28%. Regarding permeability, for those disturbed samples, results of  $4.40 \times 10^{-8}$  and  $2.13 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$  were obtained, corresponding to a degree of practically impervious permeability. With the analyzed data, it is established that the two soil samples can be used as waterproofing, but the one with the best waterproof characteristics, belongs to the soil sample at the Sunamanga outlet, which is why the material is considered an alternative for reservoir waterproofing.

**Key words:** clay, grain size, consistency limits, compaction, permeability and reservoirs.

## 1. Introducción

Las arcillas son la fuente principal de materia prima para fabricación de cerámicos de construcción y además de gran valor para los procesos industriales. Según Barba et al. (1997) éstas aparecen en todo tipo de formación rocosa y en formaciones ígneas y sedimentarias; generando en sus capas, características físicas, químicas y mineralógicas, diferentes en cada una de ellas e inclusive en los mismos depósitos arcillosos.

De acuerdo con Díaz (2015) las reservas de arcilla a nivel mundial son ilimitadas, y estos yacimientos son explotados debido a la proximidad con las industrias, y son usadas principalmente para la fabricación de cerámicos, gress, plásticos, fabricación de papel, cemento, teja, etc., además son aprovechadas debido a su bajo coste de explotación.

Álvarez (2018) sostiene que en el Ecuador su uso se extiende, en más del 50% de los procesos de manufactura y construcción, y conforme hemos avanzado tecnológicamente se ha despertado el interés de estudiar y darle un mejor uso a las arcillas.

En lo que respecta a la construcción de reservorios con revestimientos de arcilla, según Hansford (1996) se considera como un método tradicional para impermeabilizar estanques, el mismo que ha sido utilizado hace centenares de años en Inglaterra y este se considera un método tecnológico apropiado con un enfoque de sustentabilidad económica, social y, sobre todo amigable con el medio ambiente. Dana y otros autores (1977) señalan que la arcilla montmorillonita tiene interesantes usos industriales, el que más sobresale es como lodo de perforación, además es usada para detener fugas en suelos y represas.

En el territorio nacional son 75 áreas en las que se explota arcilla, la mayor concentración de áreas se localiza en la región austral en las cuencas intermontañas de Cuenca, Biblian y Loja, Malacatos-Vilcabamba, Catamayo, estas cuencas se caracterizan por tener arcillas de excelente calidad las cuales pueden ser explotadas con fines de uso tecnológico e industrial (Paladines y Soto, 2010).

En la provincia de Loja (Macará, Sozoranga, Gonzanamá, Calvas, Quilanga y Espíndola), la existencia de reservorios con la utilización de materiales alternativos para su impermeabilización, como la arcilla, han tenido serios problemas por el desconocimiento de información de las mismas para su uso como elemento impermeable, estas son explotadas, según



SENPLADES (2014) principalmente para la elaboración de ladrillo, teja y gress, primordialmente de los yacimientos de la cuenca Catamayo.

Esta tecnología alternativa como es el uso y aplicación de la arcilla, es poco utilizada en el campo de la impermeabilización de reservorios, debido a que no existe información detallada por sectores de sus características que permita dar una base sólida o científica para su uso, provocando así un desconocimiento de los alcances y beneficios de la misma y provocando la utilización de materiales geosintéticos, plásticos y cemento. Estas arcillas además se han empleado desde tiempos remotos y por diversas culturas, ya sea con fines agrícolas, ganaderos o para el consumo del propio ser humano.

En este marco, la presente investigación está plenamente sustentada, a conocer el potencial tecnológico de las arcillas por medio de su estudio físico-mecánico, para utilizarla como material alternativo para impermeabilización de reservorios, que cubra con los requerimientos técnicos y parámetros de economía al alcance del pequeño productor, además de contribuir con una solución en mejorar el aprovechamiento del recurso agua y poder suplir así las necesidades de riego de los cultivos que se presentan en la región sur, adicionalmente al ser un elemento natural es más amigable con el medio ambiente, respecto a otros métodos tradicionales de impermeabilización.

Los objetivos planteados para esta investigación se mencionan a continuación:

### **Objetivo general**

- Estudiar las propiedades físico-mecánicas de las arcillas de los sectores de Sunamanga y de la colina el Colambo pertenecientes al Cantón Gonzanamá.

### **Objetivos específicos**

- Caracterizar las arcillas de los sectores de Sunamanga y de la colina el Colambo pertenecientes al cantón Gonzanamá, para ser usadas como material impermeabilizante en pequeños embalses agrícolas.
- Determinar la permeabilidad de las arcillas de los sectores antes mencionados.

## 2. Revisión de literatura

### 2.1. Origen del suelo

El origen del suelo se da a través de la meteorización de la roca y por medio de diferentes procesos geológicos que experimentan cerca de la superficie terrestre, es decir la disgregación de las rocas en pedazos cada vez más pequeños, que en contacto con el medio ambiente (agua y aire) se agrupan formando el suelo (Ingeniería Civil, 2010).

#### 2.1.1. Rocas.

La roca se la define como un agregado sólido, que se encuentra formado por diversos minerales, pero además pueden estar formados por un único mineral, la cual está ocupando grandes extensiones de la corteza terrestre. Las rocas generalmente suelen ser materiales duros, pero se pueden encontrar rocas blandas como es el caso de las rocas arcillosas o las arenas (Ramírez y Alejano, 2007).

#### 2.1.2. Clasificación de las rocas.

Desde el punto de vista de su origen las rocas se clasifican en tres grandes grupos generales: ígneas, estas se forman por la solidificación del magma; sedimentarias formadas a partir de la acumulación de sedimentos y metamórficas formadas por transformación de las ígneas y sedimentarias mediante dos procesos de altas presiones y temperaturas (Jaramillo, 2002).

##### 2.1.2.1. Rocas ígneas.

Este tipo de roca se forma por enfriamiento y cristalización de una masa fundida la cual estuvo caliente en un tiempo dado, conocida como magma o lava, de acuerdo a las condiciones a las que se enfrió el magma se originan las rocas extrusivas o intrusivas (Huang, 2009).

##### 2.1.2.2. Rocas sedimentarias.

Son las rocas formadas por la acumulación de sedimentos que se consolidaron en rocas duras, firmes, estratificadas. Estas rocas pueden clasificarse de acuerdo a su disgregación mecánica o química (Huang, 2009).

### **2.1.2.3. Rocas metamórficas.**

Estas rocas se forman a partir de las rocas preexistentes, cuando estas son sometidas a altas presiones y/o temperaturas, lo que origina cambios químicos y/o estructurales en los minerales de las rocas originales (Jaramillo, 2002).

### **2.1.3. Intemperismo de las rocas.**

Intemperismo o meteorización hace referencia a la alteración de los materiales rocosos expuestos al aire, a la humedad y al efecto de la materia orgánica; puede ser intemperismo mecánico o de desintegración, y químico o de descomposición, pero ambos procesos, por regla general interactúan. Las variaciones de humedad y temperatura inciden en ambas formas de intemperismo toda vez que afectan la roca desde el punto de vista mecánico y que el agua y el calor favorecen las reacciones químicas que la alteran.

Distintos factores ambientales físicos y químicos atacan a las rocas y las cuarteán, disgregan y descomponen, y según el carácter de los factores que produzcan la meteorización se distinguen la meteorización física y la meteorización química (Duque, 2014).

## **2.2. Formación de suelos**

Cuando la superficie terrestre quedo fría, se formó un manto rocoso o roca madre, por medio de la cual luego de una serie de transformaciones, se formó el suelo. Estas transformaciones ocurridas fueron el resultado de una mezcla de distintas variables climáticas (humedad, precipitaciones, temperatura), del tipo de roca donde actuaban esas variables, del relieve, de la vegetación y del tiempo. La formación del suelo es un proceso en etapas en el que las rocas se dividen en partículas cada vez más pequeñas combinándose con materia orgánica en descomposición. De acuerdo al proceso de formación, el suelo puede ser sedimentario y residual (Universidad Privada del Norte, 2011).

### **2.2.1. Sedimentario.**

La formación de los suelos sedimentarios se da por el transporte de sus partículas del lugar donde se originaron a otro emplazamiento donde son depositados. La formación de sedimentos se da por la acción de la meteorización física y química de las rocas en la superficie terrestre. Por medio de la meteorización física se forman las partículas de limo, arena y grava, mientras que por

la química se originan las partículas arcillosas. Los sedimentos son transportados por medio de cualquiera de estos cinco agentes: agua, aire, hielo, gravedad y organismos vivos, este transporte de partículas afecta en dos formas principales a los sedimentos (Rodríguez, 2001):

- Modifica la forma, tamaño y textura de las partículas por abrasión, impacto y disolución;
- Produce una clasificación o gradación de las partículas.

### **2.2.2. Suelos residuales.**

Estos suelos se originan cuando el resultado de la meteorización de las rocas no es transportado como sedimentos, sino que se aglomeran in situ. La acumulación de un suelo residual se da cuando la velocidad de descomposición de la roca supera a la de arrastre de los productos de descomposición. Los factores que intervienen en la velocidad de transformación de la naturaleza de los productos de meteorización son (Rodríguez, 2001):

- El clima (temperatura, lluvia),
- El tiempo,
- La naturaleza de la roca original,
- La vegetación,
- El drenaje, y
- La actividad bacteriana.

### **2.2.3. Suelos desde la perspectiva de la ingeniería.**

Desde el punto de vista de la ingeniería, suelo es el terreno de establecimiento donde se construye las cimentaciones de las estructuras, también es el material de construcción para diversas obras civiles ejemplo pavimentos, presas de tierra, canales, etc., por esta razón el estudio de las propiedades físicas, hidráulicas y mecánicas del suelo es de fundamental importancia, las cuales se determinan con ensayos realizados en laboratorio (Universidad privada del norte, 2011).

### **2.2.4. El suelo como material de construcción.**

El suelo es el material de construcción más abundante del mundo y en muchas zonas constituye, de hecho, el único material disponible localmente. Cuando el ingeniero utiliza el suelo como material de construcción debe escoger el tipo apropiado de suelo, así como el método de colocación y, luego, controlar su puesta en obra, porque el suelo como material de construcción debe cumplir con determinadas especificaciones técnicas (Baque, 2017).

### 2.3. Arcillas

Según Besoain (1985) la arcilla se encuentra conformada principalmente por silicatos de aluminio hidratados, sus partículas son menores  $2\mu$ , sus principales características es que son frágiles, tienen gran capacidad de absorción, son impermeables y en ocasiones se endurecen mucho, estas características se dan de acuerdo al contenido de agua que tenga la arcilla.

Estas arcillas son abundantes en la naturaleza, ya que se originan debido al envejecimiento geológico de la superficie terrestre, son de fácil explotación y tienen gran importancia en la industria debido a sus diversos usos (Casadiegos, 2010). Además, son agregados que su comportamiento está dominado por la actividad electroquímica, donde predominan las fuerzas de atracción y repulsión (Celedón y Lazcano, 2001).

Lo establecido por el trabajo conjunto de los comités, AIPEA (Asociación Internacional para el Estudio de Arcillas) y CMS (Sociedad de Minerales Arcillosos), para definir a las arcillas se ha determinado que:

El término "arcilla" se refiere a un material natural compuesta principalmente de minerales de grano fino, el cual es generalmente plástico con el contenido apropiado de agua y se endurecerá con secado o cocido. Aunque la arcilla usualmente contiene filosilicatos, puede contener otros materiales, que imparten plasticidad y se endurecen al secar o cocerse, fases asociadas en arcilla pueden incluir materiales que no impartan plasticidad (Guggenheim y Martin, 1995, p.255).

De acuerdo con Rincon y Quintana (2010) el comportamiento activo es una de las propiedades más significativas de la arcilla, la misma que causa la plasticidad y adhesión al momento de ponerla en contacto con agua, además se ve ligada íntimamente a los minerales arcillosos, los mismos que son el resultado de la meteorización de rocas feldespáticas.

#### 2.3.1. Clasificación de los minerales arcillosos.

Dependiendo de la distribución del arreglo de las láminas o de su estructura reticular, se pueden identificar cuatro grupos de minerales arcillosos que son: caolinita, illita, montmorillonita y vermiculitas (Whitlow, 1994).

### **2.3.1.1. Grupo de caolinitas.**

La caolinita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  es la principal fuente que constituye el caolín y las arcillas que se utilizan para la fabricación de materiales de porcelana.

Badillo y Rodríguez (2005) establecen que las caolinitas están formadas por láminas silícicas y alumínicas, que se superponen continuamente, las mismas, dada su firmeza entre sus retículas, no permiten la penetración de moléculas de agua entre ellas, y serán relativamente estables en presencia del agua.

La caolinita se presenta en hojuelas hexagonales de tamaño pequeño, su estructura consiste en una distribución de dos láminas de sílice y gibsita fuertemente enlazadas (Figura 1a), además pueden encontrarse enlazadas por moléculas de agua como la halosita (Figura 1b).

Algunos minerales de arcilla que corresponden a este grupo son: la dickita la misma que tiene igual composición que la caolinita, pero estas con un orden diferente en sus láminas y la halosita que habitualmente surge en algunos suelos tropicales y sus láminas están enlazadas por moléculas de agua (Whitlow, 1994).

### **2.3.1.2. Grupo de illitas.**

Whitlow (1994) hace referencia que la illita es el efecto de la meteorización de las micas, se presenta en forma de hojuelas y su estructura está conformada por arreglos de tres láminas de gibsita con los iones de K proporcionando la unión entre láminas contiguas de sílice (Figura 1c).

Las partículas de este grupo de arcillas son más pequeñas y delgadas que la caolinita, lo que provoca que la formación de enlaces sea más débil, su expansibilidad es menor que la montmorillonita y, usualmente estas arcillas permiten un trabajo mecánico más favorable para el ingeniero (Badillo y Rodríguez, 2005).

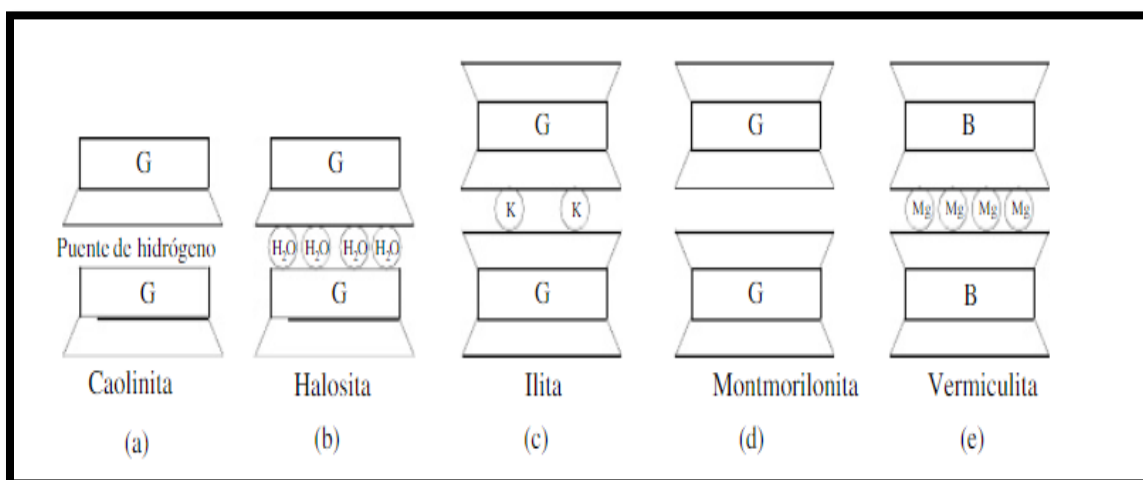
### **2.3.1.3. Grupo de la montmorillonita.**

Este grupo de arcillas están formadas por láminas, una alumínica entre dos silícicas las cuales se superponen indefinidamente. Principalmente se forman debido a la meteorización del feldespato plagioclasa en depósitos de ceniza volcánica y la unión entre sus retículas es débil, esto genera principalmente a este grupo inestabilidad en presencia de agua (Figura 1d) (Whitlow, 1994).

Las bentonitas son arcillas pertenecientes a este grupo, las mismas presentan expansibilidad típica, lo que las hace sumamente críticas en su comportamiento mecánico en trabajos de campo, pero en ocasiones ayudan en la resolución de ciertos problemas prácticos (Badillo y Rodríguez, 2005).

#### 2.3.1.4. Grupo de la vermiculita.

Está compuesta principalmente de productos de la meteorización de la biotita y la clorita. Su estructura es idéntica a la montmorillonita, solo que este grupo es el catión Mg el que proporciona los enlaces entre láminas, acompañados por algunas moléculas de agua (Figura 1e) (Whitlow, 1994).



**Figura 1.** Minerales de arcilla.

**Fuente:** Whitlow (1994).

## 2.4. Propiedades físicas y mecánicas de los suelos

Los suelos son generalmente llamados gravas, arena, limo o arcilla dependiendo del tamaño predominante de las partículas dentro del suelo y de sus propiedades, en este caso se analizará de manera particular las propiedades físicas y mecánicas de las arcillas. Estas propiedades son de importancia para el cálculo de la firmeza del terreno y para apreciar el comportamiento que tendrá al transcurrir el tiempo, las mismas se puede determinar por medio de ensayos realizados en el laboratorio o por ensayos hechos in situ.

### 2.4.1. Propiedades físicas.

Cullquipuma y Maldonado (2014) plantean que las propiedades físicas más importantes de los suelos que se deben considerar en la construcción de terraplenes o estructuras hidráulicas son:

#### **2.4.1.1. Gravedad Específica (Gs).**

El peso específico o gravedad específica de los sólidos de un suelo, se define como el cociente del peso al aire de un volumen dado de partículas de un suelo para el peso de volumen igual de agua a 4° C (Cullquipuma y Maldonado, 2014).

#### **2.4.1.2. Límites de Atterberg o límites de Consistencia.**

Los suelos al ser remoldeados cambiando contenido de agua, adoptan una consistencia característica, que antiguamente se denomina, Plástica. Pronto se reconoció que existía una relación específica entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes en el comportamiento mecánico de las arcillas por lo que la plasticidad dejó de ser una cualidad descriptiva para volverse una propiedad ingenieril de interés científico (Cullquipuma y Maldonado, 2014).

Puede definirse a la plasticidad, como la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elásticos, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse (Das, 2001).

Esta plasticidad habitualmente se la puede encontrar mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Contracción). Estos límites se distinguen por una separación arbitraria entre estos cuatro estados de un suelo, los mismos que son; sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez y de Justo, 1975).

#### **2.4.1.3. Granulometría.**

El análisis granulométrico de un suelo, consiste en determinar los diferentes tamaños de las partículas y los porcentajes en que estos intervienen en su universo que lo componen. Es un indicativo para establecer ciertas propiedades de los diferentes suelos y proceder a su clasificación.

Una apropiada clasificación del suelo lleva a tener una primera idea del comportamiento de este y muchas de las veces este factor, junto con la plasticidad, suele ser suficiente para pronosticar su comportamiento mecánico dentro de alguna obra (Cullquipuma y Maldonado, 2014).



#### ***2.4.1.4. Densidad o Peso Específico.***

La densidad o peso específico se la conoce como la cantidad de materia sólida presente por unidad de volumen. Una de esas propiedades es el estado o grado de compactación, que se expresa generalmente en términos de densidad relativa (Cullquipuma y Maldonado, 2014).

#### **2.4.2. Propiedades mecánicas.**

Las propiedades mecánicas sirven para saber las respuestas a diferentes tipos de cargas, a través de obras o estructuras hidráulicas, entre las principales tenemos:

##### ***2.4.2.1. Permeabilidad.***

Es la facilidad o dificultad que ofrece un suelo al paso del agua; se mide a través del coeficiente de permeabilidad, como una constante que tiene dimensiones de velocidad, y expresa la capacidad hidráulica de un suelo respecto al agua en su travesía por la masa del suelo; el grado de permeabilidad varía según el tipo de suelo (Pánchez y Gadvay, 2013).

##### ***2.4.2.2. Coeficiente de dilatación-contracción de los suelos.***

La dilatación-contracción de un suelo es la cualidad que determina su cambio de volumen cuando cambian las condiciones de humedad. Algunos suelos se contraen cuando están secos y se dilatan cuando están mojados (Pánchez y Gadvay, 2013).

##### ***2.4.2.3. Compresibilidad.***

La compresibilidad es el grado en que una masa de suelo disminuye su volumen bajo el efecto de una carga. Es mínima en los suelos de textura gruesa, que tienen las partículas en contacto. Aumenta a medida que crece la proporción de partículas pequeñas y llega al máximo en los suelos de grano fino que contienen materia orgánica. Las gravas y las arenas son prácticamente incompresibles. Si se comprime una masa húmeda de estos materiales no se produce ningún cambio significativo en su volumen (Pánchez y Gadvay, 2013).

### **2.5. Caracterización de suelos**

Según Pánchez y Gadvay (2013) caracterizar un suelo, es agruparlo, de manera tal de conocer lo siguiente:

- Sus descripciones, de modo que se pueda identificar y tener una idea sobre sus futuros comportamientos en cualquier tipo de obra.
- El conocimiento de su permeabilidad y su resistencia al esfuerzo cortante.

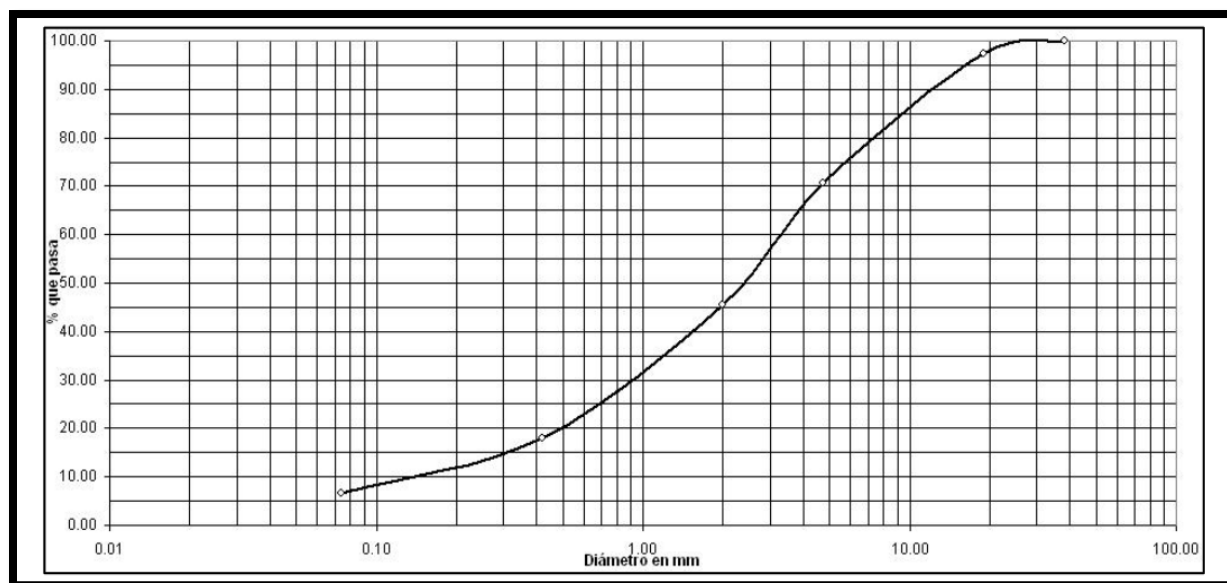
De aquí surge el problema de agrupar los suelos en un reducido número de tipos y, por otro lado, tenemos la ventaja de la clasificación por su notación corta, resulta muy útil para dar con una idea general y una información abstracta y fácil de identificar un suelo (Pánchez y Gadway, 2013).

## 2.6. Pruebas de laboratorio para la caracterización física-mecánica de los suelos

Las características que definen el comportamiento mecánico e hidráulico de las arcillas están directamente relacionadas con la presencia de agua. Estas propiedades son el principal objeto de estudio para los ingenieros, para conocer las bondades del suelo (Parrado y Toloza, 2017).

### 2.6.1. Análisis mecánico del suelo.

Das (2001) establece que, el análisis mecánico es la determinación del rango del tamaño de partículas que se presentan en un suelo, expresado como un porcentaje del peso seco total, lo que usualmente se reconoce como granulometría. Para el conocimiento de la disposición granulométrica de un determinado suelo existen diferentes procedimientos, las mismas que se relacionan con el tamaño de sus partículas; por cribado, para partículas mayores de 0.075mm y análisis hidrométrico para partículas menores a 0.075mm de diámetro (Crespo, 2004).



**Figura 2.** Curva de distribución granulométrica por tamizado.

**Fuente:** Hernández (2008).

### 2.6.1.1. Análisis por cribado.

El análisis por cribado de acuerdo a las características del material se lo realiza con la muestra entera, o bien, lavado. Este proceso de cribado no nos brinda información sobre la forma de las partículas de la muestra del suelo, solamente ofrece información sobre las partículas que pueden pasar, a través de una malla de abertura rectangular de cierto tamaño. La información del análisis granulométrico se la representa en forma de curva, para así poder comparar suelos y visualizar fácilmente la distribución de los tamaños de partículas presentes y observar que una masa de suelo puede tener varios tamaños de partículas que van entre los tamaños de dos milímetros y 0.075 mm las más pequeñas (Hernández, 2008).

De acuerdo con Hernández (2008), a partir de la curva granulométrica, se obtienen diámetros característicos como D10, D30, D60, la letra D se refiere al tamaño del grano de la partícula del suelo y el subíndice (10, 30, 60) el porcentaje de material más fino.

Los autores Berry y Reid (1993) mencionan que una indicación de la variación o rango del tamaño de los granos presentes en la muestra se obtiene mediante el “Coeficiente de uniformidad”  $C_u$ , definido como:

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

Un valor grande de este parámetro, indica que los diámetros D60 y D10, difieren en tamaño apreciablemente.

El “Coeficiente de gradación, o coeficiente de curvatura”  $C_z$ , es una medida de la forma de la curva entre el D60 y el D10, y se define de la siguiente forma:

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

$C_u$  y  $C_z$  se utilizan como criterios en el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). En general, en cuanto más alto sea el valor de  $C_u$  más amplio será el rango de tamaños de partículas en el suelo. Los suelos se clasifican como bien gradados si  $C_u > 4$  para gravas ó 6 para arenas, y  $1 < C_z < 3$  y si se encuentran por debajo de esos valores significa que el suelo no es gradado sino prácticamente uniforme en el diámetro de sus partículas.

### 2.6.1.2. Análisis hidrométrico.

El análisis hidrométrico se fundamenta en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua. Cuando una muestra de suelo se esparce en el agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos. Esta determinación está basada en la ley de Stokes que da la velocidad de sedimentación de partículas sólidas y las mismas son supuestas como esferas, según la cual (Das, 2001):

$$v = \frac{\rho_s - \rho_w}{18\eta} D^2$$

$v$  = velocidad

$\rho_s$  = densidad de las partículas de suelo

$\rho_w$  = densidad del agua

$\eta$  = viscosidad del agua

$D$  = diámetro de las partículas

Los resultados obtenidos del análisis de granulometría de una muestra de suelo a veces sirven para predecir movimientos del agua por medio del suelo, aun cuando los ensayos de permeabilidad son los que se utilizan principalmente. El análisis granulométrico es un intento de determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de grano presentes en una masa de suelo dado. Obviamente para obtener un resultado mayormente acertado la muestra debe ser representativa del lugar de estudio (Hernández, 2008).

### 2.6.2. Compactación.

De acuerdo con Hernández (2008) a la compactación se la entiende como un proceso que aumenta el peso volumétrico de un material granular y el mismo produce algunos beneficios, como mejorar la estabilidad de cimentaciones y pavimentos, se reducen los asentamientos y así mismo reducir la permeabilidad de un suelo.

Das (2001) establece en general a la compactación como la densificación del suelo por remoción de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso específico seco, el acomodo que existe durante esta prueba no solo depende de las características del dispositivo usado para compactar, sino primordialmente de la humedad que tiene el material al momento de realizar la prueba. El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua (Figura 3). Note que

a un contenido de agua  $w=0$ , el peso específico húmedo ( $\gamma$ ) es igual al peso específico seco ( $\gamma_d$ ), o;

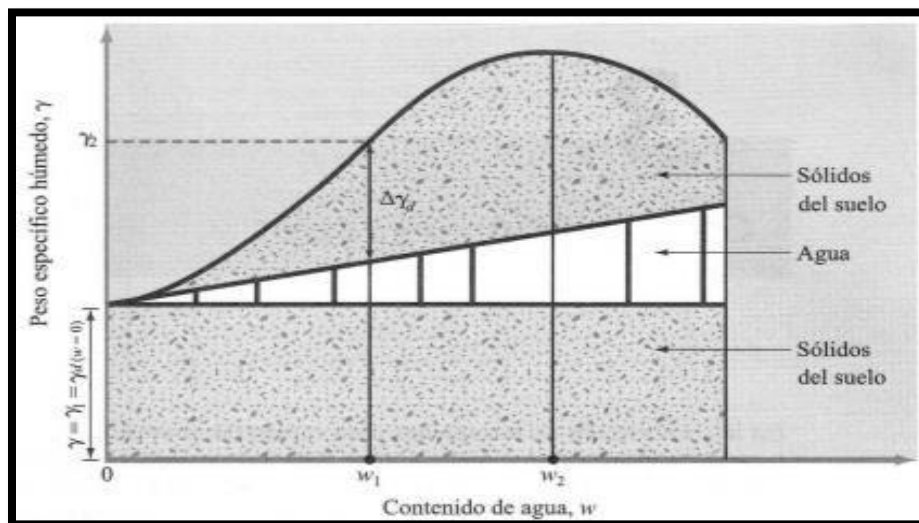
$$\gamma = \gamma_d(w = 0) = \gamma_1$$

Cuando el contenido de agua es gradualmente incrementado y se usa el mismo esfuerzo compactador, el peso de los sólidos del suelo en un volumen unitario crece en forma gradual. Por ejemplo, en  $w = w_1$ , el peso específico húmedo es igual a:

$$\gamma = \gamma_2$$

Sin embargo, el peso específico seco bajo este contenido de agua está dado por

$$\gamma_d(w = w_1) = \gamma_d(w = 0) + \Delta\gamma_d$$



**Figura 3.** Principios de compactación.

**Fuente:** Das 2001. Fundamentos de ingeniería geotécnica.

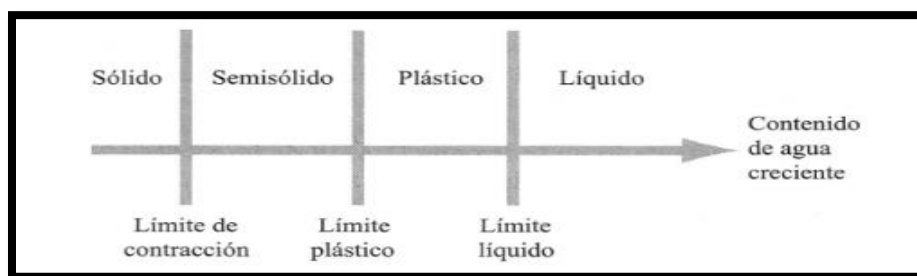
Más allá de un cierto contenido de agua  $w = w_2$  (Figura 3), cualquier incremento tiende a reducir el peso específico seco, debido a que el líquido toma los espacios que podrían haber sido ocupados por partículas sólidas. El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama contenido de agua óptimo.

La prueba de laboratorio usada habitualmente para alcanzar el peso específico seco máximo de compactación y el contenido de agua óptimo es la prueba Proctor de compactación (Proctor, 1933), existiendo dos alternativas de ensayo: la del tipo estándar y la del modificado, cuya diferencia se centra principalmente en la altura de caída del pistón (Das, 2001).

### 2.6.3. Consistencia del suelo o límites de Atterberg.

La consistencia es el grado de cohesión que tienen las partículas de los suelos arcillosos, las mismas que de acuerdo a la cantidad de agua que contengan pueden tener diferentes grados de cohesión este proceso da lugar a los estados de consistencia (Hernández, 2008).

A principios de 1900, un científico sueco, Albert Mauritz Atterberg, desarrolló un método para describir la consistencia de los suelos de grano fino con contenidos de agua variables. A muy bajo contenido de agua, el suelo se comporta más como un sólido frágil. Cuando el contenido de agua es muy alto, el suelo y el agua fluyen como un líquido. Por tanto, dependiendo del contenido de agua, la naturaleza del comportamiento del suelo se clasifica arbitrariamente en cuatro estados básicos, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido, como muestra la figura 4. (Das, 2001, p.27)



*Figura 4. Límites de Atterberg.*

Fuente: Das (2001).

Los conocidos límites de Atterberg son los siguientes: límite de contracción que se define como la frontera convencional entre el estado sólido y semisólido, el límite plástico no es nada más que la transición de estado semisólido a plástico y el límite líquido el que se encuentra nada más que entre el estado plástico a líquido (Das, 2001).

“Los límites de Atterberg y los índices asociados resultan útiles para la identificación y clasificación de suelos. Frecuentemente los límites se utilizan directamente en las especificaciones para controlar los suelos a utilizar en terraplenes y en métodos semiempíricos de proyecto” (Hernández, 2008, p.47).

#### 2.6.3.1. Límite líquido (LL).

De lo establecido por Crespo (2004) el límite líquido está definido, como el contenido de humedad expresado en porcentaje con relación al peso seco de la muestra, en el cual una masa de

suelo cambia del estado líquido al plástico, donde el suelo toma las propiedades y aspectos de una suspensión.

Dado que no existe una separación muy clara entre los estados de consistencia semilíquido, plástico y semisólido, se ha inventado el procedimiento estándar para la determinación de este límite; el mismo que se ha denominado “método mecánico” el que ideó *Casagrande* y conocido como “*Copa de Casagrande*” (Hernández, 2008).

#### ***2.6.3.2. Límite plástico (LP).***

Crespo (2004) establece al límite plástico como el contenido de humedad en porcentaje con respecto al peso seco de la muestra, para la cual una masa de suelo pasa del estado semisólido al plástico. Otra manera de definirla más sencillamente es como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro se rompe o se agrieta, cuando se enrolla a un diámetro aproximado de tres milímetros, al rodarse con la palma de la mano sobre una placa de vidrio.

#### ***2.6.3.3. Límite de contracción (SL).***

Das (2001) define al límite de contracción como el contenido de agua, en porcentaje, bajo el cual el cambio de volumen de la masa del suelo cesa. La masa de suelo se contrae conforme se pierde gradualmente el agua del suelo. Con una pérdida continua de agua, se alcanza una etapa de equilibrio en la que más pérdida de agua conducirá a que no haya cambio de volumen.

#### ***2.6.3.4. Índices de consistencia.***

De los resultados que se obtienen de los ensayos de los límites de Atterberg (LL y LP) y de sus respectivos gráficos (porcentaje de humedad vs número de golpes), se pueden determinar varios índices que son de importancia para la clasificación de suelos (Hernández, 2008).

##### ***2.6.3.4.1. Índice de plasticidad (IP).***

Numéricamente este índice es la diferencia entre los límites líquido (LL) y plástico (LP), el cual representa el margen de humedad que puede tener un suelo que se encuentra en estado plástico. Estos dos límites tanto líquido como el plástico dependen de la cantidad y tipo de arcilla presente en la muestra de suelo, sin embargo, el índice de plasticidad depende habitualmente, de la cantidad de arcilla del suelo (Crespo, 2004).

$$IP = L_L - L_P$$

Jiménez y de Justo (1975) hacen referencia que cuando mayor es el índice de plasticidad de un suelo menor es su permeabilidad.

Tabla 1  
*Clasificación de los suelos según su índice plástico (IP).*

<b>IP</b>	<b>Clasificación</b>
0	No plástico (suelos exentos de arcilla)
1-5	Ligeramente plástico
5-10	Baja plasticidad
10-20	Medianamente plasticidad
20-40	Alta plasticidad
>40	Muy alta plasticidad

Fuente: Crespo (2004)

#### 2.6.3.4.2. Número de actividad (A).

Das (2001) expresa a la actividad como:

La propiedad plástica de los suelos resulta del agua adsorbida que rodea a las partículas de arcilla, podemos esperar que el tipo de minerales arcillosos y sus cantidades proporcionales en un suelo afectarán los límites líquido y plástico. Skempton (1953) observó que el índice de plasticidad de un suelo crece linealmente con el porcentaje de la fracción de tamaño arcilloso (porcentaje de granos más finos que 2  $\mu$ , en peso) presente en él. Con base en esos resultados, Skempton definió una cantidad llamada actividad que es la pendiente de la línea que correlaciona el IP con el porcentaje de granos más finos que 2 $\mu$ . Esta actividad se expresa como (p.32).

$$A = \frac{IP}{(\text{porcentaje de la fracción de tamaño arcilloso, en peso})}$$

donde A= Actividad.

La actividad se usa como un índice para caracterizar el potencial de expansión de los suelos arcillosos. En la tabla 2, se dan valores típicos de actividades para varios minerales arcillosos.

Tabla 2  
*Actividad de minerales de arcilla*

<b>Clasificación</b>	<b>Actividad, A</b>	<b>Mineral predominante</b>
Baja	$A \leq 0.75$	Caolinita
Media	$0.75 < A \leq 1.25$	Illita
Alta	$A > 1.25$	Montmorillonita



Otro concepto más sencillo sobre Actividad hace referencia Hernández (2008) a un término que se aplica a los suelos plásticos que están expuestos a sufrir cambios de volumen en presencia de diferentes contenidos de humedad.

#### **2.6.4. Permeabilidad.**

Taylor (1961) establece a la permeabilidad como la capacidad que tiene un material de permitir a un líquido que lo atraviese sin perturbar su estructura interna. De acuerdo a ello se deduce que cuando pasa cierta cantidad de agua en tiempo dado el suelo es permeable, y viene a ser impermeable si pasa una cantidad de agua insignificante.

La permeabilidad de los suelos dependerá de diversos factores, relacionados directamente con las características de dicho material, como la viscosidad, rugosidad de las partículas y el grado de saturación del suelo, es por ello que no existe una única relación entre la porosidad del suelo y permeabilidad (Das, 2001).

Según Terzaghi y Peck (1973) señala que la permeabilidad de los suelos tiene un efecto determinante sobre el costo y las dificultades a encontrar en muchos trabajos constructivos, como lo son, por ejemplo, las excavaciones a cielo abierto y en diseño de presas de tierra, de allí la importancia de su estudio y determinación.

##### ***2.6.4.1. Coeficiente de permeabilidad.***

El coeficiente de permeabilidad es una constante de proporcionalidad relacionada con la facilidad de movimiento de un flujo a través de un medio poroso, los factores que influyen en el valor del coeficiente de permeabilidad del suelo son (Terzaghi y Peck, 1973):

- Relación de vacíos
- Viscosidad (temperatura) del agua
- Estructura y estratificación
- Agujeros y fisuras
- Tamaño de partículas
- Aire ocluido y materiales extraños en los vacíos (sales)

Para la determinación del coeficiente de permeabilidad ( $k$ ) existen diferentes métodos: los ensayos de laboratorio, los efectuados en el lugar y los métodos empíricos, donde el valor de  $k$  es obtenido indirectamente a través de relaciones empíricas con otras propiedades de los suelos.

A continuación, se resumen los distintos métodos para determinar el coeficiente de permeabilidad (Angelone, Garibay y Cauhapé, 2006):

- **Laboratorio**
  - Permeámetro de carga constante
  - Permeámetro de carga variable
- **In situ**
- **Empíricos**
  - Allen-Hazen
  - Loudon
  - Terzaghi
  - Schlichter
  - Prueba horizontal de capilaridad

En la tabla 3 y 4, se presenta rangos de valores para la conductividad hidráulica en algunos tipos de suelo y el respectivo grado de permeabilidad.

Tabla 3

*Valores típicos de la conductividad hidráulica para suelos saturados*

<b>Tipo de suelo</b>	<b>Conductividad hidráulica cm/s</b>
Grava limpia	100-1
Arena gruesa	1.0-0.01
Arena fina	0.01-0.001
Arcilla limosa	0.001-0.00001
Arcilla	0.000001

Fuente: Das (2001)

Tabla 4

*Grado de permeabilidad del suelo*

<b>Grado de permeabilidad</b>	<b>Conductividad hidráulica cm/s</b>
Elevada	Superior $10^{-1}$
Media	$10^{-1}$ a $10^{-3}$
Baja	$10^{-3}$ a $10^{-5}$
Muy baja	$10^{-5}$ a $10^{-7}$
Prácticamente impermeable	Menor de $10^{-7}$

Fuente: Whitlow (1994)

## 2.7. Clasificación de los suelos

El objetivo de dividir los suelos en grupos de comportamiento semejante, con propiedades geotécnicas similares, surgen las denominadas clasificaciones de suelos (Rodríguez, 2001).

Los suelos con propiedades similares se clasifican en grupos o subgrupos basados en su comportamiento ingenieril. Los sistemas de clasificación proporcionan un lenguaje común, para expresar en forma concisa las características generales de los suelos, que son infinitamente variadas sin una descripción detallada (Pánchez y Gadvay, 2013).

Los dos sistemas principales de clasificación de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el USCS (Unified Soil Classification System). El primero se usa principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción de explanadas de carreteras. El sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS) fue propuesto inicialmente por Casagrande en 1942 y después revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros. Este sistema es el más extendido para la amplia variedad de problemas geotécnicos (Rodríguez, 2001).

#### **2.7.1. Sistema de clasificación AASHTO (Norma ASTM D-3282; método AASHTO M145).**

Está destinada principalmente a clasificar los suelos de acuerdo a su adaptabilidad para ser usados en la construcción de pavimentos en carreteras y caminos. El sistema AASHTO se usa principalmente para clasificación de las capas de carreteras. No se usa en la construcción de cimentaciones (Pánchez y Gadvay, 2013).

De acuerdo con este sistema el suelo se clasifica en siete grupos principales: A-1 a A-7, de los cuales los tres primeros: A-1, A-2 y A-3, son materiales granulares, donde el 35% o menos de las partículas pasan a través del tamiz 200 y cuando más del 35% pasa el mismo tamiz se clasifican en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Éstos son principalmente limo y materiales del tipo de arcilla (Cordero, 2018).

Para evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para subrasante de un camino, se desarrolló también un número denominado índice de grupo (IG) (Pánchez y Gadvay, 2013).

Tabla 5  
Sistema de clasificación ASSHTO

Clasificación General	Materiales granulares (35% o menos pasa por el tamiz N° 200)						Materiales limoso arcilloso (más del 35% pasa el tamiz N° 200)				
	A-1		A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7	A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
Grupo:	A-1-a	A-1-b									
Porcentaje que pasa: N° 10 (2mm) N° 40 (0.425mm) N° 200 (0.075mm)	50 máx 30 máx 15 máx	- 50 máx 25 máx	- 51 mín 10 máx	- - 35 máx				- - 36 mín			
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40 Límite líquido Índice de plasticidad	-		-	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín 11 mín	40 máx 10 máx	41 mín 10 máx	40 máx 11 mín	41 mín (2) 11 mín
Constituyentes principales	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena arcillosa o limosa			Suelos limosos		Suelos arcillosos		
Características como subgrado	Excelente bueno						Pobre a malo				

(1): No plástico

(2): El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor al LL menos 30

El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL menos 30

<p>Índice de grupo</p> $IG = (F - 35) \cdot [0,2 + 0,005 \cdot (LL - 40)] + 0,01 \cdot (F - 15) \cdot (IP - 10)$ <p>Siendo :</p> <p>F: % que pasa el tamiz ASTM n° 200. LL: límite líquido IP: índice de plasticidad</p> <p>El índice de grupo para los suelos de los subgrupos A-2-6 y A-2-7 se calcula usando sólo : <math>IG = 0,01 \cdot (F - 15) \cdot (IP - 10)</math></p>
--

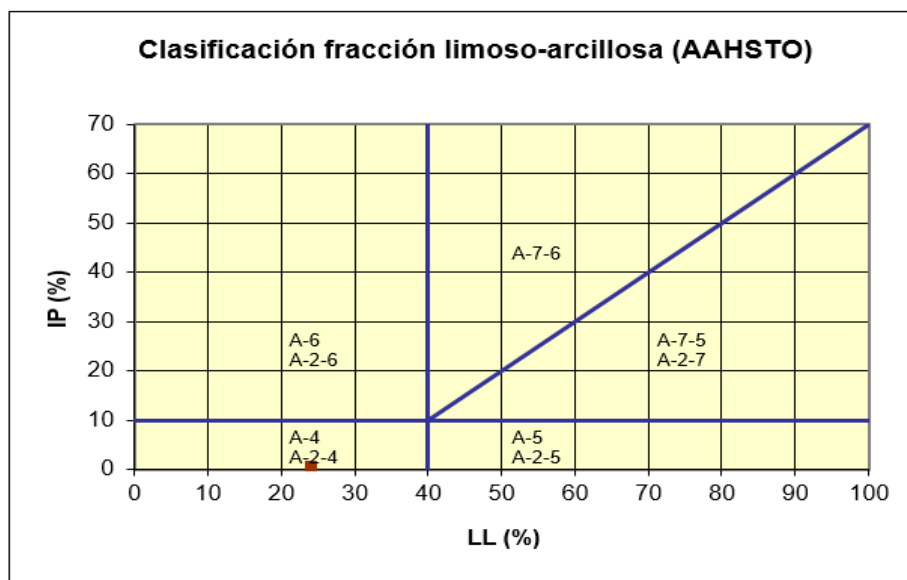


Figura 5. Clasificación fracción limo-arcillosa (AASHTO).

Fuente: Geólogo Jordi González Boada

Actualmente en los laboratorios se usa el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), para la distribución por tamaño del grano y plasticidad de los suelos (Pánchez y Gadway, 2013).

### 2.7.2. Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) (Norma ASTM D- 2487).

La forma original de este sistema fue propuesta por Casagrande en 1942 para usarse en la construcción de aeropuertos emprendida por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército durante la Segunda Guerra Mundial. En cooperación con la Oficina de Restauración de Los Estados Unidos de América, el sistema fue revisado en 1952. Hoy en día, es ampliamente usado por los ingenieros y laboratoristas. Este sistema clasifica los suelos en dos amplias categorías (Pánchez y Gadway 2013):

- **Suelos de grano grueso:** son de naturaleza tipo grava y arenosa con menos del 50% pasando por la malla No.200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo G o S; donde “G” significa grava o suelo gravoso y “S” significa arena o suelo arenoso.
- **Suelos de grano fino:** con 50% o más pasando por la malla No.200. Los símbolos de grupo comienzan con un prefijo “M”, que significa limo inorgánico, “C” para arcilla inorgánica u “O” para limos y arcillas orgánicos. El símbolo “Pt” se usa para turbas, lodos y otros suelos altamente orgánicos.

Otros símbolos son también usados para la clasificación:

- **W:** bien graduado
- **P:** mal graduado
- **L:** baja plasticidad (límite líquido menor que 50)
- **H:** alta plasticidad (límite líquido mayor que 50)

Para una clasificación apropiada con este sistema, se recomienda la siguiente información:

Los símbolos de grupo para suelos tipo grava de grano grueso son GW, GP, GM, GC, GC-GM, GW-GM, GW-GC, GP-GM y GP-GC. Similarmente, los símbolos de grupo para suelos de grano fino son CL, ML, OL, CH, MH, OH, CL-ML, y Pt.

Si más de la mitad del material pasa a través del tamiz 200, es un suelo de grano fino (limoso o arcilloso).

Tabla 6

Clasificación de suelos (SUCS)

DIVISIONES PRINCIPALES			Símbolos del grupo	NOMBRES TÍPICOS	IDENTIFICACIÓN DE LABORATORIO		
<b>SUELOS DE GRANO GRUESO</b> Más de la mitad del material retenido en el tamiz número 200	<b>GRAVAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa es retenida por el tamiz número 4 (4,76 mm)	<b>Gravas limpias</b> (sin o con pocos finos)	<b>GW</b>	Gravas, bien graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.	Determinar porcentaje de grava y arena en la curva granulométrica. Según el porcentaje de finos (fracción inferior al tamiz número 200). Los suelos de grano grueso se clasifican como sigue: <5%->GW, GP, SW, SP. >12%->GM, GC, SM, SC. 5 al 12%->casos límite que requieren usar doble símbolo.	Cu=D60/D10>4 Cc=(D30) <sup>2</sup> /D10xD60 entre 1 y 3	
			<b>GP</b>	Gravas mal graduadas, mezclas grava-arena, pocos finos o sin finos.		No cumplen con las especificaciones de granulometría para GW.	
		<b>Gravas con finos</b> (apreciable cantidad de finos)	<b>GM</b>	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP<4.	Encima de línea A con IP entre 4 y 7 son casos límite que requieren doble símbolo.
			<b>GC</b>	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con IP>7.	
	<b>ARENAS</b> Más de la mitad de la fracción gruesa pasa por el tamiz número 4 (4,76 mm)	<b>Arenas limpias</b> (pocos o sin finos)	<b>SW</b>	Arenas bien graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos.		Cu=D60/D10>6 Cc=(D30) <sup>2</sup> /D10xD60 entre 1 y 3	
			<b>SP</b>	Arenas mal graduadas, arenas con grava, pocos finos o sin finos		Cuando no se cumplen simultáneamente las condiciones para SW.	
		<b>Arenas con finos</b> (apreciable cantidad de finos)	<b>SM</b>	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.		Límites de Atterberg debajo de la línea A o IP<4.	Los límites situados en la zona rayada con IP entre 4 y 7 son casos intermedios que precisan de símbolo doble.
			<b>SC</b>	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla.		Límites de Atterberg sobre la línea A con IP>7.	
			<b>Limo y arcillas: Límite líquido menor de 50</b>	<b>ML</b>		Limos orgánicos y arenas muy finas, limos limpios, arenas finas, limosas o arcillosas, o limos arcillosos con ligera plasticidad.	<p>Ábaco de Casagrande</p> <p>Índice plasticidad</p> <p>Límite líquido</p>
				<b>CL</b>		Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas con grava, arcillas arenosas, arcillas limosas	
<b>OL</b>	Limos orgánicos y arcillas orgánicas limosas de baja plasticidad.						
<b>Limo y arcillas: Límite líquido mayor de 50</b>	<b>MH</b>	Limos orgánicos, suelos arenosos finos o limosos con mica o diatomeas, limos elásticos.					
	<b>CH</b>	Arcillas inorgánicas de plasticidad alta.					
	<b>OH</b>	Arcillas orgánicas de plasticidad media a elevada; limos orgánicos.					
	<b>PT</b>	Turba y otros suelos de alto contenido orgánico					
<b>Suelos muy orgánicos</b>							

Fuente: Geólogo Jordi González Boada

## **2.8. Embalses**

Son cuerpos de agua artificiales, es decir, originados por acción del hombre con la construcción de presas o la excavación en el terreno para almacenar o retener el agua que llega por precipitación, escorrentía o flujo de un río o riachuelo. En algunos casos, los embalses son llamados *reservorios*. Son construcciones que sirven para *riego*, control de inundaciones inesperadas, producción de energía, uso industrial, consumo humano, turismo y recreación, etc. (Cushman-Roisin, 2014). Cabe mencionar que estos reservorios artificiales al alimentarse de escurrimientos superficiales, pueden contener partículas de tierra y otras impurezas del suelo.

### **2.8.1. Embalses para riego.**

El aprovechamiento del agua del escurrimiento superficial del suelo es una técnica de captación de agua de lluvia utilizada 4 000 años atrás, siendo empleada por agricultores de la edad de bronce en el desierto de Negev en Israel. En aquel tiempo, recogían piedras encontradas en la superficie del suelo para aumentar la cantidad de agua a escurrir; además, construían tanques de almacenamiento con el fin de captar y conducir agua hacia las partes bajas de los campos para regar sus cultivos (FAO, 2000).

El aprovechamiento de la escorrentía superficial a través de Embalses, es una técnica que tiene la finalidad de captar y almacenar, en reservorios (embalses) superficiales, el excedente de agua que se genera en la superficie del suelo después de cada lluvia, para su utilización posterior; en el período sin lluvias durante la época lluviosa, como riego de salvación y, en la época seca, como riego complementario. Está compuesto por tres elementos básicos: Área de captación (Ac), Tanque de almacenamiento (Ta) y Área de siembra (As) (Silva y Porto, 1982).

Aprovechar las lluvias y almacenar la escorrentía superficial, para utilizarla como riego de salvación y/o complementario, en un intento de reducir el riesgo de pérdidas causadas por la sequía, en los cultivos (FAO, 2000).

## **2.9. Reservorios para almacenamiento de agua**

Los reservorios son los que permiten el almacenamiento de agua durante el tiempo de sequías o en pequeñas temporadas de veranillos que se presentan en muchas ocasiones, estos

reservorios facilitan al campesino tener un suministro de agua de buena calidad para su posterior uso (Salinas, Rodríguez y Morales, 2010).

Los reservorios se pueden construir para recolectar aguas de escorrentía superficial provenientes aguas lluvias durante el invierno, lo que se puede conocer como cosecha de agua de lluvia. Nasr (1999) establece a la cosecha de agua como “la recolección del agua de escorrentía para su uso productivo”, mientras que, según la FAO (2000), la cosecha de agua de lluvia se la define como “la recolección de escorrentía superficial para su uso productivo, y que puede lograrse de las superficies de tejados, así como de corrientes de agua intermitentes o efímeras”.

### **2.9.1. Tipos de reservorios.**

A continuación, se describen algunos de los sistemas que se utilizan, tanto para captura de agua proveniente de techos o escorrentía como aguas en piso o terreno (Salinas et al., 2010).

- **Reservorio dique-represa**

Son reservorios de captación de aguas de lluvia, se construyen de acuerdo a la forma natural que se encuentran en el sitio debido a la erosión que se ha dado. Se construyen con un dique de tierra o piedra de la misma zona, para esto se requiere que los suelos sean impermeables. Si los suelos son muy permeables, éstos se pueden impermeabilizar con diferentes materiales como geomembrana o plástico. El tamaño de este reservorio dependerá del potencial de precipitación, del área de captación y de la demanda de agua que originan los cultivos.



*Figura 6.* Reservorio Dique-Represa

**Fuente:** CEMEDE y UNED (2009)

- **Reservorio excavado**

Este tipo de reservorio se realiza con una excavación en el terreno generalmente se ubica en una zona baja para facilitar el escurrimiento de agua hacia el mismo. El tamaño dependerá de la cantidad de precipitación que se dé, el área de captación y demanda de agua.



Si los suelos donde se construye son arcillosos, se pueden utilizar los mismos como impermeabilizante y en cambio si los suelos son francos arenosos, el fondo y las paredes se recubren con material impermeable para que ayuden a la retención del agua almacenada.



*Figura 7.* Reservorio Excavado  
Fuente: CEMEDE y UNED (2009)

- **Reservorio estanque**

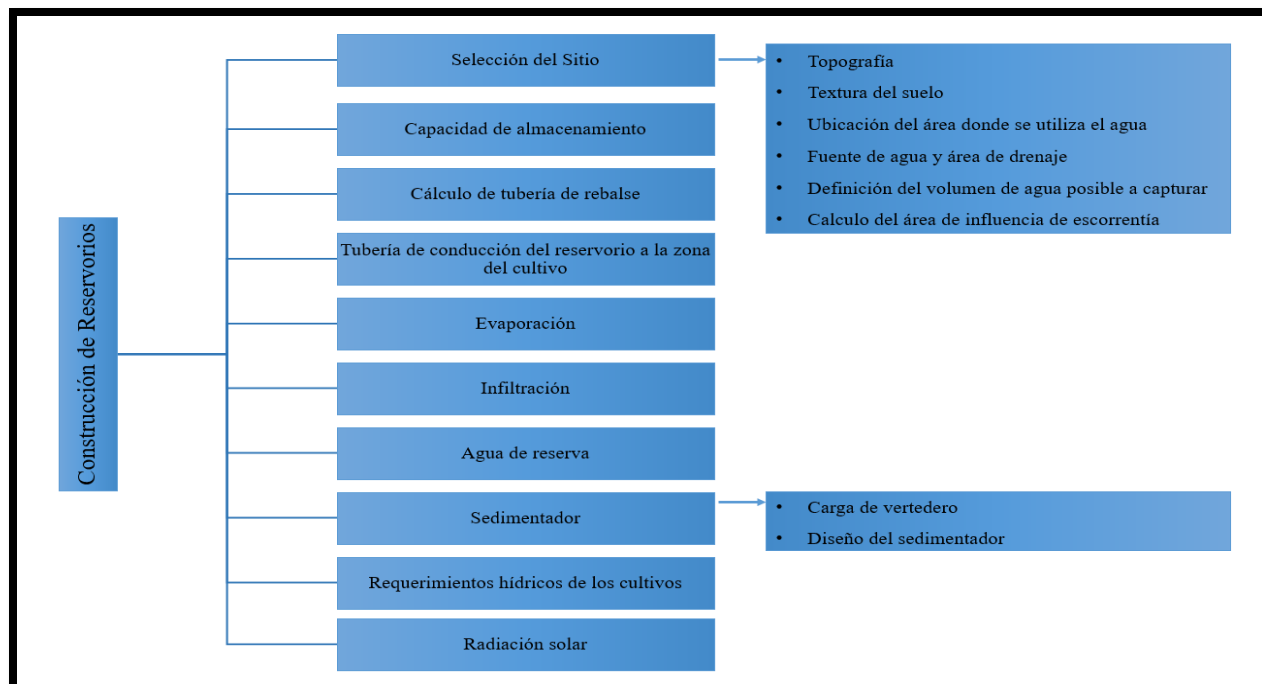
Este reservorio ayuda a almacenar agua por encima del nivel del suelo ya que se construye con paredes, pueden ser de concreto o plástico dependiendo del tamaño del mismo. Al igual que los anteriores si los suelos no son arcillosos, el piso se lo puede cubrir con plástico o geomembrana.



*Figura 8.* Reservorio tipo estanque revestido con plástico  
Fuente: CEMEDE y UNED (2009)

### 2.9.2. Elementos por considerar para la construcción de reservorios.

Salinas, Rodriguez y Morales (2010) hacen referencia que los siguientes elementos básicos pueden ser tomados en consideración al momento de construir un reservorio; (ver Figura 9).



**Figura 9.** Elementos necesarios por considerar para construir un reservorio.

**Fuente:** Salinas, Rodriguez y Morales (2010)

### 2.9.3. Construcción de un reservorio.

La construcción de un reservorio implica básicamente dos tipos de diseños (Salinas et al., 2010):

- **Estructural:** hace referencia al sistema de muro que se va a utilizar como presa y cuya función es detener el cauce natural en una zona donde se forma un estanque o piscina para almacenar agua. El muro se podrá construir con tierra, piedra o concreto dependiendo del tamaño de la represa, especialmente, su altura o profundidad del reservorio.
- **Hidráulico:** establece las dimensiones requeridas para tuberías de conducción y manejo del escurrimiento y agua lluvia para su almacenamiento. En esto es importante conocer los índices de lluvia característicos de la zona y disponer de sistemas de válvulas o vertederos, para manejar el nivel del reservorio y evitar el exceso del mismo.

Para proceder a la construcción de un reservorio se toma en cuenta el volumen de agua a almacenar, según la cantidad de tierra que se desea regar y los requerimientos de los cultivos.

Para facilitar el riego, el reservorio se lo construye aguas arriba de la zona de riego y así aprovechar la presión de gravedad o sino se tendrá que utilizar bombeo para las actividades de riego.

Al momento de iniciar la construcción del reservorio primero se extrae la vegetación presente y la capa arable del suelo ya que la misma no es la indicada para la construcción de diques. Para la construcción de los diques o terraplenes el material debe estar libre de raíces, materia orgánica, troncos y piedras de mayor de 10 cm con la finalidad que no comprometa la impermeabilidad de dichos diques.

La textura que debe tener el material debe ser arcilloso y libre de fragmentos como rocas, materia orgánica y desechos ya que con el tiempo tienden a descomponerse y ocasionar fugas y así mismo para la construcción de taludes el material debe extenderse en capas no mayores a los 15 cm de espesor y compactar bien antes de proceder con la siguiente capa (Salinas et al., 2010).

#### **2.9.4. Calidad de los materiales empleados para la construcción de reservorios.**

Para la construcción de reservorios es recomendable utilizar materiales con alto contenido de arcilla (exceptuando las expansivas). Materiales con más de 40% de arcilla son los mejores, no así los materiales muy arenosos, con menos del 20% de arcilla estos no son adecuados debido a que son permeables. Esta información se presenta en la tabla 7 (Salinas et al., 2010).

Tabla 7  
*Calidad de los materiales empleados para la construcción de presas*

<b>Clase de Material</b>	<b>Contenido de Arcilla (%)</b>	<b>Calidad del material del cuerpo de la presa</b>
Arcilla	40 – 60	Bueno, la superficie de la presa debe revestirse con algún tipo de protección.
Arcilla arenosa	20 – 40	Muy buena, no necesita medidas especiales
Arena arcillosa	10 – 20	Regular, se necesita medidas especiales para detener la infiltración.
Arenas	Menos de 20	Malo, no se admite para la construcción.

Fuente: Villamizar (1989)

#### **2.10. Investigaciones referenciales sobre impermeabilización de reservorios**

Armas (2002) establece algunos parámetros o factores para el diseño de presas de tierra, que entre los más comunes y determinantes esta la selección de tipo de suelo de acuerdo a su clasificación y la forma a colocar, éstos en cuanto a peso específico seco, humedad, energía y tipo

de compactación a utilizar en la construcción, esto para garantizar la mínima permeabilidad posible para que no se produzca fallas graves al momento de su funcionamiento.

En su estudio denominado “Criterios para Diseñar Presas de Tierra: Prioridad y Secuencia”, Armas (2002) detalla las siguientes medidas: Utilizar suelos plásticos en la medida de lo posible con  $I_p \geq 15\%$  ya que son materiales no propensos al agrietamiento, compactar los mismos con energías de compactación similares a las del Proctor Estándar estudiado en el laboratorio, compactar con humedades en un rango de valores  $\pm 2\%$  de la humedad óptima del Proctor Estándar y grados de compactación por encima del 90% de dicha energía. Todo esto se ratifica siempre y cuando se esté en presencia de “suelos no dispersivos”, todo esto con la finalidad de evitar fallas como; agrietamiento, sifonamiento mecánico, deslizamiento de taludes, perdidas por filtración, etc.

Según Suarez (2016) los suelos admisibles para ser usados en terraplenes de las presas de tierra se limitan a unas clasificaciones de suelo de: GC, GM, SC, SM, CL o ML, y asimismo considera aceptables a los suelos utilizados para núcleos de presas a las siguientes clasificaciones en orden de favorabilidad: GC, SC, CL, GM, SM, ML, CH, OL, MH, OH.

Villamizar (1989) señala que la cantidad de arcilla que se encuentre en un rango optimo debe contener del 20 % al 40 % de la misma, siendo este un material de buenas características, que no necesita medidas especiales, también manifiesta que el material correspondiente a arenas arcillosas, arcillas muy plásticas y limos elásticos, pueden ser usados en terraplenes o presas de tierra, siempre que los mismos no sobrepasen los ocho metros de altura.

### 3. Materiales y métodos

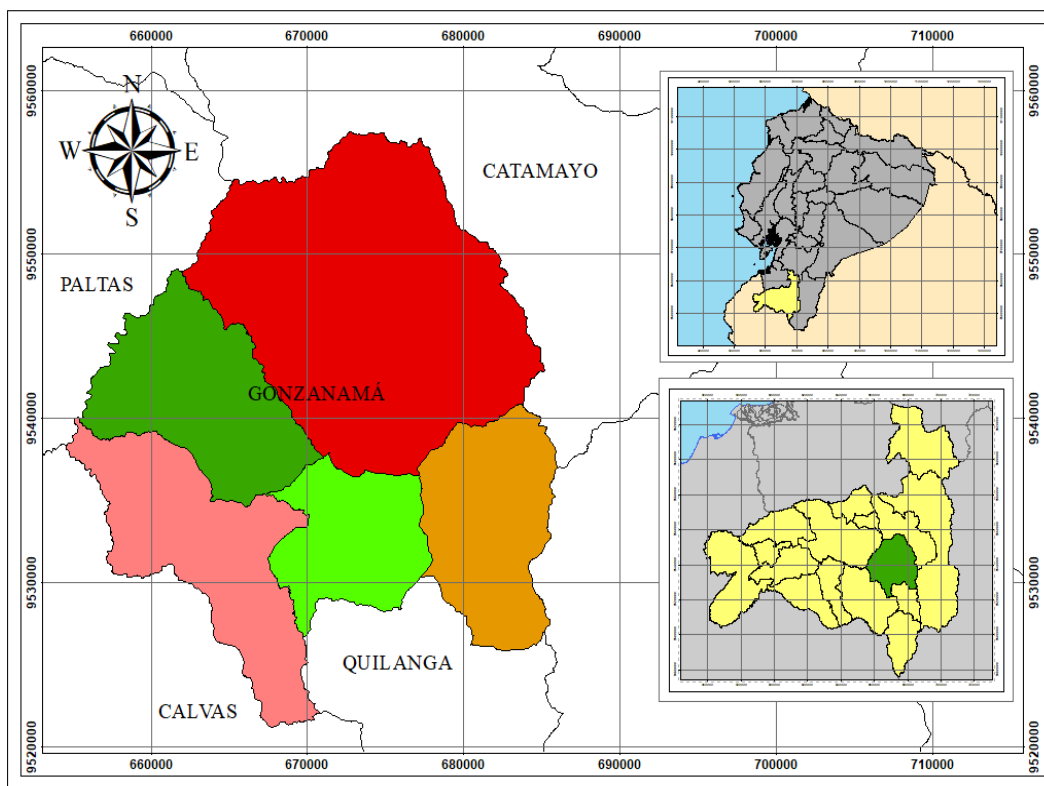
#### 3.1. Ubicación de la investigación

##### 3.1.1. Descripción del área de investigación.

El estudio, se realizó en el cantón Gonzanamá, provincia de Loja. Según el Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT) (2014), se encuentra ubicado a 79 km al sur oriente de la provincia de Loja; tiene una superficie de 681.93 km<sup>2</sup>; limita al norte con el Cantón Catamayo: parroquias de San Pedro de la Bendita y Catamayo, al sur con los cantones de Calvas y Quilanga: parroquias Cariamanga y Quilanga, al este con los cantones de Catamayo y Loja: parroquias El Tambo y Malacatos, al oeste con cantones Paltas y Calvas y las parroquias Catacocha y Cariamanga (Figura 10).

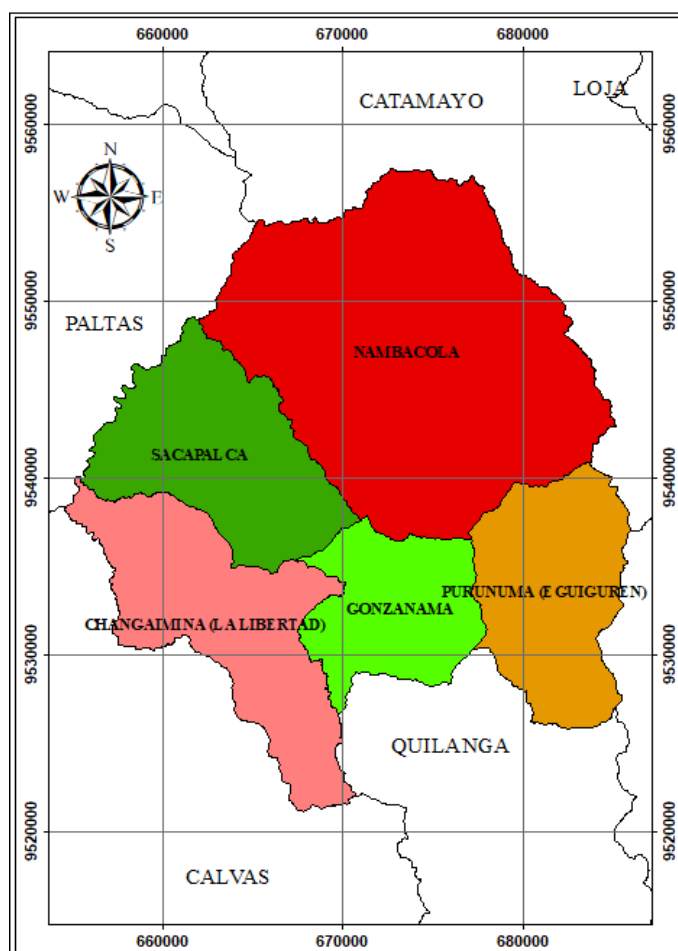
La zona de estudio se encuentra en las siguientes coordenadas:

- **Latitud:** 4° 20' a 4° 0' S
- **Longitud:** 79° 30' a 79° 0'5 W
- **Altitud:** 1739.5 msnm



*Figura 10.* Ubicación geográfica del Cantón Gonzanamá.

Está dividido políticamente en 5 parroquias, la urbana, Gonzanamá que es la cabecera cantonal; y las rurales Changaimina, Nambacola, Purunuma, y Sacapalca (Figura 11). Posee una temperatura promedio de 18 a 23°C que corresponden a los márgenes del río Catamayo, y promedios más bajos que disminuyen desde los 18 a 12 °C corresponden a la parte alta de Nambacola, Gonzanamá y Changaimina. Los valores anuales de precipitación en la parte alta oscilan entre los 900-1200 mm/año y en la parte baja las precipitaciones están en rangos de 600-900 mm/año.



*Figura 11.* División Política del Cantón Gonzanamá.

### 3.1.2. Universo de la investigación.

El universo de la investigación comprende los sectores de Sunamanga y la colina el Colombo ya que son dos sitios representativos donde se puede encontrar estas arcillas en estudio y son de fácil acceso para los habitantes del cantón y las mismas pueden ser aprovechadas, pero

dado la dificultad para encontrar dicho material en la colina el Colambo la investigación se basa en los materiales escogidos en Sunamanga.

A continuación, se presenta los lugares que fueron materia de estudio con sus respectivas coordenadas.

Vía antigua a Sacapalca  
Latitud  $4^{\circ} 12' 4.86''$  S  
Longitud  $79^{\circ} 26' 25.80''$  W

Salida de Sunamanga  
Latitud  $4^{\circ} 12' 7.75''$  S  
Longitud  $79^{\circ} 26' 23.14''$  W



*Figura 12.* Ubicación de los sitios de Sunamanga.

### 3.2. Métodos de investigación

El presente estudio requirió utilizar el método Científico, dentro del cual se encuentra al método Analítico;

El método científico es, un método o procedimiento que consiste en la observación sistemática, medición, experimentación, formulación, análisis y modificación de las hipótesis.

Ahora bien, el método analítico nos permite conocer más del objeto de estudio, con lo cual se puede: explicar, hacer analogías, comprender mejor su comportamiento y establecer nuevas teorías.

Este método científico se utilizó en el lapso del proyecto de investigación para recopilar información teórica y ésta permitió desarrollar el marco teórico correspondiente, así también permitirá cumplir con los objetivos propuestos al inicio del proyecto de investigación mediante el estudio de las propiedades físico-mecánicas de la arcilla en el laboratorio.

Mientras que el analítico permitió analizar, organizar, procesar, interpretar y sintetizar la información obtenida de la investigación bibliográfica, de campo y laboratorio, la misma que se representará en tablas, también permitirá la formulación de las conclusiones.

### **3.3. Materiales y metodología**

#### **3.3.1. Materiales.**

A continuación, se describen todos los materiales utilizados tanto en campo para la recolección de muestras como las de laboratorio para la realización de los ensayos pertinentes para la caracterización de las arcillas, así como el material de oficina.

##### **Materiales de campo**

- Sacos
- Pala
- Barreta
- Gps
- Cilindros
- Caja receptora de muestras
- Espátula
- Muselina (nylon)

##### **Materiales de oficina**

- Computadora
- Material bibliográfico
- Cámara fotográfica

##### **Materiales y equipos de laboratorio**

- Muestras de suelos



- Recipientes (cápsulas)
- Estufa (horno)
- Balanza
- Espátula
- Cuchillo
- Plato de porcelana
- Copa de Casagrande
- Ranurador
- Superficie de rodadura (placa de vidrio)
- Juego de tamices
- Vibrotamiz
- Dispositivo de agitación
- Hidrómetro
- Probeta de vidrio de 100 ml
- Termómetro
- Varilla de vidrio
- Cronómetro
- Agente dispersante (hexametáfosfato de sodio)
- Agua destilada
- Equipo de compactación (modificado o estándar)
- Permeámetro de cabeza constante de compactación
- Batería de permeámetro de cabeza constante

### **3.3.2. Metodología para la caracterización físico-mecánica de las arcillas.**

En Sunamanga y la colina el Colambo se recolectó las muestras y por medio de un reconocimiento visual y conversaciones con los moradores de la zona, se identificó los lugares donde se extraía material para ser usados con fines de construcción. Una vez recorrido la zona de Sunamanga se encontró yacimientos de arcilla, para poder realizar los análisis pertinentes, mientras en la colina el Colambo no se logró encontrar dicho material por tanto la investigación se basa en los materiales escogidos en Sunamanga, para su caracterización físico-mecánica, fue necesario realizar varios ensayos de laboratorio, basados en las correspondientes normas:

- **Determinación el contenido de humedad. Normas: ASTM D 2216/NTE INEN 690 (1982).**

Este ensayo nos sirve para cuantificar el contenido de agua de los suelos mediante secado al horno.

Primeramente, se necesita una muestra representativa suficiente para la realización del ensayo. Se escoge y registra la masa de 3 recipientes debidamente limpios y secos, en los cuales se colocará una porción,  $\frac{3}{4}$  del recipiente, del suelo húmedo, registrando su masa. Posteriormente el conjunto recipiente + muestra de suelo húmedo, se coloca en un horno para ser secado a 105 °C, en un intervalo de 12 a 24 horas. Después de secar la muestra se determina y registra la masa del recipiente + suelo seco. El resultado del contenido de humedad será por lo menos el promedio de dos humedades de la muestra analizada. Los cálculos se describen en el Anexo A.

- **Ensayo de Granulometría por tamizado. Normas: AASHTO T88-00/ASTM D 422/ NTE INEN 696.**

Este método de ensayo se lo realiza para determinar la gradación de materiales mediante tamizado.

Se necesita una masa representativa seca del suelo, previo al lavado de la misma, por el tamiz N° 200 para la eliminación del material fino, luego se procede a secar en el horno a una temperatura de 105 °C por 24 horas. El material ya seco que fue retenido, se coloca en el tamiz superior, de la serie de tamices utilizados (serie fina) y ordenados en forma decreciente según el tamaño de su abertura y se agita por medio de un aparato mecánico (Vibrotamiz) durante 15 minutos o manualmente durante un lapso de tiempo suficiente. Finalmente se registra la masa que ha sido retenida en cada tamiz, con esto datos se elaborara la curva granulométrica en una hoja semilogarítmica. Los cálculos se describen en el Anexo B.

- **Ensayo de Granulometría por hidrómetro. Normas: AASHTO T88-00/ASTM D 422.**

Este ensayo determina la distribución de los tamaños de las partículas menores de 75  $\mu\text{m}$ , la cual se realiza mediante un proceso de sedimentación, usando un hidrómetro.

Para comenzar con el ensayo se necesita dejar secar al ambiente la muestra por un día, para luego tamizar la misma, del peso total del suelo que pasa por el tamiz N° 200, se pesan 50 o 100 gramos de este suelo seco. Colóquese la muestra en un recipiente de 250 mL, agréguese agua destilada hasta que la misma quede sumergida, seguido de ello colocar el agente dispersante (hexametáfosfato de sodio), una cantidad de 125 mL de solución de hexametáfosfato de sodio (40g/l), dejar la muestra en remojo por un tiempo mínimo de 12 horas. Luego se coloca la muestra en el vaso de dispersión, lavando cualquier residuo que quede en el recipiente con agua destilada,

llevar el vaso de dispersión al aparato agitador durante 7 minutos aproximadamente. Seguido de esto se lleva la muestra al cilindro de sedimentación y adicionar agua destilada hasta la marca de 1000 mL. Antes de empezar el ensayo, agitar la suspensión hacia arriba y hacia abajo, durante 60 segundos. También se debe tener otra probeta graduada con 1000 mL de agua destilada y 125 mL de solución de hexametáfosfato. Una vez terminado de agitar la muestra, se coloca el hidrómetro dentro del cilindro de sedimentación y se anota las dos primeras lecturas al minuto y a los dos minutos, estas lecturas se realizan al tope del menisco, ya realizadas esas dos lecturas, se extrae cuidadosamente el hidrómetro de la suspensión y se coloca en la segunda probeta con agua destilada y el agente dispersante, Luego realizan las siguientes lecturas a los 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos del inicio de la suspensión, en cada una de las lecturas se debe tener especial cuidado al extraer el hidrómetro, una vez realizada cada lectura del hidrómetro se debe registrar la temperatura por medio del termómetro, ya que los cambios de temperatura de la suspensión durante la realización del ensayo afectan los resultados. Los cálculos se describen en el Anexo C.

- **Límite líquido. Normas: ASTM D 4318/ NTE INEN 691.**

Este método de ensayo consistió en determinar el contenido de agua de un suelo, valiéndose de un dispositivo mecánico (copa de Casagrande), donde una ranura de 12.75 mm se cierra mediante 25 golpes.

Inicialmente se tamiza el suelo por el tamiz N° 40, luego se pesa alrededor de 250 gramos y se procede a mezclar con agua destilada hasta lograr una pasta de suelo homogénea. Se coloca una porción de la pasta en la copa Casagrande extendiéndola, se nivela el suelo con la espátula, de tal manera que tenga profundidad de 10 mm. Con un acanalador, realizar un canal en la muestra, evitando separar de la copa, cuidando que la superficie inferior de la copa y la superficie de la base estén libres de suelo y agua, girar el manubrio a una velocidad de 2 revoluciones por segundo, contando los golpes necesarios para que las dos mitades de la muestra se pongan en contacto en una longitud aproximada de 10 mm. Si el número de golpes para la primera determinación se encuentra entre los 35 y 45 golpes se continua el ensayo normalmente, de lo contrario, añadir agua o secarlo al aire, se debe repetir este proceso hasta cumplir con la condición, luego se toma una porción de suelo para determinar el contenido de agua. Realizar por lo menos tres a cuatro puntos, usando la misma muestra, con nuevos incrementos de agua destilada, en diferente número de

golpes, que se encuentren entre los rangos de 25 a 35, 20 a 30, 15 a 25, así el rango en las tres repeticiones es por lo menos de 10 golpes. Los datos se los grafica en una hoja semilogarítmica.

- **Límite plástico y el índice de plasticidad. Normas: ASTM D 4318/NTE INEN 692.**

Este ensayo determina el contenido de agua, al momento de presionar y enrollar una pequeña porción de suelo plástico hasta obtener un diámetro de 3 mm aproximadamente, en el cual el pequeño cilindro de desmorona y no hay como seguirlo presionando ni enrollando.

Se inicia tomando aproximadamente 15 gramos de la muestra preparada para el límite líquido, luego se mezcla con agua destilada y se la mezcla completamente en un recipiente, hasta obtener una pasta de suelo homogénea similar a una plastilina. De la pasta de suelo se toma pequeñas fracciones para moldear con los dedos, formando una bola, seguidamente se le amasa y se rota en una placa de vidrio (esmerilado) presionándola muy levemente para formar rollitos de 3 mm de diámetro en 5 a 15 movimientos completos de la mano. Si el rollo de suelo se desintegra antes de alcanzar los 3 mm de diámetro, añadir agua a toda la masa de suelo, en ningún momento el operador debe intentar producir la falla exactamente a las 3 mm. Dos muestras más serán realizadas, de tal manera que se hagan tres determinaciones. Finalmente se toma las porciones de los rollos y se determina el contenido de agua. Los cálculos se describen en el Anexo E.

El índice de plasticidad se determina mediante la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

- **Ensayo de compactación con Proctor estándar. Normas: AASHTO T99-01/ASTM D 698.**

Este método de ensayo se utiliza para determinar la relación entre la humedad y masa unitaria de los suelos compactados en un molde de tamaño dado, con un martillo de 5.5 lb que cae a una altura de 12”.

Primeramente, la muestra se la deja secar al aire libre o en un horno que no exceda los 60 °C, luego se toma una muestra representativa, aproximadamente 3 kg de suelo pasante del tamiz N° 4. Se mezcla la muestra con agua destilada para humedecerla con el 4 % del peso total de la muestra. El suelo humedecido se compacta en el molde en tres capas aproximadamente iguales. Compactar cada capa con 25 golpes del pisón distribuidos uniformemente, aplicar los golpes en

una relación uniforme cerca de 25 golpes/minuto. Este proceso se realiza en un sitio uniforme y rígido. Luego de la compactación, se remueve el collarín para proceder a recortar cuidadosamente el suelo compactado que sobresalga en la parte superior del molde, usando una regla metálica. Posteriormente se pesa el molde con el suelo húmedo y se determina la masa unitaria húmeda (masa de suelo húmeda/volumen del molde) en  $\text{g/cm}^3$  o  $\text{kg/m}^3$ . Finalmente se saca la muestra compactada del molde para tomar una pequeña cantidad de muestra representativa de la cual se obtendrá el contenido de humedad. Luego se prepara nuevamente la muestra agregando suficiente agua para incrementar el contenido de humedad del suelo en 1 % a 2 %, repetir este proceso de incremento de agua hasta que haya una disminución de la masa húmeda del suelo compactado. Los cálculos se describen en el Anexo F.

Para todos estos ensayos se realizó tres repeticiones, de acuerdo a lo que indica la norma, con el fin de corroborar los resultados obtenidos.

Una vez realizado todos estos ensayos requeridos, con la información conseguida, se ingresó al sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) o (ASTHO), facilitando la identificación del suelo y sus características.

- **Clasificación del suelo**

La clasificación del suelo se la realiza, mediante el Sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), el cual ha sido considerado como válido en la norma ecuatoriana de la construcción NEC-15 y se lo emplea para clasificar suelos que van a ser utilizados en todo tipo de obra civil.

Con los datos que se obtenidos para la clasificación de suelos, se sigue los siguientes pasos:

Determinar el porcentaje de suelo que pasa el tamiz N° 200. Si pasa menos del 50% se trata de un suelo de grano grueso (grava o arena). Si pasa más del 50%, se trata de un suelo fino (limos o arcillas). Si se trata de suelos finos utilizar el Abaco de Casagrande. Esto se realiza para determinar la primera letra de la clasificación del suelo.

Mediante el límite líquido e índice de plasticidad se ubica en el Abaco de Casagrande para determinar el símbolo del grupo a la que pertenece cada muestra, fijándose donde se ubican los puntos sobre o debajo de la línea A. Luego se ubica en la Tabla 6 para establecer que nombre corresponde.

- **Ábaco de Casagrande**

Los suelos de grano grueso quedan perfectamente clasificados mediante los análisis granulométricos de tamizado.

Para clasificar los suelos de grano fino Casagrande ideó un método basado en los valores de los límites líquido y plástico del suelo. Representó en un ábaco el límite líquido en abscisas y el índice de plasticidad en ordenadas. El resultado fue que los suelos de naturaleza arcillosa se situaban siempre por encima de una línea que denominó línea A, y los suelos de naturaleza orgánica y limos por debajo de dicha línea. Así mismo encontró que por encima de otra línea (U o superior) no existían suelos. Por otro lado, fijó el valor del límite líquido igual a 50, para diferenciar los suelos de mayor o menor plasticidad, y asigno una simbología (iniciales del nombre en inglés) a los distintos tipos de suelo:

C = Arcillas

H = Alta plasticidad

M = Limos

L = Baja plasticidad

O = Suelos orgánicos

### **3.3.3. Metodología para determinar la permeabilidad.**

La determinación de la permeabilidad se la realizó por medio de la conductividad hidráulica, tanto con muestras no disturbadas como muestras disturbadas con la finalidad de poder observar como es el comportamiento del suelo en condiciones de su estado natural y al momento que se altera la misma.

#### ***3.3.3.1. Determinación de la conductividad hidráulica por medio del permeámetro de cabeza constante.***

Para la determinación de la permeabilidad por medio de este método, se sigue el procedimiento descrito a continuación:

##### ***3.3.3.1.1. Preparación del equipo.***

Para comenzar con el ensayo se prepara el equipo requerido incluidos todos sus accesorios, luego se pesa el cilindro más la base antes de ser colocada la muestra dentro de ella, quedando listo de esta manera para poder utilizarlo.

##### ***3.3.3.1.2. Preparación de la muestra.***

Se identifica que tipo de muestra va a ser utilizada, muestras inalteradas o muestras alteradas, en este caso se utilizó muestras alteradas, luego se sigue el siguiente procedimiento:

- Para comenzar con el ensayo se debe contar con los datos de densidad seca y contenido de humedad, determinados mediante el ensayo de compactación (Proctor) en el laboratorio.
- Usar muestra secada al horno y con tamaño de partículas menor a 3/8" (tamizar la muestra por la malla N° 3/8").
- Calcular la cantidad de agua (gr), teniendo como dato el óptimo contenido de humedad del ensayo de compactación.
- Luego mezclar la muestra con agua de manera que se forme una masa uniforme.
- Compactar la muestra de suelo en cinco capas y cada capa se compactará con 25 golpes cada una.
- Poner a saturar la muestra durante un lapso de 12 a 24 horas.
- Luego, quitar la presión de confinamiento y colocar la muestra en el equipo del permeámetro de compactación para determinar la permeabilidad.

#### *3.3.3.1.3. Medición de la conductividad hidráulica.*

Una vez puesto en funcionamiento el permeámetro de compactación, se realiza la medición de la conductividad hidráulica mediante la siguiente expresión:

$$k = \frac{Q * L}{A * t * h}$$

Donde:

$k$  = conductividad hidráulica (cm/s)

$Q$  = cantidad de flujo (cm<sup>3</sup>)

$L$  = longitud de la muestra (cm)

$A$  = área transversal de la muestra (cm<sup>2</sup>)

$t$  = intervalo de tiempo (s)

$h$  = diferencia de carga hidráulica (m H<sub>2</sub>O)

#### *3.3.3.2. Determinación de la conductividad hidráulica (k) por medio de la batería de permeámetro de cabeza constante.*

Agila, González y Sivisaca (1986) establecen el siguiente procedimiento para la realización de este ensayo:

### 3.3.3.2.1. Preparación de las muestras.

Una vez tomadas las muestras sin disturbar fueron transportadas al laboratorio, donde se colocó una muselina (nylon) en la parte inferior del cilindro que contenían las muestras de suelo, estas debidamente ajustadas, luego se colocan en agua para su saturación por un tiempo de 24 a 48 horas, para lograr esa saturación se colocan en unos baldes o tina con agua a un nivel no mayor a la mitad del cilindro y las muestras por capilaridad tienden a saturarse.

### 3.3.3.2.2. Montaje de muestras.

Una vez que se logra la saturación de todas las muestras se debe colocar un papel filtro en la parte superior de esta, con el fin de evitar el daño de la estructura del suelo por el derrame de agua. La parte inferior del cilindro con la muestra siguió en contacto con la muselina, posteriormente se trasladó a la batería del permeámetro para colocarlo sobre una malla de aluminio y sobre ella se colocó un cilindro de las mismas dimensiones, este cilindro está conectado a la pared frontal de la piscina por medio de unas mangueras a las cuales se les colocó unas llaves de precisión con las que se regula el paso de agua desde la piscina hacia el cilindro. Para permitir el flujo el agua se abrieron las llaves, regulándose de tal manera que la cantidad de agua que ingrese sea igual a la que sale. De esta manera se logró mantener una cabeza constante.

### 3.3.3.2.3. Evaluación de la Conductividad Hidráulica.

Una vez puesto en funcionamiento la batería del permeámetro de cabeza constante, se recolectó el líquido percolado de cada muestra en una probeta evitando tener pérdidas.

La carga hidráulica se la determinó de la siguiente manera: en el cilindro que contenía el agua se determinó la altura a la que llegaba; entonces la carga hidráulica se determina con la siguiente expresión;

$$\Delta h = H_{de\ los\ cilindros} - H_a\ la\ que\ llegó\ el\ agua$$

La altura de los cilindros se mantendrá constante con un valor de 20 cm mientras que la altura a la que llega el agua será la que siempre varíe.

La cantidad de agua percolada a través del núcleo de suelo tuvo que volverse constante en un determinado tiempo. Una vez que se logró la estabilización se recolecta 100 ml de agua en una



probeta o la cantidad que se crea conveniente dependiendo del tipo de suelo, mediante un cronómetro se tomó el tiempo empleado para recoger ese volumen de agua.

Con la ayuda de un termómetro se determinó la temperatura en °C de agua en la piscina del permeámetro para hacer la corrección de la conductividad hidráulica.

#### 3.3.3.2.4. Cálculo de la conductividad hidráulica.

El cálculo de la conductividad hidráulica se realizó mediante la siguiente expresión:

$$K = \frac{Q * L}{t * A * \Delta h}$$

Donde:

K = Conductividad hidráulica en el laboratorio (cm/s)

Q = Volumen o caudal recogido (cm<sup>3</sup>)

L = Longitud de la muestra (cm)

A = Área de la sección transversal de la muestra (cm<sup>2</sup>)

$\Delta h$  = carga bajo la cual se produce la filtración (cm)

t = tiempo en que se efectúa la prueba para recolectar el caudal Q (s).

Para la determinación de este parámetro existen dos constantes: L=10 cm y A=51.53 cm<sup>2</sup>, que corresponden al recipiente donde se toma la muestra de suelo.

Una vez encontrado el valor de la conductividad hidráulica se hizo la corrección para expresarla a la temperatura de 20 °C y no a la temperatura que se realizó el ensayo, debido a que la viscosidad del agua varía según la temperatura, el coeficiente de permeabilidad se ha normalizado a 20 °C. La corrección se realiza con la siguiente expresión:

$$K_s = K_t * \frac{\mu_t}{\mu_{20^\circ C}}$$

Donde:

K<sub>s</sub> = K para el agua a 20 °C

K<sub>t</sub> = K para el agua en el laboratorio

$\mu$  = Viscosidad dinámica del agua

$\frac{\mu_t}{\mu_{20^\circ C}}$  = Relación entre la viscosidad a la temperatura hallada y a la viscosidad a 20 °C. Estos valores se encuentran en el Anexo G (González, 1984).

Con la ayuda de la siguiente tabla se procede a clasificar a la permeabilidad hallada por este método de ensayo.

Tabla 8  
*Clasificación de la permeabilidad*

Clase	Permeabilidad	
	cm/h	m/día
Muy lenta	menor a 0.1	menor a 0.03
Lenta	0.1 - 0.5	0.03 - 0.12
Moderadamente lenta	0.5 - 2.0	0.12 - 0.50
Moderada	2.0 - 6.0	0.50 - 1.50
Moderadamente rápida	6.0 - 12.0	1.50 - 3.00
Rápida	12.0 - 18.0	3.00 - 4.50
Muy rápida	mayor a 18	mayor a 4.50

Fuente: UNL (1979)

## 4. Resultados

### 4.1. Caracterización física-mecánica de las arcillas

Se obtuvieron resultados como distribución granulométrica, la consistencia del suelo (límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad), la clasificación de suelos ASTM - SUCS. (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos), identificándolos por medio de símbolos y grupos según el tipo de suelo, también se obtuvo la densidad seca máxima del suelo y a su vez el óptimo contenido de humedad.

Para su mejor identificación al momento de realizar los ensayos a las muestras se las designó con una letra, en este caso las letras S (muestra 1) y H (muestra 2), para los suelos de la vía antigua a Sacapalca y para el suelo correspondiente a la salida de Sunamanga, respectivamente.

#### 4.1.1. Contenido de humedad.

El contenido de humedad de las muestras de suelo en estudio se presenta a continuación.

Tabla 9  
*Contenido de humedad de la muestra S de suelo*

	Nº Muestra	S1	S2	S3
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>13</b>	<b>37</b>	<b>44</b>
Peso del recipiente	gr	32.8	33.2	33.3
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	87.4	83.3	72.1
Peso del recipiente + muestra seca	gr	76.5	73	64.3
Contenido de Humedad	%	24.9	25.9	25.2
<b>Promedio (%)</b>		<b>25.3</b>		

Tabla 10  
*Contenido de humedad de la muestra H de suelo*

	Nº Muestra	H1	H2	H3
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>38</b>	<b>41</b>	<b>4</b>
Peso del recipiente	gr	32.3	30.5	30.3
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	102.4	99.9	100.5
Peso del recipiente + muestra seca	gr	88.3	87.8	86.9
Contenido de Humedad	%	25.2	21.1	24.0
<b>Promedio (%)</b>		<b>23.4</b>		

#### 4.1.2. Granulometría por tamizado.

La clasificación granulométrica por medio de tamizado de las dos muestras de suelo en estudio se presenta en las siguientes tablas.

Tabla 11  
Granulometría por tamizado de la muestra S de suelo

TAMIZ INEN (ASTM)	Masa retenida parcial (g)	Masa retenida acumulada (g)	% Retenido	% Que pasa	% que quedó en cada tamiz
2 mm (N° 10)	-	-	-	100.00	-
1.18 mm (N° 16)	-	-	-	100.00	-
850 $\mu\text{m}$ (N° 20)	-	-	-	100.00	-
600 $\mu\text{m}$ (N° 30)	-	-	-	100.00	-
425 $\mu\text{m}$ (N° 40)	1.20	1.20	0.60	99.40	0.60
300 $\mu\text{m}$ (N° 50)	3.80	5.00	2.50	97.50	1.90
250 $\mu\text{m}$ (N° 60)	3.40	8.40	4.20	95.80	1.70
180 $\mu\text{m}$ (N° 80)	6.60	15.00	7.50	92.50	3.30
150 $\mu\text{m}$ (N° 100)	4.00	19.00	9.50	90.50	2.00
75 $\mu\text{m}$ (N° 200)	17.40	36.40	18.20	81.80	8.70
Pasa 75 $\mu\text{m}$	163.60	200.00	100.00	0.00	81.80
$\Sigma =$	200.00				

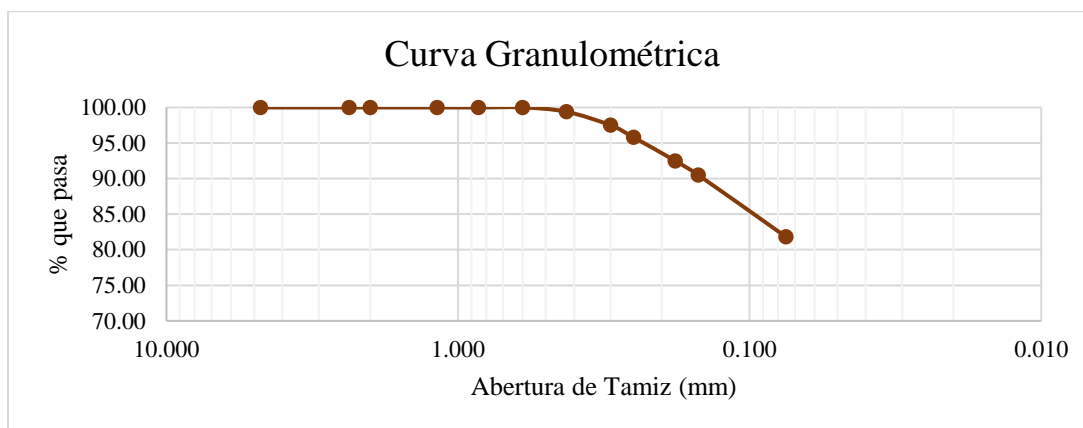


Figura 13. Curva granulométrica de la muestra S de suelo por medio del tamizado.

Tabla 12  
Granulometría por tamizado de la muestra H de suelo

TAMIZ INEN (ASTM)	Masa retenida parcial (g)	Masa retenida acumulada (g)	% Retenido	% Que pasa	% que quedó en cada tamiz
2 mm (N° 10)	-	-	-	100.00	-
1.18 mm (N° 16)	-	-	-	100.00	-
850 $\mu\text{m}$ (N° 20)	-	-	-	100.00	-
600 $\mu\text{m}$ (N° 30)	-	-	-	100.00	-
425 $\mu\text{m}$ (N° 40)	1.10	1.10	0.55	99.45	0.55
300 $\mu\text{m}$ (N° 50)	4.70	5.80	2.90	97.10	2.35
250 $\mu\text{m}$ (N° 60)	6.80	12.60	6.30	93.70	3.40
180 $\mu\text{m}$ (N° 80)	18.40	31.00	15.50	84.50	9.20
150 $\mu\text{m}$ (N° 100)	9.30	40.30	20.15	79.85	4.65
75 $\mu\text{m}$ (N° 200)	23.80	64.10	32.05	67.95	11.90
Pasa 75 $\mu\text{m}$	135.90	200.00	100.00	0.00	67.95
$\Sigma =$	200.00				

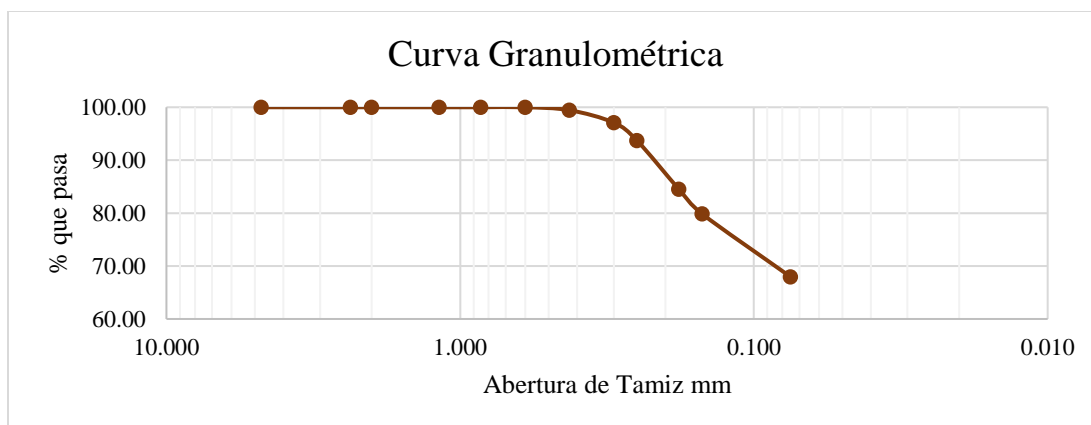


Figura 14. Curva granulométrica de la muestra H de suelo por medio del tamizado.

#### 4.1.3. Granulometría por método del hidrómetro.

Tabla 13

Granulometría por método del hidrómetro de la muestra S de suelo

TIEMPO	TIEMPO (min)	D (mm)	% que pasa	% Retenido	Tipo Partícula
0 min	0	0.0000	0.00	0.00	
1 min	1	0.0000	0.00	0.00	
2 min	2	0.0000	0.00	0.00	
5 min	5	0.0000	0.00	0.00	
15 min	15	0.0097	55.50	44.50	Limo
30 min	30	0.0074	48.50	7.00	Limo
60 min	60	0.0056	41.40	7.10	Limo
120 min	120	0.0043	33.20	8.20	Limo
250 min	250	0.0032	26.00	7.20	Arcilla
24 horas	1440	0.0015	15.80	10.20	Arcilla
<b>PORCENTAJE DE MATERIAL</b>					
				Limo	Arcilla
				66.80	33.20

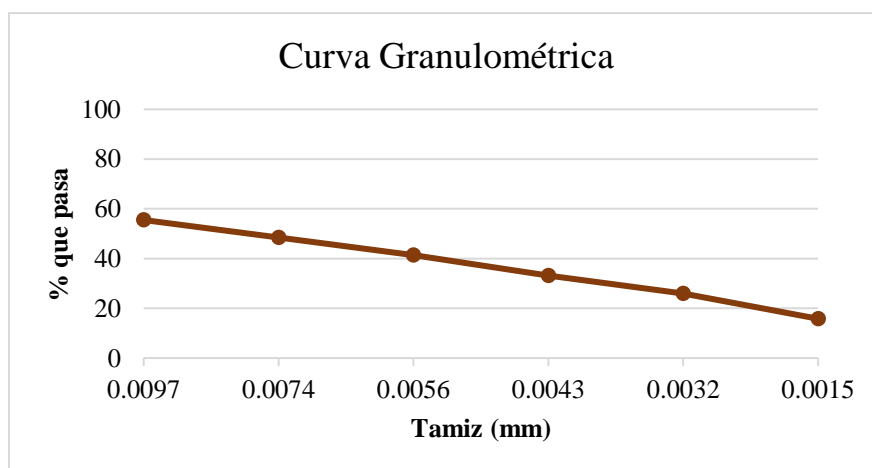


Figura 15. Curva Granulométrica del pasante del Tamiz N° 200 de la muestra S de suelo.

Tabla 14  
Granulometría por método del hidrómetro de la muestra H de suelo

TIEMPO	TIEMPO (min)	D (mm)	% que pasa	% Retenido	Tipo Partícula
0 min	0	0.0000	0.00	0.00	
1 min	1	0.0000	0.00	0.00	
2 min	2	0.0000	0.00	0.00	
5 min	5	0.0000	0.00	0.00	
15 min	15	0.0100	58.90	41.10	Limo
30 min	30	0.0075	52.90	6.00	Limo
60 min	60	0.0057	44.90	8.00	Limo
120 min	120	0.0045	33.90	11.00	Limo
250 min	250	0.0032	26.00	7.90	Arcilla
24 horas	1440	0.0015	13.80	12.20	Arcilla
<b>PORCENTAJE DE MATERIAL</b>					
				Limo	Arcilla
				66.10	33.90

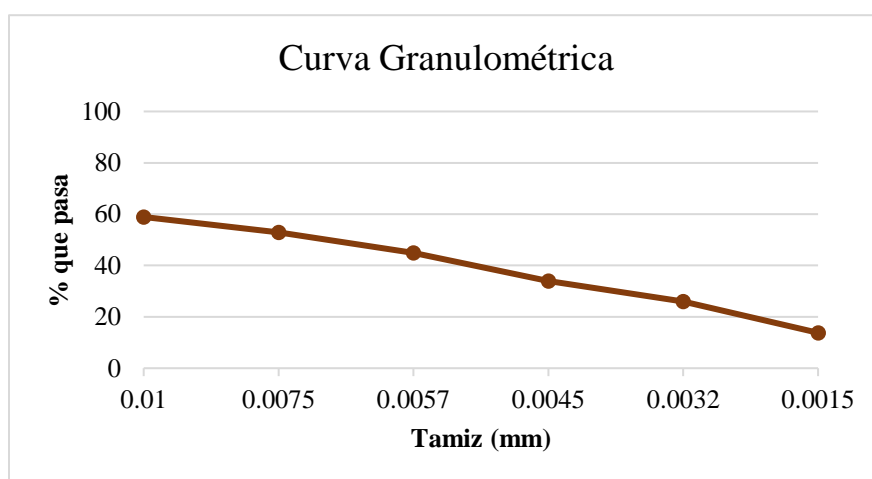


Figura 16. Curva Granulométrica del pasante del Tamiz N° 200 de la muestra H de suelo.

En la siguiente tabla se presentan los resultados del ensayo de clasificación granulométrica para las dos muestras de suelo en estudio, realizado por el método de tamizado y por medio del hidrómetro.

Tabla 15  
Granulometría correspondiente a las dos muestras de suelo en estudio

Material	Muestra de suelo S	
	% retenido	% desegregación fino retenido
Arena	18.2	
Limo		54.6
Arcilla		27.2
Material	Muestra de suelo H	
	% retenido	% desegregación fino retenido
Arena	32.1	
Limo		44.9
Arcilla		23.0

#### 4.1.4. Consistencia del suelo.

Para la consistencia del suelo se determinó los límites de Atterberg los cuales son; el límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad.

##### 4.1.4.1. Límite líquido.

El límite líquido se procedió como lo establece las normas ASTM D-4318 e INEN 69.

A continuación, se muestran los resultados de las dos muestras de suelo en estudio, las figuras muestran los valores de humedad versus el número de golpes, a partir de los cuales se determinó el valor del límite líquido mediante interpolación lineal.

Tabla 16  
Resultados del límite líquido de la muestra de suelo S

# de recipiente	Unidades	D3	D4	D5
Peso del recipiente	gr	33.2	32.4	31.7
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	51.6	47.8	47.6
Peso del recipiente + muestra seca	gr	44.8	42.3	42.1
Contenido de Humedad	%	58.6	55.6	52.9
Número de Golpes		16	23	31

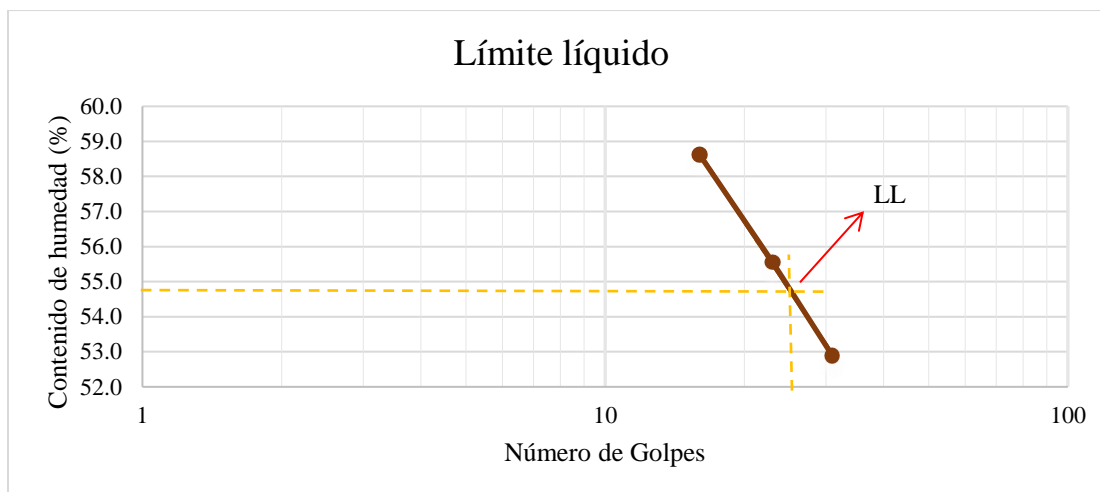


Figura 17. Límite líquido de la muestra de suelo S.

Tabla 17  
Resultados del límite líquido de la muestra de suelo H

# de recipiente	Unidades	18	33	30
Peso del recipiente	gr	30.6	33.2	31.5
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	45.5	48.6	47.8
Peso del recipiente + muestra seca	gr	41.1	43.9	42.7
Contenido de Humedad	%	41.9	43.9	45.5
Número de Golpes		31	22	17

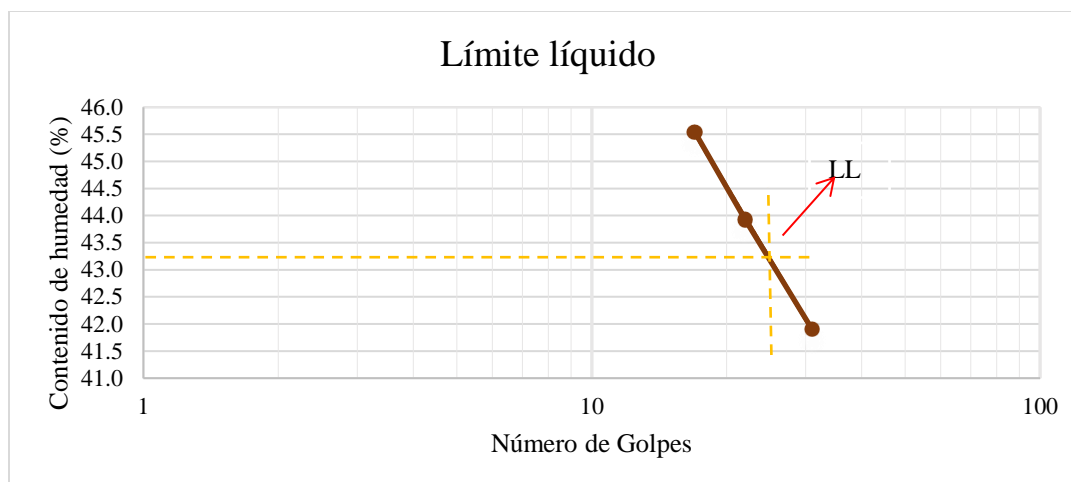


Figura 18. Límite líquido de la muestra de suelo H.

Tabla 18

Valores de límite líquido de las muestras en estudio a 25 golpes

Límite Líquido a 25 golpes		
Muestra	Número de Golpes	Límite líquido
S	25	54.8
H	25	43.2

#### 4.1.4.2. Límite plástico e índice de plasticidad.

Para la determinación del límite plástico de las dos muestras de suelo en estudio tanto S como H, se procedió como lo establecen las normas ASTM D 4318/NTE INEN 692, a continuación, en la tabla 19 se presentan los valores determinados para las dos muestras de suelo.

Tabla 19

Valores de límite plástico de las muestras de suelo en estudio

# de recipiente	Unidades	S		H	
		D3	D4	22	18
Peso del recipiente	gr	17.7	17.3	32.6	31.4
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	29.7	28.3	43.2	41.1
Peso del recipiente + muestra seca	gr	26.9	25.8	40.2	39.1
Contenido de Humedad	%	30.4	29.4	27.6	26.0
		<b>Promedio:</b>	<b>29.9</b>	<b>Promedio:</b>	<b>26.8</b>

Una vez obtenidos los datos tanto del Límite líquido como el Límite plástico para las dos muestras, se realizó el cálculo del índice de plasticidad con los datos obtenidos.

Tabla 20

Valores del índice de plasticidad de las muestras en estudio

Muestra	Límite líquido (LL)	Límite plástico (LP)	Índice de plasticidad(IP)
S	54.8 %	29.9 %	24.9 %
H	43.2 %	26.8 %	16.4 %



#### 4.1.5. Clasificación del suelo.

Para la muestra de suelo S el porcentaje que pasa por el tamiz N° 200 es mayor a 50%, por lo que pertenece a un suelo de partículas finas, y por su límite líquido mayor a 50% se trata de limos y arcillas. Como se considera un suelo de granos finos se utilizó la carta de plasticidad, por medio del límite líquido e índice de plasticidad, estos valores se ubican en el Abaco de Casagrande.

Tabla 21

*Datos para la clasificación de suelos SUCS*

Muestra de suelo S				
% que pasa en el tamiz 200	% retenido en el tamiz 200	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad
81.80	18.20	54.8 %	29.9 %	24.9 %
Muestra de suelo H				
% que pasa en el tamiz 200	% retenido en el tamiz 200	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad
67.95	32.05	43.2 %	26.8 %	16.4 %

Los datos anteriores permiten definir al suelo estudiado como un suelo de grano fino (MH), específicamente a limos elásticos de media a alta plasticidad.

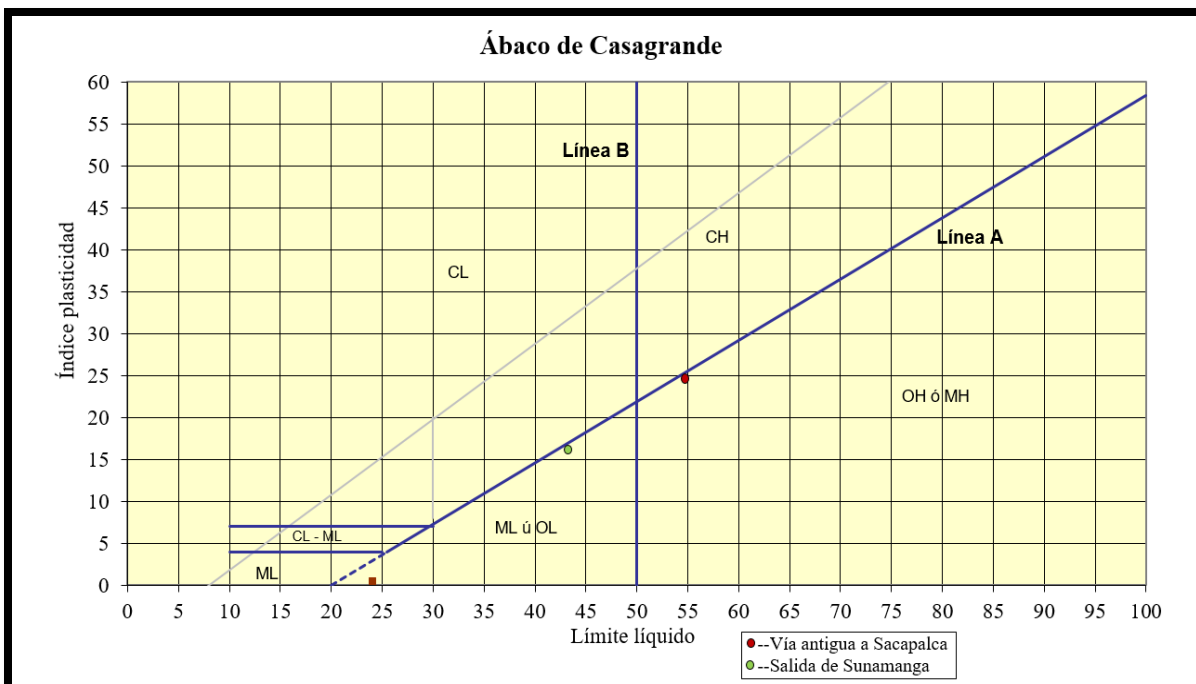
Mientras tanto para la muestra de suelo H el porcentaje que pasa por el tamiz N° 200 es mayor a 50%, por lo que pertenece igualmente a un suelo de partículas finas, y por su límite líquido menor a 50% se trata de suelos limos y arcillas. Al igual que la muestra anterior se utiliza la carta de plasticidad para identificar por símbolos al tipo de suelo en estudio.

El símbolo para esta muestra de suelo corresponde a ML, particularmente a limos arcillosos con ligera plasticidad.

Tabla 22

*Tipo de suelo de las muestras estudiadas, según SUCS*

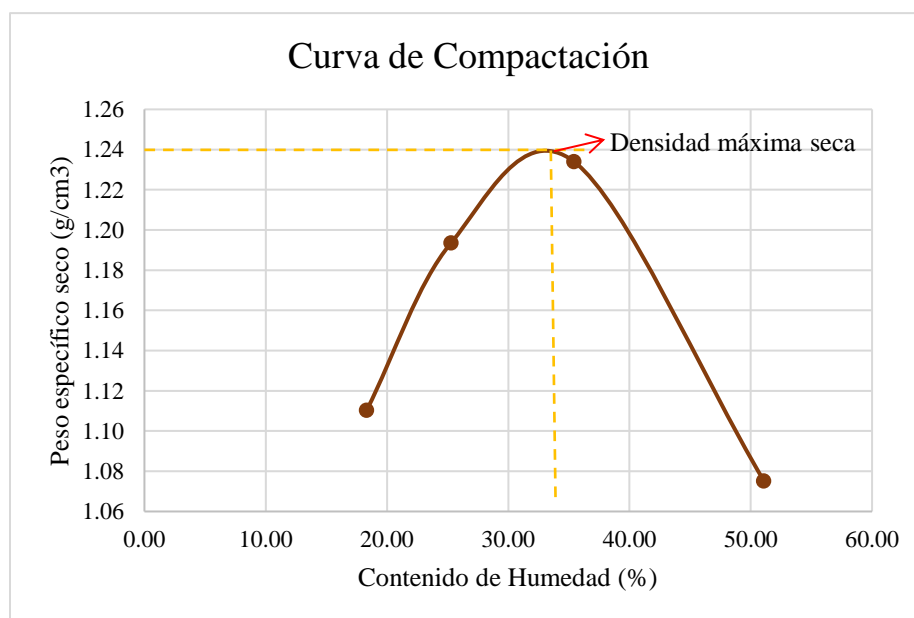
Muestra	Simbología	Descripción
S	MH	Limo elásticos de media a alta plasticidad
H	ML	Limos arcillosos con ligera plasticidad.



**Figura 19.** Clasificación de las muestras de suelo en estudio.

#### 4.1.6. Compactación.

Realizado el ensayo Proctor estándar, se logra obtener la densidad seca máxima y a su vez el óptimo contenido de humedad, el mismo ensayo elaborado para las dos muestras de suelo correspondientes a Sunamanga, resultados que se consolidan en las siguientes figuras:



**Figura 20.** Curva de compactación correspondiente a la muestra de suelo S.

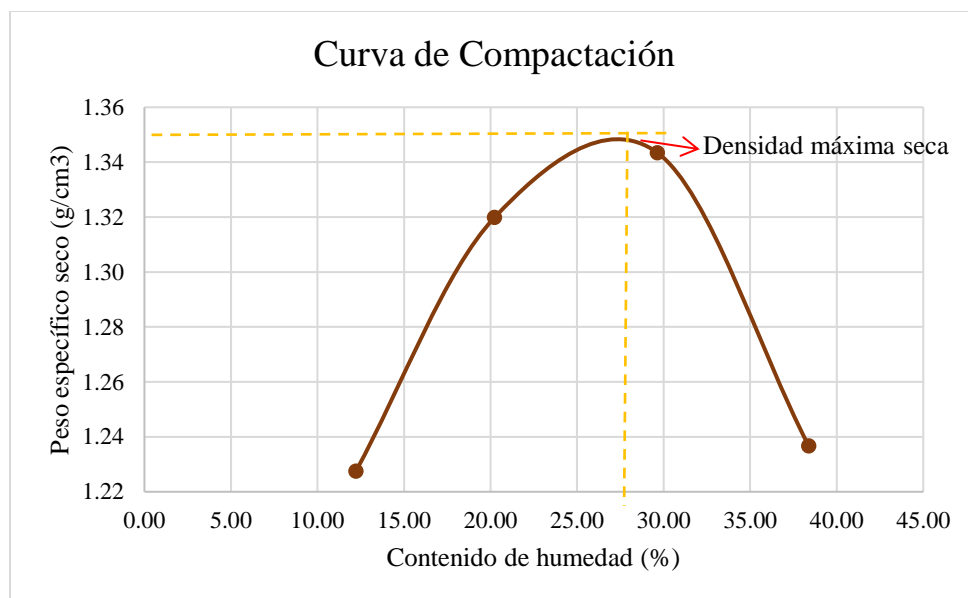


Figura 21. Curva de compactación correspondiente a la muestra de suelo H.

Tabla 23

Resultados de la curva de compactación de las dos muestras de suelo

Resultados de curva de compactación		
Muestra de Suelo	S	H
Densidad máxima seca	1.24 g/cm <sup>3</sup>	1.35 g/cm <sup>3</sup>
Óptimo contenido de humedad	33.00 %	28 %

## 4.2. Determinación de la permeabilidad

Los resultados de la permeabilidad se la obtuvieron por medio del permeámetro de cabeza constante, el primero corresponde a muestras disturbadas y el segundo método a muestras de suelo no disturbadas, esta se mide a través del coeficiente de permeabilidad  $k$ .

### 4.2.1. Determinación de la conductividad hidráulica por medio del permeámetro de cabeza constante.

Los resultados del ensayo de permeabilidad por medio del permeámetro de compactación se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 24

Valores de permeabilidad de las muestras en estudio

Muestra	Cantidad de flujo, $Q$ (cm <sup>3</sup> )	Longitud de la muestra, $L$ (cm)	Intervalo de tiempo, $t$ (s)	Área transversal de la muestra, $A$ (cm <sup>2</sup> )	Diferencia de carga hidráulica, $\Delta h$ (cm)	Permeabilidad, $k$ (cm/s)
S	1	16.0	43200	81.71	103	$4.40 \times 10^{-8}$
H	1	15.5	86400	81.71	103	$2.13 \times 10^{-8}$

#### 4.2.2. Determinación de la conductividad hidráulica (k) por medio de la batería de permeámetro de cabeza constante.

En la siguiente tabla se plasman los resultados de ensayo de permeabilidad de las muestras de suelo en estudio las cuales se tomaron de forma no disturbada.

Tabla 25

Valores de permeabilidad correspondientes a las muestras de suelo no disturbadas

Muestra	Caudal recogido, Q (cm <sup>3</sup> )	Longitud de la muestra, L (cm)	Intervalo de tiempo, t (s)	Área transversal de la muestra, A (cm <sup>2</sup> )	Carga hidráulica, Δh (cm)	Conductividad hidráulica del laboratorio, K (cm/h)	Relación de viscosidad $\frac{\mu t}{\mu_{20^{\circ}C}}$	Conductividad hidráulica a 20 °C, K (cm/h)
S1	100	10	7680	51.53	16.2	0.56	1.048	0.59
S2	100	10	6480	51.53	16.8	0.64	1.048	0.67
S3	100	10	6000	51.53	17.0	0.68	1.048	0.72
S4	100	10	6900	51.53	17.0	0.60	1.048	0.62
<b>Promedio</b>								0.65
H1	100	10	15000	51.53	15.4	0.30	1.048	0.32
H2	100	10	16680	51.53	13.0	0.32	1.048	0.34
H3	100	10	13680	51.53	13.6	0.38	1.048	0.39
H4	100	10	12000	51.53	14.5	0.40	1.048	0.42
<b>Promedio</b>								0.37

## **5. Discusión**

### **5.1. Caracterización física-mecánica de las arcillas**

#### **5.1.1. Contenido de humedad del suelo.**

Así tenemos como resultados para los suelos de la vía antigua a Sacapalca y para el suelo correspondiente a la salida de Sunamanga unos contenidos de humedad promedio de 25.3 % y 23.4 % respectivamente como se indican en la Tabla 9 y Tabla 10, estos valores nos permitieron cuantificar la cantidad de agua que está presente en el suelo al momento de la recolección de las muestras.

En cuanto a la humedad del suelo se debe tener en cuenta que la misma es relativa al mes en que ha sido tomada la muestra, debido a que este parámetro está estrechamente relacionado con la época de invierno y verano del sitio.

De acuerdo al contenido de humedad del suelo, la compactación se debería realizar en los meses que la humedad natural disponible se encuentre cerca de humedad óptima de la compactación del Proctor Estándar (diciembre-abril), esto para no necesitar un incremento significativo de humedad, dado que en algunas zonas es difícil tener acceso a suficiente agua para poder llevar el suelo al óptimo contenido de humedad, esto siempre y cuando se utilice grandes volúmenes de suelo.

#### **5.1.2. Clasificación del suelo.**

Los suelos en estudio, prácticamente pertenecen a la clasificación de suelos de grano finos descartando por completo la clasificación de grano grueso, como se observa en las Figuras 13 y 14, debido a que más del 50 % del suelo paso por el tamiz N° 200.

Debido a que la clasificación granulométrica no representa un indicador notable para la caracterización del suelo, convendrá tener un enfoque en otros parámetros, como lo es la consistencia del suelo o lo que es lo mismo los límites de Atterberg, esto para tener una información apropiada sobre el comportamiento del suelo.

Según la carta de plasticidad de Casagrande, para los dos ensayos realizados nos dan las siguientes clasificaciones; suelo MH, específicamente a limos elásticos de media a alta plasticidad

y suelo ML, correspondiente a limos arcillosos con ligera plasticidad, esto para los suelos de la vía antigua a Sacapalca y para el suelo correspondiente a la salida de Sunamanga respectivamente.

Estos resultados se dan debido a que en la carta de plasticidad el grupo ML comprende la zona abajo de la línea A, definida por  $LL < 50\%$  y asimismo el grupo MH corresponde a la zona abajo de la línea A, definida por  $LL > 50\%$ .

### **5.1.3. Curva de compactación del suelo**

En las Figuras 20 y 21 se puede observar las curvas de compactación para cada suelo; en estas figuras se puede visualizar que mientras incrementa el contenido de humedad, incrementa también el peso específico seco hasta cierto punto en el que empieza a decrecer. En el punto en el que empieza a decrecer la curva el peso específico seco es el máximo que se puede obtener en el ensayo de compactación. La abscisa que representa a este máximo, constituye el óptimo contenido de humedad.

Revolorio (2013) manifiesta que el peso específico seco decrece, después del punto de óptimo contenido de humedad, esto se debe a que el agua ocupa todos los vacíos que corresponderían ser llenados por las partículas de suelo. El agua adicionada a partir de ese punto, lo único que genera es separar las partículas entre sí y disminuir la densidad.

Mediante la energía de compactación utilizada en el ensayo Proctor estándar lo que se propone es cumplir con los requerimientos que demanda el terraplén en un reservorio o presa cuando esté en funcionamiento, Cullquipuma y Maldonado (2014) plantean los siguientes requerimientos: estabilidad, baja permeabilidad y flexibilidad.

En lo concerniente a las humedades óptimas de compactación de Proctor Estándar se ha determinado unas curvas de compactación con un peso específico seco máximo y un óptimo contenido de humedad, la cual se utilizará para el análisis de la permeabilidad del suelo en el permeámetro de compactación. Los dos ensayos realizados arrojaron valores de humedades óptimas de 33 % y 28 % con pesos específicos secos máximos de  $1.24 \text{ g/cm}^3$  y  $1.35 \text{ g/cm}^3$  esto para los suelos de la vía antigua a Sacapalca y para el suelo correspondiente a la salida de Sunamanga respectivamente.

En el caso de reservorios o presas de tierra se debe especificar exactamente el peso específico máximo seco que se quiere alcanzar, con que humedad óptima, las mismas que se las encuentra mediante el ensayo del Proctor estándar que se realiza en laboratorio, y que energía de compactación es la esencial para provocar las mejores condiciones del terraplén una vez puesto en marcha.

## **5.2. Permeabilidad del suelo**

### **5.2.1. Determinación de la conductividad hidráulica por medio del permeámetro de cabeza constante.**

Los resultados conseguidos de la conductividad hidráulica mediante el permeámetro de compactación que tiene como principio la ley de Darcy, se obtuvo los valores para los suelos de la vía antigua a Sacapalca y para el suelo correspondiente a la salida de Sunamanga de  $4.40 \times 10^{-8}$  cm/s y  $2.13 \times 10^{-8}$  cm/s respectivamente, como se puede evidenciar en la Tabla 24, estos valores nos dan una idea de que el suelo puede ser usado como material impermeable ya que se encuentra en un grado de permeabilidad según Whitlow (1994) de prácticamente impermeable, dado que el material utilizado en este ensayo, no permite que el agua fluya a través de sus poros con facilidad dificultando que sea un material permeable. Una vez conocidos los valores de la conductividad hidráulica, podemos prever el comportamiento del flujo del agua a través del suelo.

Dado que los suelos según su clasificación SUCS se encuentran en la zona de suelos de grano fino arrojaron resultados de permeabilidad relativamente bajos, según Alarcón y Alva (s.f.) en su clasificación los suelos limos arcillosos (>20% arcilla) son prácticamente impermeable con valores de  $10^{-8}$ , dicha clasificación concuerda con Whitlow (1994), además estos valores son bajos debido a que los espacios porosos son ocupados por partículas de suelo dada la compactación que se realiza en el ensayo.

Esta conductividad hidráulica se la determinada ya que tiene un valor muy importante en los trabajos de almacenamiento de agua en reservorios o presas (Donado, 2004), debido a que se la toma en cuenta al momento del diseñar esta obra, y con estos valores obtenidos se establece si es necesario o no el mejoramiento de los suelos a utilizarse, como se obtuvieron valores de  $10^{-8}$  no es necesario el mejoramiento de los mismos, y con esos valores se establece que se tendrá una buena estanqueidad en el vaso.

### **5.2.2. Determinación de la conductividad hidráulica (k) por medio de la batería de permeámetro de cabeza constante.**

Badillo y Rodríguez (2005) recomiendan realizar la prueba de permeabilidad en muestras inalteradas no solamente en suelos arcillosos, sino además en suelos arenosos y limosos ya que estos se encuentran frecuentemente estratificados, y la prueba con muestras alteradas nos dará una idea errónea de la permeabilidad en estado natural.

Mediante este método de obtención de la conductividad hidráulica realizado con muestras de suelo no disturbadas por medio de la batería de permeámetro de cabeza constante tendremos una idea de cómo se encuentra el flujo de agua a través del mismo antes de ser compactadas, los resultados del ensayo arrojaron valores correspondientes a 0.65 cm/h y 0.37 cm/h (Tabla 25), que se los identifica en la clase de permeabilidad moderadamente lenta y lenta, para los suelos de la vía antigua a Sacapalca y para el suelo correspondiente a la salida de Sunamanga respectivamente.

### **5.3. Análisis de los resultados de los suelos en estudio como material impermeabilizante en pequeños embalses**

El suelo es el más antiguo material de construcción dentro del diseño y la construcción de presas de tierra, es por ello que, mediante el estudio y análisis de sus propiedades físicas y mecánicas, lo que se quiere es garantizar la mínima permeabilidad posible para que no se produzcan fallas al momento de su funcionamiento (Armas, 2002).

Con los resultados obtenidos y analizados se establece, que las dos muestras de suelo se encuentran en los rangos señalados, con índice de plasticidad mayor al 15 % que es lo que establece Armas (2002), ya que son materiales no propensos al agrietamiento. En cuanto a la clasificación del suelo, Suárez (2016) manifiesta que, entre los suelos aceptables para usarse en terraplenes de presas de tierra, se encuentra el ML que corresponde al suelo de la salida de Sunamanga (H), asimismo menciona que pueden usarse suelos de clasificación ML y MH para los núcleos de las presas de tierra. Además, cumplen con la cantidad de arcilla que señala Villamizar (1989) con un porcentaje mayor al 20%, el cual es un material bueno que no necesita medidas especiales y del mismo modo recomienda materiales limosos para ser usados en terraplenes de presas, pero que estas estructuras no sobrepasen los 8 metros de altura. En lo referente a la compactación Armas (2002) recomienda compactar los suelos con energías de compactación similares a las que se utiliza



en la prueba de laboratorio la cual sería de  $600 \text{ kN m/m}^3$ , asimismo compactar con humedades en rangos de valores de  $\pm 2\%$  de las siguientes humedades óptimas  $33\%$  y  $28\%$  correspondientes a los suelos de vía antigua a Sacapalca y para el suelo de la salida de Sunamanga respectivamente, y siempre se debe alcanzar más del  $90\%$  los grados de compactación.

La permeabilidad de las dos muestras de suelo, según Whitlow (1994) y Alarcón y Alva (s.f.), señalan que se encuentran en un grado -prácticamente impermeable- (referencia Tabla 4) que representan a suelos limos arcillosos, estos valores nos dan una idea de que el suelo puede ser usado como material alternativo de impermeabilización. Pero dado que la muestra de suelo perteneciente a la salida de Sunamanga (H), se encuentra en la clasificación recomendada por Suárez (2016) tanto para los terraplenes y núcleos de presas de tierra, es la que mejor se adapta para ser usada como un material alternativo de impermeabilización en reservorios y además tiene una permeabilidad más baja con respecto a la muestra de la vía antigua a Sacapalca (S).

## 6. Conclusiones

- Las muestras de suelo estudiadas en laboratorio correspondientes al sector de Sunamanga tienen un contenido de humedad en estado natural de 25.3 % y 23.4 %.
- De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), las muestras de suelo corresponden a una clasificación granulométrica de grano fino, específicamente a limos elásticos de media a alta plasticidad (MH) y limos arcillosos con ligera plasticidad (ML), para los suelos pertenecientes a la vía antigua a Sacapalca y a la salida de Sunamanga respectivamente, sin embargo, una clasificación visual de estos materiales permite considerarlos arcilla.
- Los resultados del ensayo de compactación de las muestras de Sunamanga, mediante el Proctor Estándar arrojaron valores de 33 % y 28 % con pesos específicos secos máximos de  $1.24 \text{ g/cm}^3$  y  $1.35 \text{ g/cm}^3$  respectivamente.
- Los resultados del ensayo de permeabilidad por medio de la batería de permeámetro de cabeza constante, arrojaron valores de coeficiente de permeabilidad correspondientes a  $1.8 \times 10^{-4}$  y  $1.02 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$ , que se los identifica en la clase de permeabilidad moderadamente lenta y lenta respectivamente, esto para el suelo en estado natural, lo que nos da una idea que al momento de sufrir cambios como la compactación tendrá coeficientes de permeabilidad muy bajos.
- La permeabilidad de las arcillas del sector de Sunamanga, corresponden a un grado de permeabilidad de prácticamente impermeable para las dos muestras, las mismas con valores de  $4.40 \times 10^{-8}$  y  $2.13 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ .
- La muestra de suelo que mejor presenta características como material impermeabilizante para ser usado en reservorios corresponde a la muestra de la salida de Sunamanga (H), es por ello que se permite considerar al material como una opción de material alternativo para impermeabilización.

## 7. Recomendaciones

- Realizar los ensayos como indican las normas que están establecidas tanto las INEN, ASSTHO o ASTM, con personal competente en el laboratorio de materiales de construcción, regirse detalladamente a las normas que se utiliza y verificando las especificaciones técnicas de los aparatos a utilizar en los diferentes ensayos, esto, con la finalidad de obtener resultados fiables que aporten a una buena caracterización físico-mecánica de los suelos.
- Para el ensayo de compactación mediante el Proctor Estándar es recomendable que la muestra a ser utilizada sea secada al ambiente y no al horno, para facilitar su manipulación a la hora de realizar las pruebas en laboratorio.
- Para la realización del ensayo de permeabilidad en muestras disturbadas, utilizar el permeámetro de cabeza variable, ya que es el más recomendable para los suelos de partículas muy finas como los arcillosos y limosos.

## 8. Bibliografía

- Agila, H., González, A., y Sivisaca, L. (1986). *Construcción y evaluación de un permeámetro de cabeza constante para determinar la conductividad hidráulica* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador. Facultad de ciencias agrícolas. INTA (Instituto de Investigaciones Agrícolas).
- Alarcón y Alva (s.f.). *Ensayos de permeabilidad en suelos compactados* [Diapositiva de PowerPoint]. DOCPLAYER. <https://docplayer.es/45242060-Ensayos-de-permeabilidad-en-suelos-compactados.html>
- Álvarez, B. (2018). *Caracterización y factibilidad de arcillas utilizadas para la fabricación de cerámica explotada en provincias de El Oro (Marcabelí), Azuay (Pucará)* (tesis de grado). Universidad Técnica de Machala. Machala, Ecuador.
- Angelone, S., Garibay, M., y Cauhapé, M. (2006). *Geología y geotecnia “Permeabilidad de Suelos”*. Universidad Nacional del Rosario, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura.
- Armas, R. (2002). “*Criterios para diseñar presas de tierra: Prioridad y secuencia*”, Conferencia. Taller nacional sobre fallos de presas de tierra, Ciudad de la Habana, Cuba.
- Badillo, J., y Rodríguez, R. (3ra Ed.). (2005). *Mecánica de suelos Tomo 1 “Fundamentos de la mecánica de suelos”*. México, D.F, México: Editorial Limusa.
- Baque, G. (2017). “*Caracterización físico - mecánicas del suelo para cimentación en edificaciones de categoría baja, sector By Pass – John F. Kennedy, ciudad Jipijapa.*” (tesis de grado). Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Manabí, Ecuador.
- Barba, A., Beltrán, V., Feliu, C., Gracia, J., Gines, F., Sánchez, E. y Sanz, V. (1997). *Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas*. Instituto de Tecnología Cerámica, Castellón, España.
- Berry, P., y Reid, D. (1993). *Mecánica de suelos*. Bogotá, Colombia: Editorial McGraw-Hill.
- Besoain, E. (1985). *Mineralogía de arcillas de suelos*. San José, Costa Rica: Serie de libros y materiales educativos IICA, 1985.

- Casadiegos, F. (2010). *Influencia de gradientes térmicos en la estabilización de suelos con alto potencial de expansión*. (tesis de grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Celedón, J., y Lazcano, G. (2001). *Arcillas expansivas y su tratamiento en subrasantes de vías y Aeropuertos*. (tesis de postgrado) (Especialización en Ingeniería de Pavimentos). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- CEMEDE, (Centro Mesoamericano de Desarrollo Sostenible del Trópico Seco) y UNED (Universidad Nacional a Distancia). (2009). *Informe de labores del proyecto Fortalecimiento de la Seguridad Alimentaria mediante la implementación de Cosecha de agua en la región Chorotega*. Sede Regional Chorotega, Universidad Nacional de Costa Rica. Guanacaste, Costa Rica.
- Cordero, J. (2018). *Estabilización química de suelos para mejoramiento de la estructura vial agropecuaria de la parroquia Chuquiribamba* (tesis de grado). Universidad Nacional de Loja, Loja, Ecuador.
- Crespo, C. (5ta Ed.). (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. México, D.F, México: Editorial Limusa.
- Cullquipuma, E., y Maldonado, W. (2014). *Estudio del procedimiento de compactación a aplicar en la construcción de las presas del proyecto PACALORI* (tesis de grado). Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- Cushman-Roisin, B. (2014). *Environmental Fluids Mechanics: Lakes and Reservoirs*. Chapter 16. New Hampshire (USA): Thayer School of Engineering at Dartmouth.
- Dana, J. y Otros. (19th Ed.). (1997). *Manual of mineralogy*. New York, USA: Editorial John Wiley.
- Das, B. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. México, D.F, México: Editorial Thomson Learning.
- Díaz, W. (2015). *Caracterización físico-mecánica y química de las arcillas de la zona Sur-Este de la Cuenca Sedimentaria Miocénica de Loja*. (tesis de grado). Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador.

- Donado, L. (2004). *Modelo de conductividad hidráulica en suelos* (Tesis de magíster en Ingeniería-Recursos Hidráulicos). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. 162. pp.
- Duque, G. (2014). *Intemperismo o meteorización*. Godues. Recuperado de <https://godues.wordpress.com/2014/12/30/intemperismo-o-meteorizacion-manualgeo-cap-08/>
- FAO. (núm. 13). (2000). *Manual de captación y aprovechamiento de agua de lluvia. Experiencias en América Latina*. Serie Zonas Áridas y Semiáridas, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Santiago, Chile.
- González, C. (1984). *Prácticas de riego y drenajes*. Loja, Ecuador. Departamento de Publicaciones de la Facultad de Ciencias Agrícolas. pp. 45.
- Guggenheim, S., y Martin, R. (1995). *Definition of clay and clay mineral: Joint report of the AIPEA Nomenclature and CMS nomenclature committees*. Clays and Clay Minerals, Vol. 43., (núm. 2), Pp.255-256.
- Hansford, B. (1996). *La piscicultura. Paso a paso*. No. 25. Londres, Inglaterra. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/correovenymira/tearfund-paso-a-paso-construccion-de-estanques-de-tierra-y-cria-de-peces>
- Hernández, J. (2008). *Características físicas y propiedades mecánicas de los suelos y sus métodos de medición* (tesis de graduación). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Huang, W. (2009). *Petrología*. Departamento de Geología. Universidad de Baylor. México: Editorial Limusa.
- Ingeniería civil, (2010). *Origen del suelo y ciclo de la roca*. Ingeniería civil. Recuperado de <https://www.ingenierocivilinfo.com/2010/12/origen-del-suelo-y-ciclo-de-la-roca.html>
- Jaramillo, D. (2002). *Introducción a la ciencia del suelo*. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.
- Jiménez, J., y de Justo, J. (2da. Ed.). (1975). *Geotécnica y Cimientos "Propiedades de los suelos y de las rocas"*. Madrid, España: Editorial Rueda.

- Lopera, J., Ramírez, C., Zuluaga, M. y Ortiz, J. (2010). *El método analítico como método natural*. Nómadas. Critical Journal of Social and Juridical Sciences, Vol. 25 (num.1), Recuperado de <https://www.redalyc.org/pdf/181/18112179017.pdf>
- Nasr, M. (1999). *Assessing Desertification and Water Harvesting in the Middle East and North Africa*. Policy Implications. ZEF–Discussion Papers on Development Policy. Bonn, Germany.
- NTE-INEN 690. (1982). *Mecánica de suelos, Determinación del contenido de agua, Método del secado al horno, Norma Técnica Ecuatoriana, Instituto Ecuatoriano de Normalización*. Ecuador: INEN. Recuperado de <https://archive.org/details/ec.nte.0690.1982/page/n1/mode/2up>
- NTE-INEN 691. (1982). *Mecánica de suelos, Determinación del límite líquido, Método de Casagrande, Norma Técnica Ecuatoriana, Instituto Ecuatoriano de Normalización*. Ecuador: INEN. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/328641447/691LIMITE-LIQUIDO-CASA-GRANDE-pdf>
- NTE-INEN 692. (1982). *Mecánica de suelos, determinación del límite plástico, Norma Técnica Ecuatoriana, Instituto Ecuatoriano de Normalización*. Ecuador: INEN. Recuperado de <https://es.scribd.com/document/250311677/692>
- Paladines, A., y Soto, J. (2010). *Geología y yacimientos minerales del Ecuador*. Loja, Ecuador: Editorial UTPL.
- Pánchez, E., y Gadway, F. (2013). *Caracterización y sectorización de las propiedades físicas y mecánicas del suelo en los barrios "La Libertad y La Florida" de la ciudad de Riobamba*. (tesis de grado). Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- Parrado, B., y Toloza, J. (2017). *Determinación de la superficie específica en suelos caolínicos y bentoníticos mediante la técnica de adsorción de agua destilada aplicando diferentes gradientes térmicos* (tesis de grado). Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDOT), (2014). Gonzanamá, GAD cantonal.

- Programa de certificación vial (2008). *Competencias técnicas de: Laboratorista en vialidad Grado I*. Universidad Técnica Particular de Loja. Loja Ecuador.
- Ramírez, C. (1991). *El método científico en el psicoanálisis*. Revista Universidad de Antioquia (Medellín), Vol. 60 (núm. 224), pp. 35-41.
- Ramírez, P., y Alejano, L. (2007). *Mecánico de rocas: Fundamentos e Ingeniería de Taludes*.
- Revolorio, F. (2013). *Incidencia de resultados del ensayo Proctor por la influencia de clima, humedad, equipo y superficie de base de compactación durante su desarrollo* (tesis de grado). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
- Rincon, E., y Quintana, H. (2010). *Evaluación de la temperatura como método de estabilización de arcillas*. Studiositas. Vol. 5 (núm. 1), Pp. 5-13.
- Rodríguez, A. (2001). *Manual de mecánica del suelo y cimentaciones, cap1: Caracterización de los suelos*. Recuperado de <https://www.udocz.com/read/manual-de-mecanica-de-suelos-y-cimentaciones-angel-muelas-rodriguez>
- Salinas, A., Rodríguez, R. y Morales, D. (2010). *Manual de especificaciones técnicas básicas para la elaboración de estructuras de captación de agua de lluvia (SCALL) en el sector agropecuario de Costa Rica y recomendaciones para su utilización*. MAG, Costa Rica. Recuperado de [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual/bibliotecavirtual/a00273.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual/bibliotecavirtual/a00273.pdf)
- Senplades. (2014). PDYOT de Catamayo. Recuperado de [http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL\\_SNI/data\\_sigad\\_plus/sigadplusdocumentofinal/1160000400001\\_GADM%20Catamayo%20PDyOT%202014-2019\\_13-03-2015\\_21-07-42.pdf](http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdocumentofinal/1160000400001_GADM%20Catamayo%20PDyOT%202014-2019_13-03-2015_21-07-42.pdf)
- Silva, A. y Porto, E. (1982). *Utilização e Conservação dos Recursos Hidricos en Areas Rurais do Tropico Semi-Arido do Brasil*. EMBRAPA-CPATSA. Documentos N° 14, 128 pp.
- Suárez, J. (2016). *Presas de tierra*. erosion.com.co. Recuperado de <https://www.erosion.com.co/investigacion/49-presas-de-tierra/143-presas-de-tierra.html>
- Taylor, D. (1ra Ed.). (1961). *Principios fundamentales de la mecánica de suelos*. México, D.F, México: Compañía Editorial Continental, S.A.



- Terzaghi, K., y Peck, R. (2da Ed.). (1973). *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. Barcelona, España: Editorial El Ateneo S.A.
- Universidad privada del norte. (2011). *CF-CAP.I.1 suelo origen y su formación, Mecánica de suelo 1*, Facultad de ingeniería y arquitectura. Cajamarca: Laureate International Universities. Recuperado de <http://www.civilfree.com/25-ensayos-de-laboratorio-desuelos-upn-pdf>
- UNL. (1979). *Poligrafiado de riegos y drenajes*. Loja, Ecuador. Departamento de publicaciones de la Facultad de Ciencias Agrícolas. pp. 4.
- Villamizar, A. (1989). *Diseño de Presas de Tierra para Pequeños Almacenamientos*. Bogotá, Colombia. República de Colombia Ministerio de Agricultura, Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras, Subdirección de Adecuación de Tierras.
- Whitlow, R., (1994). *Fundamentos de mecánica de suelos*. México: Compañía editorial Continental.

## 9. Anexos

### Anexo A.

#### Determinación de contenido de humedad

#### Método del secado al horno NTE INEN 690 (1982)

### 1.Objeto

1.1. Esta norma establece el método para determinar en el laboratorio el contenido de agua de los suelos, mediante el secado al horno.

### 2.Disposiciones generales

2.1. La determinación se efectuará por duplicado sobre diferentes porciones de la misma muestra.

2.2. En la Norma INEN 685 se establecen las definiciones de los términos y símbolos empleados en este documento.

2.3. En la Norma INEN 154 se establecen las dimensiones nominales de aberturas de los tamices de ensayo.

2.4. La temperatura del laboratorio debe mantenerse a  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

2.5. La humedad relativa del laboratorio no debe ser menor del 50% y en la cámara húmeda, no menor del 90%.

### 3.Terminología

3.1. Tamaño máximo. Abertura nominal del tamiz que retiene el 10% o menos del material.

### 4.Resumen

4.1. El método de ensayo consiste en determinar la cantidad de agua que existe en una determinada masa de suelo, mediante un horno de secado.

### 5.Equipo

5.1. **Horno de secado.** Puede ser a gas o eléctrico. Debe ser regulado termostáticamente y capaz de mantener una temperatura constante de  $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ . Se puede emplear hornos de microonda, siempre que en ensayos preliminares se demuestre que la temperatura del suelo no exceda de  $110^{\circ}\text{C}$  luego de que toda el agua se haya evaporado; si se usan estos hornos, no son convenientes

los recipientes de metal, por lo que el suelo debe secarse en fuentes de evaporación de vidrio, sílice o politetrafluoretileno (PLFE).

**5.2. Balanzas.** Se debe utilizar una de las siguientes balanzas de acuerdo al tamaño de la muestra<sup>1</sup>.

- a) una balanza sensible a 0,01 g, para pesar muestras de 100 g o menos;
- b) una balanza sensible a 0,1 g para pesar muestras de 100 a 1 000 g; y
- c) una balanza sensible a 1 g, para pesar muestras mayores a 1 000 g.

**5.3. Recipientes.** Estos deben ser de un tamaño adecuado, fabricados de un material resistente a la corrosión y que no alteren su masa o se desintegren debido al fenómeno repetitivo de calentado y enfriado. Pueden estar provistos de tapas herméticas, para prevenir la pérdida del agua de las muestras antes del pesado inicial, y la absorción de la humedad del ambiente, luego del secado y antes del pesado final. Estos recipientes deben identificarse mediante numeración clara e indeleble.

**5.4. Desecador.** Debe ser de un tamaño adecuado y contener gel de sílice anhidro<sup>2</sup>.

## 6.Preparación de la muestra

**6.1.** La muestra de ensayo debe tener suficiente material para que sea representativa del suelo, lo cual está en función de la gradación, tamaño máximo de las partículas y del equipo utilizado, la misma que ha sido obtenida de acuerdo con la Norma INEN 688.

**6.2.** La masa mínima de la muestra debe estar en concordancia con los valores recomendados para uso general de laboratorio de la Tabla A1.

**Tabla A1.** Cantidad mínima de muestra

TAMAÑO MAX. DE PARTICULAS		MASA MINIMA DE LA MUESTRA
<b>INEN</b>	<b>ASTM</b>	(g)*
425 µm	N° 40	25
2 mm	N° 10	50
4.75 mm	N° 4	200
9.5 mm	3/8 pulg	300

<sup>1</sup> La balanza a usarse en un ensayo en particular dependerá del tamaño de la muestra, sin embargo, su sensibilidad deber ser de 0.03 % de la masa de la muestra o 0.01 g, la que sea mayor.

<sup>2</sup> Es preferible usar gel de sílice autoindicador, como un desecante, más no el cloruro de calcio, ya que se conoce que muchas arcillas, cuando se secan al horno, son capaces de absorber agua del mismo.

Continuación Tabla A1

INEN	ASTM	(g)*
13.2 mm	0.53 pulg	325
19 mm	3/4 pulg	500
26.5 mm	1.06 pulg	600
37.5 mm	1 ½ pulg	1000
53 mm	2.12 pulg	1200

\*Debe tenerse en cuenta que mientras más seco sea el suelo, la cantidad tomada para el ensayo debe ser mayor

### 7.Procedimiento de ensayo

**7.1.** Determinar y registrar la masa del recipiente ( $m_1$ ), cuidando que este seco y limpio<sup>3</sup>.

**7.2.** Colocar cuidadosamente en el recipiente la porción representativa del suelo a ensayarse, después de desmenuzarla (Tabla A1), cuidando que exteriormente no existan partículas de suelo adheridas; determinar y registrar su masa ( $m_2$ ).

**7.3.** Colocar el recipiente con la muestra húmeda en el horno de secado, manteniendo una temperatura de  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ , hasta obtener masa constante<sup>4</sup>.

**7.3.1.** En casos en que haya alguna duda respecto al periodo de secado, éste debe continuar hasta que la determinación de la masa, después de dos periodos sucesivos de secado, a intervalos de cuatro horas, indiquen que la masa no cambia o que su diferencia no excede de 1%.

**7.4.** Inmediatamente después de sacar del horno el recipiente con la muestra de suelo seca, determinar y registrar su masa ( $m_3$ ). Si esto no es posible hacerlo inmediatamente, el recipiente debe colocarse en el desecador hasta cuando vaya a determinarse su masa.

### 8.Cálculos

**8.1.** El contenido de agua del suelo se calcula como un porcentaje de su masa seca con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100$$

<sup>3</sup> Si se usa recipientes con tapa, la masa  $m_1$  será la masa del recipiente y su tapa.

<sup>4</sup> El periodo necesario de secado varía con el tipo de suelo, el tamaño de la muestra y la cantidad de material en el horno de secado. Cuando el suelo seco puede absorber humedad de las muestras húmedas, las muestras secas deben retirarse del horno antes de colocar las muestras húmedas. Generalmente es suficiente un periodo de secado de 16 a 24 horas.

Siendo:

**W** = contenido de agua, en %

**m<sub>1</sub>** = masa del recipiente, en g

**m<sub>2</sub>** = masa del recipiente y el suelo húmedo, en g

**m<sub>3</sub>** = masa del recipiente y el suelo seco, en g

## **9. Errores del método**

**9.1.** La máxima variación entre los valores absolutos de la determinación efectuada por duplicado no debe exceder de  $\pm 5\%$ ; en caso contrario, debe repetirse el ensayo.

## **10. Informe de resultados**

**10.1.** Como resultado final, debe indicarse la media aritmética de los dos resultados, redondeada a tres cifras significativas.

**10.2.** Los resultados de los ensayos deben registrarse convenientemente en una hoja de registro. Si el contenido de agua forma parte de otros ensayos, es preferible utilizar la hoja de registro recomendada en los ensayos respectivos.

**10.3.** El informe correspondiente a este ensayo debe constar de lo siguiente:

- a) Descripción de las características de la muestra ensayada, procedencia, identificación, etc.;
- b) Temperatura, tiempo y tipo de secado; y,
- c) Contenido de agua, en porcentaje.

### **Anexo B.**

#### **Análisis granulométrico de suelos por tamizado**

#### **Resumen Norma AASHTO T88-00/ASTM D 422**

### **1. Alcance**

**1.1.** Este método, describe el procedimiento para la determinación cuantitativa de la distribución del tamaño de las partículas del suelo.

### **2. Equipo**

**2.1. Horno.** - Termostáticamente controlado, capaz de mantener constantemente una temperatura de  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  ( $230 \pm 9^\circ\text{F}$ ), para secar las muestras.

**2.2. Balanzas.** - Tendrá la capacidad suficiente de acuerdo a los requisitos de la norma AASTHO M 231 (dispositivos para pesar usados en los ensayos de materiales).

**2.3. Envases.** - Estos deben ser adecuados para el manejo y secado de muestras.

### 3. Tamices

**3.1.** Tamices de serie gruesa o serie fina, según al tamaño de las partículas a tamizar.

**3.2.** Se debe contar con cepillo y brocha, para limpiar los tamices.

**Tabla B1.** Tamices estándar

Designación estándar (mm)	Designación alternativa
75	3 in
50	2 in
25	1 in
9.5	3/8 in
4.75	N° 4
2.00	N° 10
0.4250	N° 40
0.075	N° 200

**Fuente:** Norma AASHTO T 88-00

**3.3. Muestra de ensayo.** - Prepárese la muestra para el ensayo de granulometría como lo describe la norma AASTHO T 87; ASTM D 2217, la cual estará constituida por dos fracciones: una retenida sobre el tamiz de 4.750 mm (N° 4) y otra que pasa dicho tamiz. Ambas fracciones se ensayan por separado.

Para la porción de muestra retenida en el tamiz de 4.750 mm (N° 4) el peso dependerá del tamaño máximo de las partículas de acuerdo a la tabla B2.

**Tabla B2.** Peso mínimo de muestra de acuerdo al tamaño máximo de las partículas

Diámetro nominal de las partículas más	Peso nominal aproximado de la porción
9.5 (3/8 in)	500
19.6 (3/4 in)	1000
25.7 (1 in)	2000
37.5 (1 ½ in)	3000
50 (2 in)	4000
75 (3 in)	5000

**Fuente:** Norma AASHTO T 88-00

#### **4. Análisis por medio de tamizado de la fracción retenida en el tamiz de 4.75 mm (N° 4)**

**4.1.** Sepárese la muestra retenida en el tamiz de 4.75 mm (N° 4) en una serie de fracciones usando los tamices de: 75 mm (3 in), 50.8 mm (2 in), 38.1 mm (1 ½ in), 25.4 mm (1 in), 19 mm (3/4 in), 12.7 mm (1/2 in), 9.5 mm (3/8 in), 4.75 mm (N° 4).

**4.2.** Tamizado consiste en mover el tamiz o tamices de lado a otro, recorriendo circunferencias; el tamizado continuará hasta cuando no pasa más del uno por ciento de la masa retenida al tamizar durante 60 segundos.

**4.3.** Si se utiliza una tamizadora mecánica, se pondrá a funcionar por diez minutos aproximadamente. Se determina el peso de la muestra retenida en cada tamiz y se registra. La suma de los pesos retenidos de todos los tamices y el peso inicial de la muestra no debe diferir en más de 1%.

#### **5. Análisis granulométrico de la fracción fina**

**5.1.** El análisis granulométrico del material que pasa el tamiz de 4.75 mm (N° 4) se lo hará por tamizado y/o sedimentación según las características de la muestra.

**5.1.1.** Los materiales arenosos que contengan muy poco limo y arcilla, cuyos terrones en estado seco se desintegran con facilidad, se podrá tamizar en seco.

**5.1.2.** Los materiales arcillosos y limosos cuyos terrones en estado seco no se desintegran con facilidad, se podrá realizar el ensayo por vía húmeda.

**5.1.3.** Si se requiere la curva granulométrica completa incluyendo la fracción menor que el tamiz de 0.074 mm (N° 200), la granulometría se lo realizará por el método del hidrómetro.

**5.1.4.** La fracción de tamaño mayor que el tamiz de 0.074 mm (N° 200), se lo realiza por tamizado en seco, lavando la muestra previamente sobre el tamiz de 0.074 mm (N° 200).

**5.2.** Procedimiento para el análisis granulométrico por lavado sobre el tamiz de abertura 0.074 mm (N° 200).

**5.2.1.** Mediante cuarteo separe 115 g, para suelos arenosos y 65 g, para suelos arcillosos y limosos, pesándolo con exactitud de 0.01 g.

**5.2.2.** Coloque la muestra en un recipiente apropiado, cubriéndola con agua y se deja en remojo hasta que todos los terrones se ablanden.

**5.2.3.** Lave la muestra sobre el tamiz de 0.074 mm (N° 200), con abundante agua, teniendo en cuidado de que no se pierda ninguna partícula de las retenidas en él.

**5.2.4.** Recoja el contenido en un recipiente, se seca en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  ( $230 \pm 9^{\circ}\text{F}$ ).

**5.2.5.** Tamice en seco siguiendo el procedimiento indicado anteriormente.

## **6. Cálculos**

**6.1.** Análisis del material retenido en el tamiz de 4.750 mm (N° 4).

**6.1.1.** Calcule los pesos retenidos o parciales en cada tamiz.

**6.1.2.** Calcule los pesos acumulados.

**6.1.3.** Para determinar el porcentaje retenido que pasa por cada tamiz, divida el peso retenido acumulado de cada tamiz entre el peso total de la muestra y multiplique el resultado por 100.

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso acumulado retenido en cada tamiz}}{\text{Peso total}} \times 100$$

**6.1.4.** Se calcula el porcentaje que pasa.

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ Retenido acumulado}$$

### **Anexo C.**

#### **Análisis granulométrico por medio del hidrómetro**

#### **Resumen Norma AASHTO T88-00/ASTM D 422**

### **1. Objetivo**

**1.1.** El ensayo por medio del hidrómetro se basa en la ley de Stokes puede ser aplicada a una masa de suelo dispersado, con partículas de varias formas y tamaños.

**1.2.** El método del hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelo dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo.



## 2. Equipos

**2.1. Dispositivo de Agitación.** - operado mecánicamente, conformado por un motor eléctrico y un eje vertical que gire a no menos de 10000 revoluciones por minuto, provisto de una paleta de agitación metálica, plástica o un material resistente.

**2.2. Hidrómetro.** - conforme a los requerimientos para hidrómetros 151 H ó 152 H de ASTM.

**2.3. Cilindro de Sedimentación.** - de vidrio de aproximadamente 460 mm (18 in) de altura y 60 mm (2 ½ in) de diámetro y un volumen de 100 mL.

**2.4. Balanza.** - de acuerdo a los requerimientos de la norma AASHTO M 231 (con una sensibilidad de 0.1 g).

**2.5. Termómetro.** - calibrado y legible a 0.5 °C.

**2.6. Tamices.** - tamices de 2.0 mm (N° 10) y de 74 µm (N° 200).

**2.7. Recipiente.** - de material resistente a la corrosión y no sujetos al cambio de masa o desintegración por el repetido calentamiento y enfriamiento. Los recipientes tendrán tapas ajustadas para prevenir la pérdida de humedad de las muestras antes de la determinación de la masa inicial y prevenir la absorción de la humedad de la atmósfera después del secado y antes de la determinación de la masa final. Se necesita un recipiente para cada determinación del contenido de humedad.

**2.8. Varilla de vidrio.** - para agitar la muestra.

**2.9. Cronómetro o reloj.** - para medir tiempos.

**2.10. Horno.** - con temperatura constante hasta  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F).

**2.11. Agente dispersante.** - una solución de hexametáfosfato de sodio será usada en agua destilada o desmineralizada; a razón de 40 g de hexametáfosfato de sodio por litro de solución.

## 3. Calibración del hidrómetro

**3.1.** El hidrómetro debe ser calibrado para determinar su profundidad efectiva en términos de lecturas de hidrómetro. Si se dispone de un hidrómetro tipo 151 H ó 152 H, este valor de la profundidad efectiva se la puede leer en la Tabla C1.

**Tabla C1.** Valores de profundidad efectiva basados en el hidrómetro y cilindro de sedimentación de dimensiones especificadas

Hidrómetro 151 H			Hidrómetro 152 H		
Lectura del hidrómetro R + Cm	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura del hidrómetro R + Cm	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura del hidrómetro R + Cm	Profundidad efectiva L (Cm)
1.000	16.3	0	16.3	31	11.2
1.001	16.0	1	16.0	32	11.1
1.002	15.8	2	15.8	33	10.9
1.003	15.5	3	15.5	34	10.7
1.004	15.2	4	15.2	35	10.6
1.005	15.0	5	15.0	36	10.4
1.006	14.7	6	14.7	37	10.2
1.007	14.4	7	14.4	38	10.1
1.008	14.2	8	14.2	39	9.9
1.009	13.9	9	13.9	40	9.7
1.010	13.7	10	13.7	41	9.6
1.011	13.4	11	13.4	42	9.4
1.012	13.1	12	13.1	43	9.2
1.013	12.9	13	12.9	44	9.1
1.014	12.6	14	12.6	45	8.9
1.015	12.3	15	12.3	46	8.8
1.016	12.1	16	12.1	47	8.6
1.017	11.8	17	11.8	48	8.4
1.018	11.5	18	11.5	49	8.3
1.019	11.3	19	11.3	50	8.1
1.020	11.0	20	11.0	51	7.9
1.021	10.7	21	10.7	52	7.8
1.022	10.5	22	10.5	53	7.6
1.023	10.2	23	10.2	54	7.4
1.024	10.0	24	10.0	55	7.3
1.025	9.7	25	9.7	56	7.1
1.026	9.4	26	9.4	57	7.0
1.027	9.2	27	9.2	58	6.8
1.028	8.9	28	8.9	59	6.6
1.029	8.6	29	8.6	60	6.5
1.030	8.4	30	8.4		
1.031		8.1		<i>* Lectura corregida por menisco</i>	
1.032	7.8				
1.033	7.6				
1.034	7.3				
1.035	7.0				
1.036	6.8				
1.037	6.5				
1.038	6.2				

#### 4. Muestra de ensayo

**4.1.** Las muestras para análisis serán preparadas de acuerdo con cualquiera de las dos normas AASHTO T 87 (preparación de muestras secas de suelos perturbados para ensayos), ó AASHTO T 146 (preparación de muestras húmedas de suelos perturbados para ensayos).

**4.2.** Se pesa una porción representativa de la muestra original secada al aire y seleccionada para el ensayo. La cantidad mínima requerida de material retenido en el tamiz de 4.75 mm, tamiz de 2 mm ó tamiz de 0.425 mm, depende del tamaño máximo de las partículas, pero no será menor que la cantidad mostrada en la Tabla C2.

**Tabla C2.** Peso mínimo de muestra de acuerdo al tamaño máximo de las partículas

<i>Diámetro nominal de las partículas más grandes mm (in)</i>	<i>Peso mínimo aproximado de la porción (g)</i>
9.5 (3/8 in)	500
19.6 (3/4 in)	1000
25.7 (1 in)	2000
35.7 (1 ½ in)	3000
50.0 (2 in)	4000
75.0 (3 in)	5000

**Fuente:** Norma AASHTO T 88 – 00

**4.2.** El tamaño de la porción que pasa el tamiz 2 mm (N° 10) ó 0.425 mm (N° 40) será:

**4.2.1.** Para el ensayo hidrométrico de 100 g en suelo arenoso y 50 g en suelo arcilloso.

**4.2.2.** Para la determinación de la humedad higroscópica de al menos 10 g.

**4.3.** Las muestras de estos suelos deben ser conservadas con su contenido de humedad natural y ensayadas sin ser sacadas al horno.

#### 5. Procedimiento

**5.1. El procedimiento consistirá en los siguientes pasos:**

**5.1.1.** Determínese la corrección por floculante y punto cero, (Cd) y la corrección por menisco, (Cm).

**5.1.2.** Determínese el peso específico de los sólidos (Gs).

## **5.2. *Dispersión de la muestra de suelo.***

**5.2.1.** Si se va a realizar el ensayo con una muestra seca, séquese la muestra al horno, déjese enfriar y pésele con una aproximación de 0.1 g. Anote en el formato el valor obtenido.

**5.2.2.** Colóquese la muestra en una capsula de 250 mL, agréguese agua destilada o desmineralizada hasta que la muestra quede totalmente sumergida. Colóquese el agente dispersante en este momento de 125 mL de solución de hexametáfosfato de sodio (40g/l).

**5.2.3.** Déjese la muestra en remojo por una noche (ó un tiempo mínimo de 12 horas) hasta que los terrones de suelo se hayan desintegrado. Suelos altamente orgánicos requieren un tratamiento especial.

**5.2.4.** Colóquese la muestra con agua de la capsula a un vaso de dispersión, lavando cualquier residuo que quede en la cápsula con agua destilada o desmineralizada. Agréguese agua al vaso de dispersión si es necesario, hasta que la superficie de ésta quede de 50 a 80 mm por debajo de la boca del vaso. Colóquese el vaso de dispersión en el aparato agitador durante un minuto (60 seg). La dispersión se la realizara de acuerdo a la Tabla C3.

**Tabla C3.** De acuerdo a la norma

<b>Índice de plasticidad del suelo</b>	<b>Tiempo de dispersión (min)</b>
Menor del 5%	5
Del 6 a 20%	10
Mayor a 20%	15

**5.2.5.** Luego de la agitación coloque la muestra en el cilindro de sedimentación, adicione agua destilada o desmineralizada hasta la marca de 1000 mL. Antes de comenzar el ensayo, tómese el cilindro de sedimentación y taponándolo con la mano o con un tapón adecuado agítese la suspensión vigorosamente hacia arriba y hacia abajo durante varios segundos, con el objeto de remover los sedimentos del fondo y lograr una suspensión uniforme, continúe agitando hasta completar 60 segundos. Algunas veces es necesario aflojar los sedimentos del fondo del cilindro, mediante un agitador de vidrio.

**5.2.6.** Al terminar el minuto de agitación, coloque el cilindro sobre la mesa.

**5.2.7.** Coloque el hidrómetro observe y anote las dos primeras lecturas del hidrómetro al minuto, y a los dos minutos después de haber colocado el cilindro sobre la mesa. Estas lecturas deben realizarse en el tope del menisco. Inmediatamente después de realizar la lectura de los dos minutos, extraígaselo cuidadosamente del hidrómetro de la suspensión y colóquese en un cilindro graduado con agua limpia. Si el hidrómetro se deja mucho tiempo en la suspensión, parte del material que se está asentando se puede adherir al bulbo, causando errores en las lecturas.

**5.2.8.** Cuide el hidrómetro no toque las paredes del cilindro, las lecturas se tomarán con una precisión de 0.5 g/L o 0.0005 respectivamente. Tome las siguientes lecturas a 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos.

**5.2.9.** Luego de registrar la lectura del hidrómetro registre la temperatura por medio del termómetro. Después de cada lectura del hidrómetro cuidadosamente retire del suelo en suspensión y ponga el mismo en agua limpia. Alrededor de 25 a 30 segundos antes de hacer la lectura retire el agua y sumerja lentamente en el suelo en suspensión.

**5.2.10.** Luego de la última lectura del hidrómetro lave el material por el tamiz 0.075 mm (N° 200), seque el material retenido a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F), el análisis granulométrico de la muestra seca se realizará utilizando los tamices 0.425 mm y 0.075 mm.

**5.2.11.** Si el peso de la muestra se va a determinar al final del ensayo, lave cuidadosamente toda la suspensión transfiriéndola en recipiente de evaporación. Seque el material al horno, deje enfriar y determine el peso de la muestra. El peso seco de la muestra de suelo empleada se obtendrá restándole a este valor el peso del agente dispersante empleado.

## **6. Corrección de las lecturas del hidrómetro**

**6.1.** Antes de proceder con los cálculos, las lecturas del hidrómetro serán corregidas por menisco, por temperatura, por floculante y punto cero.

**6.2.** Corrección por menisco (Cm). Los hidrómetros se calibran para leer correctamente a la altura de la superficie del líquido. La suspensión de suelo no es transparente y no es posible leer directamente a la superficie del líquido; por lo tanto, la lectura del hidrómetro se debe realizar en la parte superior del menisco.

**6.3.** La corrección por menisco es constante para un hidrómetro dado y se determina introduciendo el hidrómetro en agua destilada o desmineralizada y observando la altura a la cual el menisco se levanta por encima de la superficie del agua. Valores corrientes de  $C_m$  son:

**Hidrómetro tipo 151 H:**

$$C_m = 0.6 \times 10^{-3} \text{ g/litro}$$

**Hidrómetro tipo 152 H:**

$$C_m = 1.0 \text{ g/litro}$$

**6.4.** Corrección por temperatura ( $C_t$ ). A cada una de las lecturas de hidrómetro se debe aplicar también un factor de corrección por temperatura, el cual debe sumarse algebraicamente a cada lectura.

**6.5.** Este factor puede ser positivo o negativo, dependiendo de la temperatura de la suspensión en el momento de realizar cada lectura. Obténgase el valor del factor de corrección por temperatura para cada lectura de hidrómetro utilizando la Tabla C4.

**Tabla C4.** Factor de corrección por temperatura

Tem. (°C)	Ct	
	Hidrómetro graduado en	
	Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) x 10 <sup>3</sup> 152 H	Concentración (g/litro)* 151 H
10	-1.3	-2.0
11	-1.2	-1.9
12	-1.1	-1.8
13	-1.0	-1.6
14	-0.9	-1.4
15	-0.8	-1.2
16	-0.6	-1.0
17	-0.5	-0.8
18	-0.3	-0.5
19	-0.2	-0.3
20	0.0	0.0
21	0.2	0.3
22	0.4	0.6
23	0.6	0.9

Continuación Tabla C4

Tem. (°C)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) x 10 <sup>3</sup> 152 H	Concentración (g/litro)* 151 H
24	0.8	1.3
25	1.0	1.7
26	1.3	2.0
27	1.5	2.4
28	1.8	2.9
29	2.0	3.3
30	2.3	3.7

**6.6.** Para hidrómetros tipo 151 H busque Ct en la columna derecha (g/litro). Para hidrómetros tipo 152 H busque Ct en la columna izquierda (g/cm<sup>3</sup>). Valores de Ct para la corrección por temperatura de las lecturas del hidrómetro.

**6.7.** La corrección por agente dispersante se determina generalmente en conjunto con la corrección por punto cero; por ello se les denomina “corrección por agente dispersante y punto cero”.

**6.8.** El procedimiento para determinar la corrección por agente dispersante y punto cero consistirá en los siguientes pasos:

**6.8.1.** Se selecciona un cilindro graduado de 1000 mL de capacidad y se llena con agua destilada o desmineralizada con una cantidad de agente dispersante igual a la que se empleara en el ensayo.

**6.8.2.** Si el ensayo no se va a utilizar agente dispersante, llénese el cilindro solo con agua destilada o desmineralizada. En este caso la corrección será solamente por punto cero.

**6.8.3.** Realice en la parte superior del menisco, la lectura del hidrómetro e introdúzcase a continuación un termómetro para medir la temperatura de la solución. Calcule la lectura corregida del hidrómetro (Rc) mediante la fórmula:

$$Rc = R' - \text{corrección cero} \pm Ct$$

**Donde:**

R' = Lectura real del hidrómetro

Ct = corrección por temperatura, sumada algebraicamente

## 7. Cálculos

**7.1.** Lectura del hidrómetro corregida. Calcule las lecturas de hidrómetro corregidas por menisco (R) sumándole a cada lectura de hidrómetro no corregida ( $R'$ ), la corrección por menisco  $C_m$ , o sea:

$$R = R' + C_m$$

**7.1.1.** Anote en la plantilla los valores de R obtenidos.

**7.2.** Calcule el diámetro de las partículas (D).

**7.2.1.** El diámetro (D) de las partículas de suelo en suspensión en el momento de realizar cada lectura de hidrómetro se puede calcular también con la fórmula siguiente:

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

**Donde:**

L = Profundidad efectiva en cm.

t = Tiempo transcurrido en min.

**7.2.2.** El valor de (L) profundidad efectiva (Tabla C1).

**7.2.3.** Los valores de K están tabulados en la Tabla C5 en función de su peso específico y temperatura.

**Tabla C5.** Valores de K tabulados en función de su peso específico y temperatura

Temp °C	Peso específico de las partículas del suelo								
	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
10	.01659	.01631	.01604	.01563	.01555	.01532	.01510	.01488	.01468
11	.01636	.01608	.01582	.01557	.01533	.01511	.01489	.01463	.01448
12	.01613	.01586	.01580	.01535	.01512	.01490	.01468	.01448	.01428
13	.01591	.01565	.01539	.01515	.01492	.01470	.01499	.01428	.01409
14	.01571	.01544	.01519	.01495	.01474	.01451	.01430	.01410	.01391
15	.01551	.01525	.01500	.01478	.01454	.01432	.01412	.01392	.01373
16	.01530	.01505	.01481	.01457	.01435	.01414	.01394	.01374	.01356
17	.01511	.01486	.01452	.01439	.01417	.01398	.01376	.01356	.01338
18	.01492	.01467	.01443	.01421	.01399	.01378	.01359	.01339	.01321
19	.01474	.01449	.01425	.01403	.01382	.01361	.01342	.01323	.01305



Continuación Tabla C5

°C	2.45	2.50	2.55	2.60	2.65	2.70	2.75	2.80	2.85
20	.01456	.01431	.01408	.01366	.01365	.01344	.01325	.01307	.01289
21	.01438	.01414	.01391	.01369	.01348	.01328	.01309	.01291	.01273
22	.01421	.01397	.01374	.01353	.01332	.01312	.01294	.01276	.01258
23	.01404	.01381	.01348	.01337	.01317	.01297	.01279	.01261	.01243
24	.01288	.01365	.01342	.01321	.01301	.01282	.01264	.01246	.01229
25	.01372	.01349	.01327	.01306	.01286	.01267	.01249	.01232	.01218
26	.01357	.01334	.01312	.01291	.01272	.01253	.01235	.01218	.01201
27	.01342	.01319	.01297	.01277	.01258	.01239	.01221	.01204	.01188
28	.01327	.01304	.01283	.01264	.01244	.01225	.01208	.01191	.01175
29	.01312	.01290	.01289	.01249	.01230	.01212	.01195	.01178	.01162
30	.01298	.01276	.01256	.01238	.01217	.01199	.01182	.01185	.01149

**7.3.** Calculo para determinar el porcentaje de partículas de diámetro más fino que el correspondiente a una lectura de hidrómetro dad, utilice la siguiente formula:

**Para hidrómetros 152 H 152 H**

$$\% \text{ mas fino} = \frac{Rc \times a}{W_o} \times 100$$

**Donde:**

$W_o$  = Peso de la muestra de suelo secado al horno que se empleó para el análisis del hidrómetro.

$Rc$  = Lectura corregida del hidrómetro.

$a$  = Factor de corrección por peso específico (Tabla C6).

**7.3.1.** Anótense todos los valores obtenidos en su planilla. El factor  $C_t$  puede ser positivo o negativo dependiendo de la temperatura de la suspensión en el momento de realizar la lectura.

**Tabla C6.** Factor de corrección por peso específico

Peso	Coficiente “a”	Peso	Coficiente “a”	Peso	Coficiente “a”
2.45	1.05	2.60	1.01	2.75	0.98
2.50	1.03	2.65	1.00	2.80	0.97
2.55	1.02	2.70	0.99	2.85	0.96

## 8. Consideraciones generales

**8.1.** La prueba debe realizarse en un lugar cerrado, con ventilación indirecta, limpio y libre de corriente de aire que pueda provocar la pérdida de partículas de la muestra. Todo el equipo tiene

que estar limpio y los tamices no tengan indicios de tener falla, es decir, que sus hilos presenten aberturas uniformes y no estén dañados ni rotos. Evitar que se produzcan pérdidas de material por manipulaciones durante el ensayo.

**8.2.** El tamizado continuara hasta cuando no pasa más del uno por ciento de la masa retenida en cualquier tamiz durante 60 segundos, operando cada tamiz individualmente. Cuando se utilice una tamizadora mecánica, se pondrá a funcionar por diez minutos aproximadamente, y el resultado se puede verificar usando el método manual. Se determina el peso de la muestra retenida en cada tamiz y se registra. La suma de los pesos retenidos de todos los tamices y el peso inicial de la muestra no debe inferir en más del 1%.

#### **Anexo D.**

#### **Determinación del límite líquido**

#### **Método de casa grande NTE INEN 691 (1982)**

### **1. Objeto**

**1.1.** Esta norma establece el método para determinar el límite líquido de un suelo secado al horno a 60°C, secado al aire o en estado natural.

### **2. Alcance**

**2.1.** Este ensayo debe hacerse únicamente con la fracción de suelo que pasa el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (No. 40).

**2.2.** Mediante este ensayo se determina también el índice de flujo de los suelos en función de la curva de flujo (ver 9.4 y 9.4.1).

### **3. Disposiciones generales**

**3.1.** En la Norma INEN 685 se establecen las definiciones de los términos y símbolos empleados en este documento.

**3.2.** En la Norma INEN 690 se establece la determinación del contenido de agua por el método del secado al horno.

**3.3.** En la Norma INEN 688 se establecen los métodos para preparar muestras de suelo alterado para ensayos.

**3.4.** La temperatura del laboratorio debe mantenerse a  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

**3.5.** La humedad relativa en el laboratorio no debe ser menor del 50% y, en la cámara húmeda, no menor del 90%.

#### **4. Resumen**

**4.1.** Este método de ensayo consiste en determinar el contenido de agua de un suelo, en el límite entre su comportamiento líquido y plástico, valiéndose de un dispositivo mecánico (Copa de Casagrande) en el que, con un determinado número de golpes, se establece la fluencia del suelo en condiciones normalizadas.

#### **5. Equipo**

**5.1. Dispositivo mecánico (Copa de Casagrande).** Consiste en una copa de bronce o de acero resistente a la corrosión, cuya base debe ser de caucho vulcanizado o de madera dura (Figura D1).

**5.2. Acanaladores.** Deben ser de bronce o acero resistente a la corrosión, calibrados con las debidas dimensiones.

**5.3. Plato o fuente de mezclado.** Recipiente de tamaño adecuado, apto para el mezclado de la muestra de suelo.

**5.4. Espátulas.** Deben ser de acero inoxidable, de tamaños adecuados, apropiados para el mezclado y el cortado de la muestra de suelo.

**5.5. Disco de evaporación.** Pueden utilizarse vidrios de reloj de tamaño adecuado o, en su defecto, una tela impermeable (opcional).

**5.6. Equipo para determinar el contenido de agua.** Como el descrito en la Norma INEN 690.

**5.7. Botella de lavado.** Fabricada preferentemente de plástico, o un vaso de precipitación que contenga agua destilada.

**5.8. Recipientes herméticos.** Deben ser de un material resistente a la corrosión y capaces de contener alrededor de 200 a 250 g de suelo húmedo.

**5.9. Calibrador.** Puede ser metálico o de un material resistente a la corrosión.



**Figura D1.** Copa de Casagrande

**Fuente:** Laboratorio de Materiales de construcción UNL

## **6. Calibración del equipo**

**6.1.** Debe inspeccionarse el dispositivo mecánico a fin de determinar que se encuentre limpio, seco y en buenas condiciones de trabajo, de tal manera que la copa descienda libremente y no tenga excesivo juego lateral en su articulación.

**6.1.1.** La altura de caída de la copa del dispositivo mecánico debe ajustarse de tal forma que, cuando la copa está localizada a su máxima altura, el calibrador de 10 mm pase justamente entre ésta y la base; para esto se utiliza el calibrador de 10 mm que tiene el mango del acanalador Tipo B o un calibrador de altura (10 mm).

**6.2.** Debe inspeccionarse el acanalador para determinar que se encuentre limpio y seco; no debe usarse un acanalador cuya punta haya alcanzado un ancho de 2,5 mm a causa del desgaste.

## **7. Preparación de la muestra**

**7.1.** Se toma una muestra de alrededor de 250 g de la porción completamente mezclada del material que pase el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (No. 40), la cual ha sido obtenida de acuerdo con la Norma INEN 688.

**7.2.** A esta muestra se la deja evaporar, si fuera necesario, o se la añade agua destilada y se la mezcla completamente en la fuente, usando la espátula, hasta obtener una pasta de suelo homogéneo y densa que pueda moldearse fácilmente con los dedos.

## 8. Procedimiento de ensayo

**8.1.** Colocar una porción de esta pasta en la copa, sobre la parte que descansa en la base, extendiéndola rápida y cuidadosamente con la espátula, cuidando que no queden atrapadas burbujas de aire.

**8.2.** Nivelar el suelo con la espátula paralelamente a la base, de tal manera que tenga una profundidad de 10 mm en la sección de espesor máximo, el suelo sobrante debe regresar al plato o fuente de mezclado.

**8.3.** Con el acanalador adecuado<sup>5</sup>, realizar un canal en la muestra, evitando despegarla de la copa, de manera que su plano de simetría sea perpendicular a la articulación de la copa, y procurando, además, que el acanalador se mantenga normal a la superficie de la copa.

**8.3.1.** Para evitar la rotura de los lados del canal o el deslizamiento de la muestra de suelo en la copa, se permiten hasta seis recorridos del acanalador, desde atrás hacia adelante o desde adelante hacia atrás; la profundidad del canal se incrementa con cada recorrido y sólo el último debe tocar el fondo de la copa<sup>6</sup>

**8.4.** Colocar la copa en su dispositivo mecánico, cuidando que la superficie inferior de la copa y la superficie de la base se encuentren libres de suelo o agua, girar el manubrio a una velocidad de 2 revoluciones por segundo, contar los golpes necesarios para que las dos mitades de la muestra se pongan en contacto al fondo del canal, en una distancia continua de alrededor de 10 mm, por la fluencia del suelo y no por deslizamiento entre el suelo y la copa; medir esta distancia con el extremo del acanalador Tipo B o un calibrador y anotar el número de golpes necesarios para que esto ocurra<sup>7</sup>

**8.4.1.** Si el número de golpes para la primera determinación está entre 35 y 45 se continúa normalmente como se indica en 8.6; si no, añadir más agua o secarlo al aire, lo que fuere más apropiado y repetir de 8.1 a 8.4, hasta que esta condición se obtenga.

---

<sup>5</sup> En el caso de que con el acanalador Tipo A, no se obtenga un canal limpio, como ocurre en suelos arenosos, se debe usar el acanalador Tipo B, cuidando de que se produzca un deslizamiento entre el suelo y la superficie de la copa.

<sup>6</sup> El canal, en lo posible, debe realizarse con el menor número de recorridos del acanalador.

<sup>7</sup> Algunos suelos tienden a deslizarse en lugar de fluir; si esto ocurre, el resultado no es válido y debe repetirse el ensayo añadiendo agua hasta que ocurra el flujo; si después del incremento adicional de agua el suelo sigue desliziándose con un mínimo de 25 golpes, el ensayo no es aplicable, debiendo anotarse que el límite líquido no puede determinarse.

**8.5.** Regresar la muestra de la copa al plato o fuente de mezclado, mezclar completamente, limpiar y secar la copa y el acanalador y repetir las operaciones de 8.1 a 8.4, hasta que tres ensayos consecutivos den el mismo número de golpes para cerrar el canal en la forma especificada.

**8.6.** Del lugar donde se juntan los bordes del canal, tomar con la espátula una porción de suelo de alrededor de 10 g, colocarla en un recipiente adecuado y determinar el contenido de agua de acuerdo con la Norma INEN 690.

**8.7.** Realizar las operaciones de 8.1 a 8.6 por lo menos cuatro veces, usando la misma muestra con nuevos incrementos de agua destilada, los cuales deben hacerse de tal manera que el número de golpes necesario para cerrar el canal varíe de 45 a 5, de modo que dos ensayos estén bajo los 25 golpes y dos sobre los 25 golpes<sup>8</sup>, mezclando cada incremento de agua por lo menos durante 5 minutos.

**8.8.** Para efectuar los distintos ensayos, hacer el amasado de la muestra únicamente mediante el aumento progresivo de agua, de tal manera que cada vez la muestra de suelo se torne más fluida.

## **9. Cálculos**

**9.1.** Los datos obtenidos deben registrarse en un papel semilogarítmico, representando los contenidos de agua, en la escala aritmética, como abscisas, y el número de golpes en la escala logarítmica, como ordenadas; de esta manera se determina un punto para cada ensayo realizado.

**9.2.** Se traza la curva de flujo uniendo con una línea recta y, de la manera más aproximada, los cuatro puntos registrados.

**9.3.** El límite líquido de la muestra de suelo ensayada se determina por interpolación de la curva de flujo y está dado por el contenido de agua correspondiente a la intersección de la curva de flujo con los 25 golpes en las ordenadas, el mismo que debe redondearse al número entero más cercano, de conformidad con la Norma INEN 52.

**9.4.** El índice de flujo de la muestra de suelo ensayada se determina prolongando la curva de flujo, hasta intersectar las ordenadas correspondientes a los 10 y 100 golpes, y está dado por la pendiente de la curva de flujo, expresada por el incremento de agua entre los 10 y 100 golpes<sup>9</sup>.

---

<sup>8</sup> Con este proceso se tiende a obtener muestras de una consistencia tal, que se puede hacer un ensayo dentro de cada una de las siguientes escalas de golpes: 45-35; 35-25; 25-15; 15-5; de modo que la variación de cada ensayo sea de por lo menos 10 golpes.

<sup>9</sup> El índice de flujo se determina como el incremento de agua correspondiente al número de golpes, representado por un intervalo logarítmico unitario, por ejemplo 1-10; 10-100.

**9.4.1.** El índice de flujo puede calcularse también con la siguiente ecuación:

$$I_f = \frac{W_1 - W_2}{\log 10 \frac{N_2}{N_1}}$$

**Donde:**

$I_f$  = índice de flujo

$W_1$  = contenido de agua, en % correspondiente a  $N_1$  golpes

$W_2$  = contenido de agua, en % correspondiente a  $N_2$  golpes

## **10. Errores del método**

**10.1.** Al realizar las tres series consecutivas del ensayo (ver 8.5) con el mismo contenido de agua, el número de golpes no debe diferir en más de un golpe; en caso contrario, debe repetirse el ensayo.

## **11. Informe de resultados**

**11.1.** El informe que sobre este ensayo se emita debe indicar:

- a) Resultados obtenidos,
- b) Método utilizado,
- c) Condición del suelo (estado natural: secado al aire, secado al horno, no conocido, etc.),
- d) Periodo de reposo.

**11.2.** Todos los ensayos y observaciones que se hagan en el ensayo deben registrarse lo más adecuadamente posible.

### **Anexo E.**

#### **Determinación del límite plástico y el índice de plasticidad NTE INEN 692 (1982)**

### **1. Objeto**

**1.1.** Esta norma establece el método para determinar el límite plástico de un suelo.

### **2. Alcance**

**2.1.** Este ensayo debe hacerse únicamente con la fracción de suelo que pasa el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (No.40).

**2.2.** El resultado de este ensayo sirve también para determinar los índices de plasticidad, tenacidad, liquidez y consistencia de los suelos.

### **3. Disposiciones Generales**

**3.1.** La determinación se efectuará por triplicado sobre porciones de igual cantidad de la misma muestra.

**3.2.** En la Norma INEN 685 se establecen las definiciones de los términos y símbolos empleados en este documento.

**3.3.** En la Norma INEN 690 se establece la determinación del contenido de agua por el método del secado al horno.

**3.4.** En la Norma INEN 688 se establecen los métodos para preparar muestras alteradas para ensayos.

**3.5.** La temperatura del laboratorio debe mantenerse a  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$ .

**3.6.** La humedad relativa en el laboratorio no debe ser menor del 50% y, en la cámara húmeda, no menor del 90%.

### **4. Resumen**

**4.1.** Este método de ensayo consiste en determinar el contenido de agua de un suelo en el límite entre su comportamiento plástico y sólido, para lo cual se utiliza el proceso de rolado para evaporar gradualmente el agua hasta que comienza a fisurarse o disgregarse.

### **5. Instrumental**

**5.1. Plato o fuente de mezclado.** Recipiente de tamaño adecuado, apropiado para el mezclado de la muestra.

**5.2. Espátula.** Debe ser flexible, de tamaño adecuado, apropiado para el mezclado y cortado de la muestra de suelo.

**5.3. Placa de rolado.** Puede ser de vidrio, mármol o de cualquier material que tenga una superficie lisa no absorbente, de alrededor de 15 x 20 cm.



**5.4. Varilla de calibración, (opcional)** Debe ser de acero inoxidable de 3 mm de diámetro y más o menos 10 mm de largo.

**5.5. Equipo para determinar el contenido de agua,** como el descrito en la Norma INEN 690.

**5.6. Recipiente con agua destilada.**

## **6. Preparación del instrumental**

**6.1.** Todo el instrumental a utilizarse en la determinación del límite plástico debe estar limpio, seco y en buenas condiciones de trabajo.

## **7. Preparación de la muestra**

**7.1.** Tomar una muestra de alrededor de 100 g de la porción del material que pase el tamiz de 425  $\mu\text{m}$  (No. 40), obtenida de acuerdo con la Norma INEN 688.

**7.2.** A esta muestra se la deja evaporar, si fuera necesario, o se la añade agua destilada y se la mezcla completamente en el plato o fuente, usando la espátula hasta obtener una pasta de suelo homogénea y plástica, en cantidad suficiente como para moldearla con los dedos como una bola<sup>10</sup>.

**7.3.** Cuando el límite plástico se determina conjuntamente con el límite líquido, se toma al iniciar el ensayo del límite líquido una muestra de aproximadamente 30 g, la cual debe ser suficientemente homogénea y plástica para que pueda formarse con facilidad una bola, sin que se adhiera a los dedos al comprimirla; esta muestra debe permanecer en un recipiente hermético.

## **8. Procedimiento de ensayo**

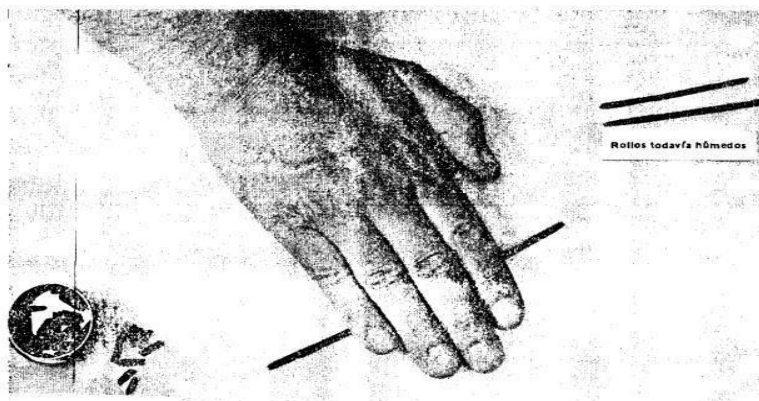
**8.1.** Tomar aproximadamente 10 g de la muestra preparada según se indica en 7.2 o de la muestra separada según 7.3, moldearla entre los dedos, en una bola, luego amasar y rodar la bola entre las palmas de las manos hasta que aparezcan en su superficie pequeñas fisuras, con lo cual se asegura que el suelo tenga un suficiente secado.

**8.2.** Rotar esta bola entre las puntas de los dedos de una mano y la placa de vidrio o de mármol, como se indica en la Figura E1, con una presión suficiente como para formar del suelo un rollo de

---

<sup>10</sup> Cuando el ensayo del límite plástico se lleva a cabo en muestras de suelo en su condición natural y esta se encuentra demasiado húmeda, debe dejarse secar al aire hasta obtener la consistencia requerida.

3 mm de diámetro en 5 a 15 movimientos completos (hacia adelante y hacia atrás) de la mano, a una velocidad de 80 a 90 movimientos por minuto.



**Figura E1.** Rolado de los rollos

**8.3.** Si el rollo de suelo se desmenuza antes de alcanzar los 3 mm de diámetro, añadir agua destilada a toda la masa de suelo. Volver a mezclarlo en el plato o fuente, amasarlo completamente y proceder como se indica en 8.1 y 8.2.

**8.4.** Si el rollo llega a los 3 mm de diámetro sin presentar fisuras o signos de desmenuzamiento, recoger el rollo y moldearlo nuevamente entre los dedos en una bola y repetir el proceso dado en 8.2 hasta cuando el rollo al llegar a los 3 mm de diámetro se corte, tanto longitudinalmente como transversalmente, o se desmenuce al rolarlo con la presión requerida. Puede usarse la varilla de metal como una guía para obtener el correcto diámetro del rollo.

**8.4.1.** Los rollos de algunos suelos son extremadamente duros, por lo que es difícil determinar el punto final; cuando esto ocurre, se debe amasar completamente todas las porciones desmenuzadas del rollo, formar una bola y proceder a rolarlo nuevamente; si el rollo no se desmenuza inmediatamente, no se ha alcanzado todavía el punto final del límite plástico.

**8.4.2.** En algunos suelos poco plásticos, el desmenuzamiento puede ocurrir cuando el rollo tiene un diámetro mayor a 3 mm, por lo cual el primer punto de rotura indicará el límite plástico del suelo ensayado

**8.4.3.** El desmenuzamiento se manifiesta de diferente manera, de acuerdo a los diversos tipos de suelo. Algunos suelos se separan en numerosas concreciones de partículas, otros pueden formar una capa tubular exterior que comienza a partirse en ambos extremos, el fisuramiento progresa

hacia la mitad y finalmente el rollo se divide en varias partículas pequeñas. Los suelos altamente arcillosos requieren mucha presión para forjar el rollo, particularmente cuando se aproxima al límite plástico, terminando por romperse en una serie de segmentos.

**8.4.4.** En ningún momento el operador debe intentar producir la falla exactamente a los 3 mm de diámetro, dejando que el rollo alcance este diámetro y luego reduciendo el tipo de rolado o la presión de la mano, y continuar el rolado sin deformación posterior hasta que el rollo falle.

**8.5.** Recoger las porciones desmenuzadas de los rollos de suelo en un recipiente hermético y determinar el contenido de agua de acuerdo con la Norma INEN 690.

**8.6.** Dos muestras más serán tratadas como se indica de 8.1 a 8.5, de modo que se hagan tres determinaciones completamente separadas.

## **9. Cálculos**

**9.1.** El valor del límite plástico del suelo será el promedio de los contenidos de agua determinados según el numeral 8 de esta norma, expresado con el número entero más cercano, de conformidad con la Norma INÉN 52.

**9.2.** En el Anexo E1 se indica el cálculo de los índices de plasticidad, tenacidad, liquidez y consistencia de los suelos.

## **10. Errores del método**

**10.1.** La máxima variación entre los valores absolutos de la determinación efectuada por triplicado no debe exceder de  $\pm 5\%$ ; en caso contrario, debe repetirse el ensayo.

## **11. Informe de Resultados**

**11.1.** El informe sobre este ensayo debe indicar:

**11.1.1.** *Límite plástico.* Expresado con tres cifras significativas. (Si no puede determinarse, se informa como suelo NO PLÁSTICO).

**11.1.2.** Información de la muestra (procedencia, estado natural, secado al aire, secado al horno, no conocido, etc.).

**11.1.3.** Todos los resultados y observaciones que se hagan en el ensayo deben registrarse de la mejor forma posible, para lo cual se recomienda el uso de la hoja de registro.

### Anexo E1.

**E1. Índice de plasticidad.** Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$IP = L_L - L_P$$

**E1.1. Índice de plasticidad.** Puede estar bajo las siguientes condiciones:

- a) cuando no puede determinarse el límite plástico, el índice de plasticidad debe informarse como *No Plástico* (NP);
- b) cuando el límite plástico es igual o mayor que el límite líquido, el índice de plasticidad debe informarse como Cero.

**E2. Índice de tenacidad.** Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_T = \frac{I_P}{I_f}$$

**E3. Índice de liquidez.** Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_L = \frac{w - L_P}{I_P}$$

**E4. Índice de consistencia.** Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$I_C = \frac{L_L - w}{I_P}$$

**E5.** Los símbolos empleados en las ecuaciones anteriores significan:

- $I_P$  = índice de plasticidad.
- $L_L$  = límite líquido.
- $L_P$  = límite plástico.
- $I_T$  = índice de tenacidad.
- $I_f$  = índice de flujo.
- $I_L$  = índice de liquidez.
- $w$  = contenido de agua.
- $I_C$  = índice de consistencia.

**Anexo F.**  
**Ensayo compactación con Proctor estándar**  
**Resumen Norma ASSTHO T99-01ASTM D 698**

### **1. Alcance**

**1.1.** Este método, describe el procedimiento para la determinación de la relación entre el contenido de humedad y la densidad de los suelos compactados con un molde de 4 ó 6 pulgadas, con un pisón de 2.5 kg (5.5lb), que cae de una altura de 305 mm (12 in) produciendo una energía de compactación de 12400 lb-pie/pie<sup>3</sup>.

**1.2.** Existen cuatro métodos alternativos y son los siguientes:

- **Método A.-** Con un molde de 101.60 mm (4 in) de diámetro y material pasante del tamiz de 4.75 mm (N° 4).
- **Método B.-** Con un molde de 152.40 mm (6 in) de diámetro y material pasante del tamiz de 4.75 mm (N° 4).
- **Método C.-** Con un molde de 101.60 mm (4 in) de diámetro y material pasante del tamiz de 19.0 mm (3/4 in).
- **Método D.-** Con un molde de 152.40 mm (6 in) de diámetro y material pasante del tamiz de 19.0 mm (3/4 in).

**1.3.** En las especificaciones se indicará el método a usarse, dependiendo del material a probar. Si no se especifica, regirá el método A.

### **2. Equipo**

**2.1. Moldes.** - Serán cilíndricos de paredes sólidas hechos de metal de 4 pulgadas y 6 pulgadas. Con un collar ajustable aproximadamente de 60 mm (2.375 in) de altura.

**2.1.2.** El molde y el collar deben estar contruidos de tal manera que queden firmemente unidos a la placa base hecha del mismo material.

- **Molde de 4 pulgadas:** Un molde con un diámetro interno de  $101.60 \pm 0.41$  mm ( $4.000 \pm 0.016$  in), una altura de  $116.43 \pm 0.13$  mm ( $4.584 \pm 0.005$  in), y una capacidad de  $0.000943 \pm 0.000008$  m<sup>3</sup> ( $1/30$  ( $0.0333$ )  $\pm 0.0003$  pies<sup>3</sup>).

- **Molde de 6 pulgadas:** Un molde con un diámetro interno de  $152.40 \pm 0.66$  mm ( $6.000 \pm 0.026$  in), una altura de  $116.43 \pm 0.13$  mm ( $4.584 \pm 0.005$  in) y una capacidad de  $0.002124 \pm 0.000021$  m<sup>3</sup> ( $1/13.33(0.07500) \pm 0.00075$  pies<sup>3</sup>).

## 2.2. Pisón:

- **Operado manualmente.** - Un pisón de metal con una cara plana circular de 50.80 mm (2.00 in) de diámetro, una tolerancia por el uso de  $\pm 0.25$  mm (0.01 in) y una masa de  $2.495 \pm 0.009$  kg ( $5.5 \pm 0.02$  lb). El pisón debe estar equipado con una guía para controlar la altura de caída del golpe desde una altura libre de  $305 \pm 2$  mm ( $12.00 \pm 0.06$  in) sobre la altura del suelo. La guía tendrá por lo menos cuatro agujeros de ventilación, no menores de 9.5 mm (3/8 in) de diámetro, espaciados aproximadamente  $90^\circ$  (1.57 rad) y 19 mm (3/4 in) de cada extremo y que tenga el suficiente espacio libre para que caiga el pisón y la cabeza sin restricción.
- **Operado mecánicamente.** - Un pisón de metal equipado con un dispositivo para controlar la altura de caída del golpe desde una altura libre de  $305 \pm 2$  mm ( $12.00 \pm 0.06$  in) sobre la altura del suelo y distribuya uniformemente los golpes sobre la superficie del suelo. El pisón tendrá una cara plana de 50.80 mm (2.00 in), una tolerancia de  $\pm 0.25$  mm (0.01 in) y una masa de  $2.495 \pm 0.009$  kg ( $5.5 \pm 0.02$  lb). Debe ser calibrado de acuerdo a la norma ASTM D 2168.

**2.3. Cara del pisón.** - Debe usarse un pisón de cara circular, pero puede usarse como alternativa uno de cara de sector circular, deberá indicarse el tipo de cara usada diferente al circular de 50.8 mm (2 in) de diámetro, pero la utilizada deberá tener un área igual a la circular.

**2.4. Dispositivo para extracción de la muestra.** - Puede ser una gata, palanca, extractor u otro dispositivo que permita extraer la muestra compactada del molde.

**2.5. Balanzas.** - Una de acuerdo a los requerimientos de la norma AASHTO M 231 (dispositivo para pesar usados en los ensayos de materiales).

**2.6. Horno.** - Termostáticamente controlado capaz de mantener una temperatura de  $110 \pm 5$  °C ( $230 \pm 9$  °F) para el secado de las muestras.

**2.7. Regla.** - De acero endurecido con un borde recto, mínimo de 250 mm (10 in) de longitud. Deberá tener un borde biselado y una cara plana.

**2.8. Tamices.** - De 50 mm (2 in), 19.0 mm ( $\frac{3}{4}$  in) y 4.75 mm (N° 4) conforme al requerimiento de la norma AASHTO M 92.

**2.9. Herramientas para mezclado.** - Tales como: cacerola para mezclado, cuchara, paleta, espátula, etc., o un dispositivo mecánico conveniente para mezclar completamente la muestra de suelo con varios incrementos de agua.

**2.10. Recipientes.** - Hechos de material resistentes a la corrosión y no sujetos al cambio de masa o desintegración por la repetida calefacción y enfriamiento. Los recipientes tendrán tapas ajustadas para prevenir la pérdida de humedad de las muestras antes de la determinación de la masa inicial y prevenir la absorción de humedad de la atmosfera después del secado y antes de la determinación de la masa final. Se necesita un recipiente para cada determinación del contenido de humedad.

### **3. Muestra de ensayo**

#### **3.1. Método A:**

**3.1.1.** Si la muestra del suelo esta húmeda cuando se recibe del campo, séquela hasta que se ponga desmenuzable al introducir una espátula. El secado puede efectuarse al aire o por un horno de secado que mantenga una temperatura que no exceda los 60 °C (140 °F).

**3.1.2.** Tamice una cantidad adecuada de suelo pulverizado sobre el tamiz 4.75 mm (N° 4). Deseche el material grueso si alguno es retenido en el tamiz de 4.75 mm (N° 4).

**3.1.3.** Seleccione una muestra representativa, con una masa aproximada de 3kg (7 lb) ó más del suelo.

#### **3.2. Método B:**

**3.2.1.** Seleccione una muestra representativa con una masa aproximada de 7kg (16 lb), igual que el método A.

#### **3.3. Método C:**

**3.3.1.** Si la muestra del suelo esta húmeda cuando se recibe del campo, séquela hasta que se ponga desmenuzable al introducir una espátula. El secado puede efectuarse al aire o por un aparato de secado que mantenga una temperatura que no exceda los 60 °C (140 °F).

**3.3.2.** Tamice una cantidad adecuada de suelo pulverizado sobre el tamiz 19.0 mm. Deseche el material grueso si alguno es retenido en el tamiz de 19.0 mm.

**3.3.3.** Seleccione una muestra representativa, con una masa aproximada de 5kg (11 lb) ó más del suelo.

**3.3.4.** Si fuese recomendable mantener el mismo porcentaje de material grueso (pasando tamiz 50 mm (2 in) y retenido sobre el tamiz de 4.75 mm (No 4) en la muestra para densidad- humedad que en la muestra original de campo, el material retenido sobre el tamiz de 19 mm (3/4 in) será reemplazado como sigue:

- Se tamiza una cantidad apropiada del material representativo pulverizado por los tamices de 50 mm (2 in) y 19 mm (3/4 in).
- El material que pasa el tamiz de 50 mm (2 in) y es retenido sobre el tamiz de 19 mm (3/4 in) se lo pesa y se lo reemplaza por igual peso de material que pase el tamiz de 19 mm y sea retenido sobre el de 4.75 mm. Se toma el material para el reemplazo de la porción no usada de la muestra.

#### **3.4. Método D:**

**3.4.1.** Seleccione una muestra representativa, con una masa aproximada de 11 kg (25 lb), igual que el método C.

### **4. Procedimiento**

#### **4.1. Método A:**

- Determine y anote la masa del molde y sus dimensiones para calcular su volumen. Ensamble un molde, el collar y el plato base, el mismo que se apoyará en una superficie uniforme y rígida.
- Mezcle la muestra seleccionada con agua para humedecerla hasta aproximadamente 4% por debajo del contenido de humedad óptimo. Deje la muestra en reposo en un recipiente herméticamente cerrado por un tiempo mínimo como lo especifica la tabla que se indica a continuación:



**Tabla F1.** Tiempo de reposo para muestras húmedas

<b>Clasificación</b>	<b>Tiempo mínimo de reposo en horas</b>
GW, GP, SW, SP	ningún requisito
GM, SM	3
Todos los demás suelos	16

- Forme un espécimen compactando el suelo preparado, en el molde de 101.60 mm (4 in), en tres capas aproximadamente iguales, para una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5 in).
- Aplica los golpes en una relación uniforme de aproximadamente de 25 golpes/minuto.
- Compacte cada capa con 25 golpes de pisón distribuidos uniformemente, dejándolo caer libremente desde una altura de 305 mm sobre la altura del suelo compacto.
- Luego de la compactación remueva el collar de extensión, con ayuda del cuchillo, remueva el suelo adyacente al collar para evitar el desgarro del suelo bajo la parte superior del molde; recorte con cuidado el suelo excedente compactado de la parte superior del molde usando el borde recto de regla.
- Pese el molde con la muestra de suelo húmedo en kilogramos con aproximación a cinco gramos.
- Extraer la muestra compactada del molde con la ayuda del extractor de muestras y realice un corte vertical por el centro. Tome una muestra de material de una de las caras cortadas; pese inmediatamente y seque para determinar el contenido de humedad de acuerdo con la norma AASHTO T 265.
- Prepare una nueva muestra agregando suficiente agua para incrementar el contenido de humedad del suelo de 1% a 2% y repita el procedimiento antes indicado para cada incremento de agua.
- Continúe una serie de determinaciones hasta que haya una disminución de la masa húmeda,  $W_1$ , por metro cúbico ó pie cúbico del suelo compactado.

#### **4.2. Método B:**

**4.2.1.** Siga el mismo procedimiento del método A, excepto.

- Forme un espécimen compactando el suelo preparado en el molde de 152.4 mm (6 in) (con collar), en tres capas aproximadamente iguales, para una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5 in).
- Cada capa será compactada con 56 golpes del pisón distribuidos uniformemente.

#### **4.3. Método C:**

- Mezcle la muestra seleccionada con agua para humedecerla 4% por debajo del contenido de humedad óptimo.
- Forme un espécimen compactando el suelo preparado, en el molde de 101.60 mm (4 in) (con collar), en tres capas iguales, para una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5 in).
- Compacte cada capa con 25 golpes de pisón distribuidos uniformemente. Dejándolo caer libremente desde una altura de 305 mm sobre la altura del suelo compacto.
- Luego de la compactación remueva el collar de extensión, con ayuda del cuchillo, remueva el suelo adyacente al collar para evitar el desgarro del suelo bajo la parte superior del molde; recorte con cuidado el suelo excedente compactado de la parte superior del molde usando el borde recto de regla. Los agujeros producidos en la superficie por la remoción de material grueso deben ser rellenados con material más pequeño.
- Pese el molde con la muestra de suelo húmedo en kilogramos con aproximación a cinco gramos.
- Extraer la muestra compactada del molde con la ayuda del extractor de muestras y realice un corte vertical por el centro. Tome una muestra de material de una de las caras cortadas; pese inmediatamente y seque para determinar el contenido de humedad de acuerdo con la norma AASHTO T 265.
- Prepare una nueva muestra agregando suficiente agua para incrementar el contenido de humedad del suelo de 1% a 2% y repita el procedimiento antes indicado para cada incremento de agua.
- Continúe una serie de determinaciones hasta que haya una disminución de la masa húmeda,  $W_1$ , por metro cúbico ó pie cúbico del suelo compactado.

#### **4.4. Método D:**

**4.4.1.** Siga el mismo procedimiento del método C:

- Forme un espécimen compactando el suelo preparado, en el molde de 152.4 mm (6 in) (con collar), en tres capas aproximadamente iguales, para una altura total compactada de alrededor de 125 mm (5 in).
- Cada capa será compactada con 56 golpes del pisón uniformemente distribuidos.

## 5. Cálculos

**5.1.** Calcule el contenido de humedad, el peso unitario húmedo, peso unitario seco del suelo compactado para cada ensayo como sigue:

$w$  = porcentaje de humedad en el espécimen.

$A$  = peso del recipiente y suelo húmedo;

$$w = \frac{A - B}{B - C} \times 100$$

$$W1 = \frac{\text{Peso de la muestra húmeda}}{\text{Volumen}}$$

$$W = \frac{W1}{w + 100} \times 100$$

$B$  = peso del recipiente y suelo seco.

$C$  = peso del recipiente;

$W$  = peso unitario seco ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) del suelo compactado, y,

$W1$  = peso unitario húmedo ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) del suelo compactado.

## 6. Relación de humedad-densidad

**6.1.** Los cálculos hechos son para determinar el contenido de humedad y la unidad de masa (densidad) en  $\text{kg}/\text{m}^3$  de las muestras compactadas. La densidad (unidad de masa) del suelo deberá ser trazado como ordenadas y el contenido de humedad como abscisas.

**6.1.1. Contenido de humedad óptimo.** - Cuando las densidades y los correspondientes contenidos de humedad para el suelo han sido determinados y dibujados, el contenido de humedad óptimo corresponderá al máximo de la curva.

**6.1.2. Densidad máxima.** - La densidad en  $\text{kg}/\text{m}^3$  correspondiente al contenido de humedad óptimo será la “densidad máxima” bajo la compactación.

## 7. Reporte

7.1. El informe debe incluir:

- El método usado (A, B, C, ó D).
- El contenido de humedad óptimo como porcentaje aproximar al entero más cercano.
- La densidad máxima en kg/m<sup>3</sup> aproximado a 10 kg/m<sup>3</sup>.
- En los métodos C y D, se indicará si el material retenido en el tamiz de 19.0 mm fue removido o reemplazado.
- Tipo de cara del pisón, si es distinta a la circular de 50.8 mm de diámetro.

## 8. Consideraciones generales

8.1. La prueba debe realizarse en un lugar cerrado con ventilación indirecta limpio y libre de corrientes de aire que pueda provocar la contaminación de la muestra.

8.2. La muestra utilizada debe secarse solamente lo necesario para poderla disgregarla.

8.3. Durante la compactación los golpes del pisón deben repartirse uniformemente en toda la superficie del espécimen, cuidando que la caída del pisón sea libre y la superficie del mismo se mantenga limpia.

8.4. Este método de prueba es aplicado para las mezclas de suelo que tienen el 40 por ciento o menos retenido en el tamiz de 4.75 mm (N° 4), cuando se usa el método A o B y el 30 por ciento o menos retenido en el tamiz de 19 mm (3/4 in) cuando se usa el método C ó D. El material retenido en esos tamices será definido como una partícula extra grande (partículas gruesas).

<b>Proctor Estándar AASHTO T -99</b>				
Martillo: 5.5 libras (2.495 ± 0.009) kg – Altura de caída 12 in(305 ± 2)mm				
	<b>MÉTODO A</b>	<b>MÉTODO B</b>	<b>MÉTODO C</b>	<b>MÉTODO D</b>
Material	Pasa tamiz No 4	Pasa tamiz No 4	Pasa tamiz No ¾ in	Pasa tamiz No ¾ in
Molde	4"	6"	4"	6"
No. de capas	3	3	3	3
No. de golpes por capa	25	56	25	56
Volumen del molde	0.000943 m <sup>3</sup>	0.002124 m <sup>3</sup>	0.000943 m <sup>3</sup>	0.002124 m <sup>3</sup>

**Fuente:** Laboratorio UTPL-UCG

## Anexo G.

**Relación entre la viscosidad a la temperatura hallada y la viscosidad a 20° C.**

Temperatura °C	Décimas de Grado									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
10	1.301	1.298	1.294	1.290	1.287	1.283	1.279	1.276	1.272	1.269
11	1.265	1.262	1.258	1.255	1.251	1.248	1.244	1.241	1.237	1.234
12	1.230	1.227	1.223	1.220	1.217	1.213	1.210	1.207	1.203	1.200
13	1.197	1.194	1.190	1.187	1.184	1.181	1.178	1.175	1.171	1.168
14	1.165	1.162	1.159	1.156	1.153	1.150	1.147	1.144	1.141	1.138
15	1.135	1.132	1.129	1.126	1.123	1.120	1.117	1.114	1.111	1.108
16	1.106	1.103	1.100	1.097	1.094	1.091	1.089	1.086	1.083	1.080
17	1.077	1.075	1.072	1.069	1.067	1.064	1.061	1.059	1.056	1.053
18	1.051	1.048	1.045	1.043	1.040	1.038	1.035	1.033	1.030	1.027
19	1.025	1.022	1.020	1.017	1.017	1.012	1.010	1.007	1.005	1.002
20	1.000	0.998	0.995	0.993	0.990	0.988	0.986	0.983	0.981	0.979
21	0.976	0.974	0.972	0.969	0.967	0.965	0.962	0.960	0.958	0.955
22	0.953	0.951	0.949	0.947	0.944	0.942	0.940	0.938	0.936	0.933
23	0.931	0.929	0.927	0.925	0.923	0.920	0.918	0.916	0.914	0.912
24	0.910	0.908	0.906	0.904	0.901	0.899	0.897	0.895	0.893	0.891
25	0.889	0.887	0.885	0.883	0.881	0.879	0.877	0.875	0.873	0.871
26	0.869	0.867	0.866	0.864	0.862	0.860	0.858	0.856	0.854	0.852
27	0.850	0.848	0.847	0.845	0.843	0.841	0.839	0.837	0.836	0.834
28	0.832	0.830	0.828	0.826	0.825	0.823	0.821	0.819	0.816	0.816
29	0.814	0.812	0.810	0.809	0.807	0.805	0.804	0.802	0.800	0.798
30	0.797	0.795	0.793	0.792	0.790	0.788	0.787	0.785	0.783	0.782
31	0.780	0.778	0.777	0.775	0.774	0.772	0.770	0.769	0.767	0.766
32	0.764	0.763	0.761	0.759	0.758	0.756	0.755	0.753	0.752	0.750
33	0.749	0.747	0.746	0.744	0.743	0.741	0.739	0.738	0.736	0.735
34	0.733	0.732	0.731	0.729	0.728	0.726	0.725	0.723	0.722	0.720
35	0.719	0.718	0.716	0.715	0.713	0.712	0.711	0.709	0.708	0.706
36	0.705	0.704	0.702	0.701	0.699	0.698	0.697	0.695	0.694	0.693
37	0.691	0.690	0.689	0.687	0.686	0.685	0.683	0.682	0.681	0.679
38	0.678	0.677	0.675	0.674	0.673	0.672	0.670	0.669	0.668	0.666
39	0.665	0.664	0.663	0.661	0.660	0.659	0.658	0.656	0.655	0.654
40	0.653	0.652	0.650	0.649	0.648	0.647	0.646	0.644	0.643	0.642
41	0.641	0.639	0.638	0.637	0.636	0.635	0.634	0.632	0.631	0.630
42	0.629	0.628	0.627	0.626	0.624	0.623	0.622	0.621	0.620	0.619
43	0.618	0.616	0.615	0.614	0.613	0.612	0.611	0.610	0.609	0.608
44	0.607	0.606	0.604	0.603	0.602	0.601	0.600	0.599	0.598	0.597
45	0.596	0.595	0.594	0.593	0.592	0.591	0.590	0.588	0.587	0.586
46	0.585	0.584	0.583	0.582	0.581	0.580	0.579	0.578	0.577	0.576
47	0.575	0.574	0.573	0.572	0.571	0.570	0.569	0.568	0.567	0.566
48	0.565	0.564	0.564	0.563	0.562	0.561	0.580	0.559	0.558	0.557
49	0.556	0.555	0.554	0.553	0.552	0.551	0.550	0.549	0.548	0.548

## Anexo H. Registro fotográfico.

### Anexo H1. Proceso de toma de coordenadas y obtención de muestras de suelo

#### Foto 1, 2 y 3. Limpieza del lugar y toma de muestras de suelo



#### Foto 4 y 5. Toma de coordenadas de los respectivos lugares de las muestras de suelo



## Anexo H2. Preparación de muestras previo a la realización de ensayos

### Foto 6 y 7. Cuarteo y pulverización de las muestras



## Anexo H3. Ensayos de granulometría

### Foto 8, 9 y 10. Granulometría mediante hidrómetro



Foto 11 y 12. Granulometría por lavado del tamiz 200 y secado al horno



#### Anexo H4. Ensayo de límites de Atterberg

Foto 13 y 14. Ensayo para determinar el límite líquido (Copa de Casagrande)





Foto 15, 16 y 17. Ensayo para determinar el límite plástico



Anexo H5. Ensayo de compactación

Foto 18 y 19. Ensayo de compactación mediante el Proctor estándar



## Anexo H6. Ensayo de permeabilidad del suelo

### Ensayo de permeabilidad mediante el permeámetro de compactación

#### Foto 20 y 21. Compactación de la muestra de suelo

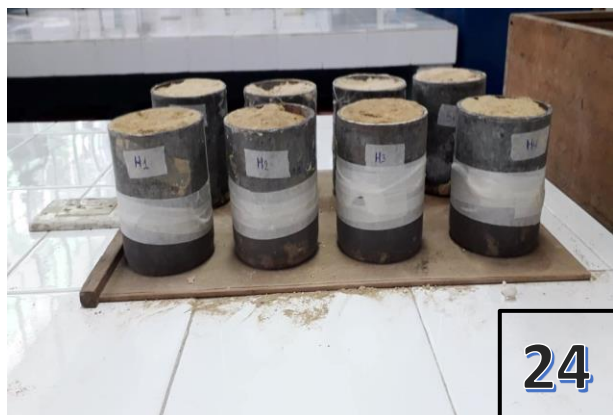


#### Foto 22 y 23. Montaje de equipo y determinación de la permeabilidad del suelo

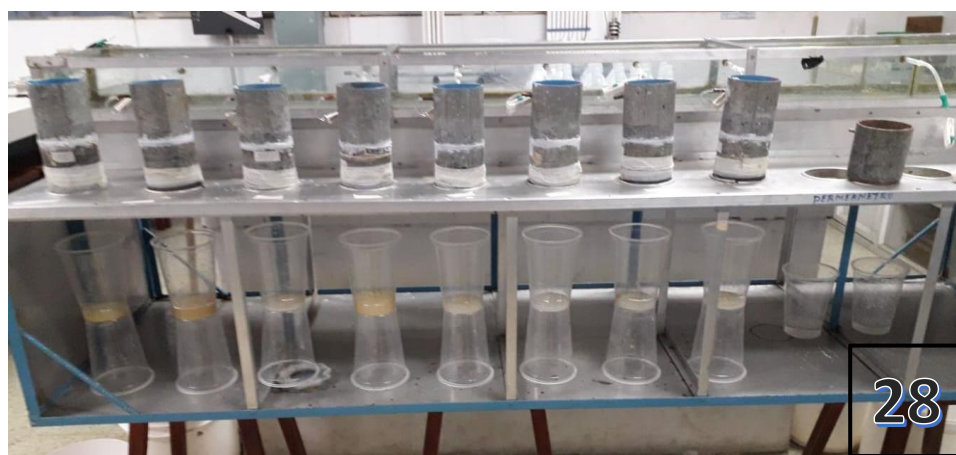


**Ensayo de permeabilidad mediante la batería de permeámetro de cabeza constante.**

**Foto 24 y 25. Preparación de material y saturación de las muestras de suelo no disturbadas**



**Foto 26, 27 y 28. Montaje del equipo y determinación de la permeabilidad del suelo**



## Anexo I.

### Hoja de cálculos de la tabulación de resultados de los diferentes ensayos

#### Anexo I1. Contenido de Humedad

<b>Proyecto :</b> "Estudio de las propiedades físico-mecánicas de arcillas existentes en el cantón Gonzanamá como material impermeabilizante en pequeños embalses de uso agrícola"										
<b>Tesista :</b> Ismael González										
<b>Director de Tesis :</b> Ing. María del Cisne Veintimilla										
<b>Ensayo :</b> Contenido de humedad del suelo										
<b>Norma :</b> NTE INEN 690 (1982)										
<b>Ubicación:</b> Vía antigua a Sacapalca (S) - Salida de Sunamanga (H)					<b>Fecha:</b> 09/05/19			<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción		
	<b>Nº Muestra</b>	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>		<b>Nº Muestra</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>13</b>	<b>37</b>	<b>44</b>	<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>38</b>	<b>41</b>	<b>4</b>	
Peso del recipiente	gr	32.8	33.2	33.3	Peso del recipiente	gr	32.3	30.5	30.3	
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	87.4	83.3	72.1	Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	102.4	99.9	100.5	
Peso del recipiente + muestra seca	gr	76.5	73	64.3	Peso del recipiente + muestra seca	gr	88.3	87.8	86.9	
Contenido de Humedad	%	24.9	25.9	25.2	Contenido de Humedad	%	25.2	21.1	24.0	
<b>Promedio (%)</b>		25.3			<b>Promedio (%)</b>			23.4		

### Anexo I2. Granulometría por lavado

<b>Proyecto :</b> "Estudio de las propiedades físico-mecánicas de arcillas existentes en el cantón Gonzanamá como material impermeabilizante en pequeños embalses de uso agrícola"				
<b>Tesista :</b> Ismael González				
<b>Director de Tesis :</b> Ing. María del Cisne Veintimilla				
<b>Ensayo :</b> Análisis Granulométrico por lavado				
<b>Norma :</b> AASTHO T88-00/ASTM D 422				
<b>Ubicación:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)		<b>Fecha:</b> 16/05/19		<b>N° de muestra:</b> S1
<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción				
Peso Inicial de la Muestra Seca		200.00	gr	D60 = -
Peso de la Muestra Después del Lavado		34.20	gr	D30 = -
Perdida por Lavado		165.80	gr	D10 = -
Tamiz	Abertura ( mm )	Retenido		% Q' Pasa
		( gr. )	( % )	
4	4.750	0	0.00	100.00
8	2.360	0	0.00	100.00
10	2.000	0	0.00	100.00
16	1.180	0	0.00	100.00
20	0.850	0.00	0.00	100.00
30	0.600	0.00	0.00	100.00
40	0.425	0.90	0.45	99.55
50	0.300	3.30	1.65	97.90
60	0.250	2.80	1.40	96.50
80	0.180	6.20	3.10	93.40
100	0.150	3.80	1.90	91.50
200	0.075	17.20	8.60	82.90
Pasa tamiz 200		165.80	82.90	0.00
Σ =		200.00		

#### Curva Granulométrica

Abertura de Tamiz (mm)	% que pasa
4.75	100.00
2.36	100.00
2.00	100.00
1.18	100.00
0.85	100.00
0.60	100.00
0.425	99.55
0.300	97.90
0.250	96.50
0.180	93.40
0.150	91.50
0.075	82.90

<b>Ubicación:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)		<b>Fecha:</b> 16/05/19		<b>N° de muestra:</b> S2		<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción	
Peso Inicial de la Muestra Seca		200.00	gr	D60 =		-	Cu = -
Peso de la Muestra Después del Lavado		36.40	gr	D30 =		-	Cc = -
Perdida por Lavado		163.60	gr	D10 =		-	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido		% Q' Pasa	<div style="text-align: center;"> <h3>Curva Granulométrica</h3> </div>		
		(gr.)	(%)				
4	4.750	0	0.00	100.00			
8	2.360	0	0.00	100.00			
10	2.000	0	0.00	100.00			
16	1.180	0	0.00	100.00			
20	0.850	0.00	0.00	100.00			
30	0.600	0.00	0.00	100.00			
40	0.425	1.20	0.60	99.40			
50	0.300	3.80	1.90	97.50			
60	0.250	3.40	1.70	95.80			
80	0.180	6.60	3.30	92.50			
100	0.150	4.00	2.00	90.50			
200	0.075	17.40	8.70	81.80			
<b>Pasa tamiz 200</b>		163.60	81.80	0.00			
<b>Σ =</b>		200.00					

Ubicación: Vía antigua a Sacapalca (S)		Fecha: 16/05/19		N° de muestra: S3		Ensayo realizado: Laboratorio de Materiales de construcción		
Peso Inicial de la Muestra Seca		200.00	gr	D60 = -		Cu = -		
Peso de la Muestra después del Lavado		37.90	gr	D30 = -		Cc = -		
Perdida por Lavado		162.10	gr	D10 = -				
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido		% Q' Pasa	<div style="text-align: center;"> <h3>Curva Granulométrica</h3> <p>The graph plots the percentage of material passing through various sieve sizes. The x-axis represents sieve size in millimeters on a logarithmic scale from 10.000 to 0.010. The y-axis represents the percentage of material passing, ranging from 0.00 to 100.00. The data points are connected by a smooth curve, showing that most of the sample passes through the larger sieves, with a significant amount retained on the 200-micron sieve.</p> </div>			
		(gr.)	(%)					
4	4.750	0	0.00	100.00				
8	2.360	0	0.00	100.00				
10	2.000	0	0.00	100.00				
16	1.180	0	0.00	100.00				
20	0.850	0.00	0.00	100.00				
30	0.600	0.00	0.00	100.00				
40	0.425	1.30	0.65	99.35				
50	0.300	4.20	2.10	97.25				
60	0.250	3.60	1.80	95.45				
80	0.180	6.90	3.45	92.00				
100	0.150	4.00	2.00	90.00				
200	0.075	17.90	8.95	81.05				
Pasa tamiz 200		162.10	81.05	0.00				
Σ =		200.00						

<b>Proyecto :</b>		<i>"Estudio de las propiedades físico-mecánicas de arcillas existentes en el cantón Gonzanamá como material impermeabilizante en pequeños embalses de uso agrícola"</i>		
<b>Tesista :</b>		Ismael González		
<b>Director de Tesis</b>		Ing. María del Cisne Veintimilla		
<b>Ensayo :</b>		Análisis Granulométrico por tamizado		
<b>Norma :</b>		AASTHO T88-00/ASTM D 422		
<b>Ubicación:</b> Salida de Sunamanga (H)		<b>Fecha:</b> 23/05/19	<b>N° de muestra:</b>	H1
		<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción		
Peso Inicial de la Muestra Seca		200.00	gr	D60 = -
Peso de la Muestra después del Lavado		66.40	gr	D30 = -
Perdida por Lavado		133.60	gr	D10 = -
<b>Tamiz</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Retenido</b>		<b>% Q' Pasa</b>
		<b>(gr.)</b>	<b>(%)</b>	
4	4.750	0	0.00	100.00
8	2.360	0	0.00	100.00
10	2.000	0	0.00	100.00
16	1.180	0	0.00	100.00
20	0.850	0.00	0.00	100.00
30	0.600	0.00	0.00	100.00
40	0.425	2.20	1.10	98.90
50	0.300	5.20	2.60	96.30
60	0.250	7.90	3.95	92.35
80	0.180	18.60	9.30	83.05
100	0.150	8.90	4.45	78.60
200	0.075	23.60	11.80	66.80
<b>Pasa tamiz 200</b>		133.60	66.80	0.00
<b>Σ =</b>		200.00		

**Curva Granulométrica**

Abertura de Tamiz (mm)	% que pasa
10.000	100.00
4.750	100.00
2.360	100.00
2.000	100.00
1.180	100.00
0.850	100.00
0.600	100.00
0.425	98.90
0.300	96.30
0.250	92.35
0.180	83.05
0.150	78.60
0.075	66.80

**Curva Granulométrica**

% que pasa

Abertura de Tamiz mm



<b>Ubicación:</b> Salida de Sunamanga (H)		<b>Fecha:</b> 23/05/19		<b>N° de muestra:</b> H2		<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción	
Peso Inicial de la Muestra Seca		200.00	gr	D60 =		-	Cu = -
Peso de la Muestra después del Lavado		64.10	gr	D30 =		-	Cc = -
Perdida por Lavado		135.90	gr	D10 =		-	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido		% Q' Pasa	<div style="text-align: center;"> <h3>Curva Granulométrica</h3> </div>		
		(gr.)	(%)				
4	4.750	0	0.00	100.00			
8	2.360	0	0.00	100.00			
10	2.000	0	0.00	100.00			
16	1.180	0	0.00	100.00			
20	0.850	0.00	0.00	100.00			
30	0.600	0.00	0.00	100.00			
40	0.425	1.10	0.55	99.45			
50	0.300	4.70	2.35	97.10			
60	0.250	6.80	3.40	93.70			
80	0.180	18.40	9.20	84.50			
100	0.150	9.30	4.65	79.85			
200	0.075	23.80	11.90	67.95			
<b>Pasa tamiz 200</b>		135.90	67.95	0.00			
<b>Σ =</b>		200.00					

<b>Ubicación:</b> Salida de Sunamanga (H)		<b>Fecha:</b> 23/05/19		<b>N° de muestra:</b> H3		<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción	
Peso Inicial de la Muestra Seca		200.00	gr	D60 =		-	Cu = -
Peso de la Muestra después del Lavado		63.20	gr	D30 =		-	Cc = -
Perdida por Lavado		136.80	gr	D10 =		-	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido		% Q' Pasa	<div style="text-align: center;"> <h3>Curva Granulométrica</h3> </div>		
		(gr.)	(%)				
4	4.750	0	0.00	100.00			
8	2.360	0	0.00	100.00			
10	2.000	0	0.00	100.00			
16	1.180	0	0.00	100.00			
20	0.850	0.00	0.00	100.00			
30	0.600	0.00	0.00	100.00			
40	0.425	1.20	0.60	99.40			
50	0.300	5.10	2.55	96.85			
60	0.250	6.40	3.20	93.65			
80	0.180	18.50	9.25	84.40			
100	0.150	9.10	4.55	79.85			
200	0.075	22.90	11.45	68.40			
<b>Pasa tamiz 200</b>		<b>136.80</b>	<b>68.40</b>	<b>0.00</b>			
<b>Σ =</b>		<b>200.00</b>					

**Anexo I3. Límites de Atterberg**

<b>Proyecto :</b> "Estudio de las propiedades físico-mecánicas de arcillas existentes en el cantón Gonzanamá como material impermeabilizante en pequeños embalses de uso agrícola"	
<b>Tesista :</b> Ismael González	
<b>Director de Tesis :</b> Ing. María del Cisne Veintimilla	
<b>Ensayo :</b> Límites de Consistencia	
<b>LÍMITE LÍQUIDO</b>	<b>Norma :</b> NTE INEN 691
<b>LÍMITE PLÁSTICO</b>	<b>Norma :</b> NTE INEN 692
<b>Ubicación:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)	<b>Fecha:</b> 13/06/19
<b>N° de muestra:</b> S1	<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción
	<b>Resumen Límites de Consistencia</b>
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>
Peso del recipiente	gr
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr
Peso del recipiente + muestra seca	gr
Contenido de Humedad	%
Número de Golpes	
<b>Lugar de muestreo:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)	
<b>N° de ensayo:</b> Repetición 1	
<b>Número de Golpes</b>	<b>Contenido de Humedad (%)</b>
31	54.1
18	57.0
23	56.4
25	55.5

		Límite Líquido			Límite Plástico		Resumen Límites de Consistencia	
# de recipiente	Unidades	D1	D2	2	D2	R3		
Peso del recipiente	gr	30.6	32.7	31.9	31.5	30.6	Límite Líquido	55.5
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	45.7	48.4	46.6	43.8	43.0	Límite Plástico	27.3
Peso del recipiente + muestra seca	gr	40.4	42.7	41.3	41.2	40.3	Índice de Plasticidad	28.1
Contenido de Humedad	%	54.1	57.0	56.4	26.8	27.8		
Número de Golpes		31	18	23	Promedio:	27.3		

**LÍMITE LÍQUIDO**

Contenido de humedad (%)

Número de Golpes

<b>Ubicación:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)		<b>Fecha:</b> 13/06/19		<b>N° de muestra:</b> S2		<b>Ensayo realizado:</b>		Laboratorio de Materiales de construcción	
		<b>Límite Líquido</b>			<b>Límite Plástico</b>		<b>Resumen Límites de Consistencia</b>		
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>	<b>22</b>	<b>18</b>	Límite Líquido		54.8
Peso del recipiente	gr	33.2	32.4	31.7	17.7	17.3	Límite Plástico		29.9
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	51.6	47.8	47.6	29.7	28.3	Índice de Plasticidad		24.9
Peso del recipiente + muestra seca	gr	44.8	42.3	42.1	26.9	25.8			
Contenido de Humedad	%	58.6	55.6	52.9	30.4	29.4			
<b>Número de Golpes</b>		16	23	31	Promedio:	<b>29.9</b>			
<b>Lugar de muestreo:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)									
<b>N° de ensayo:</b> Repetición 2									
<b>Número de Golpes</b>	<b>Contenido de Humedad (%)</b>								
16	58.6								
23	55.6								
31	52.9								
25	54.8								

### LÍMITE LÍQUIDO

Número de Golpes	Contenido de humedad (%)
16	58.6
23	55.6
31	52.9

<b>Ubicación:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)		<b>Fecha:</b> 13/06/19		<b>N° de muestra:</b> S3		<b>Ensayo realizado:</b>		Laboratorio de Materiales de construcción	
		<b>Límite Líquido</b>			<b>Límite Plástico</b>		<b>Resumen Límites de Consistencia</b>		
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>41</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>15</b>	<b>34</b>	Límite Líquido		54.9
Peso del recipiente	gr	30.5	32.5	31.9	17.5	17.4	Límite Plástico		28.7
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	46.8	44.6	45.7	29.3	28.9	Índice de Plasticidad		26.1
Peso del recipiente + muestra seca	gr	41.1	40.3	40.7	26.7	26.3			
Contenido de Humedad	%	53.8	55.1	56.8	28.3	29.2			
<b>Número de Golpes</b>		<b>31</b>	<b>23</b>	<b>18</b>	Promedio:	<b>28.7</b>			
<b>Lugar de muestreo:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)									
<b>N° de ensayo:</b> Repetición 3									
<b>Número de Golpes</b>	<b>Contenido de Humedad (%)</b>								
31	53.8								
23	55.1								
18	56.8								
25	54.9								

Número de Golpes	Contenido de Humedad (%)
31	53.8
23	55.1
18	56.8
25	54.9

### LÍMITE LÍQUIDO

Número de Golpes	Contenido de humedad (%)
31	53.8
23	55.1
18	56.8

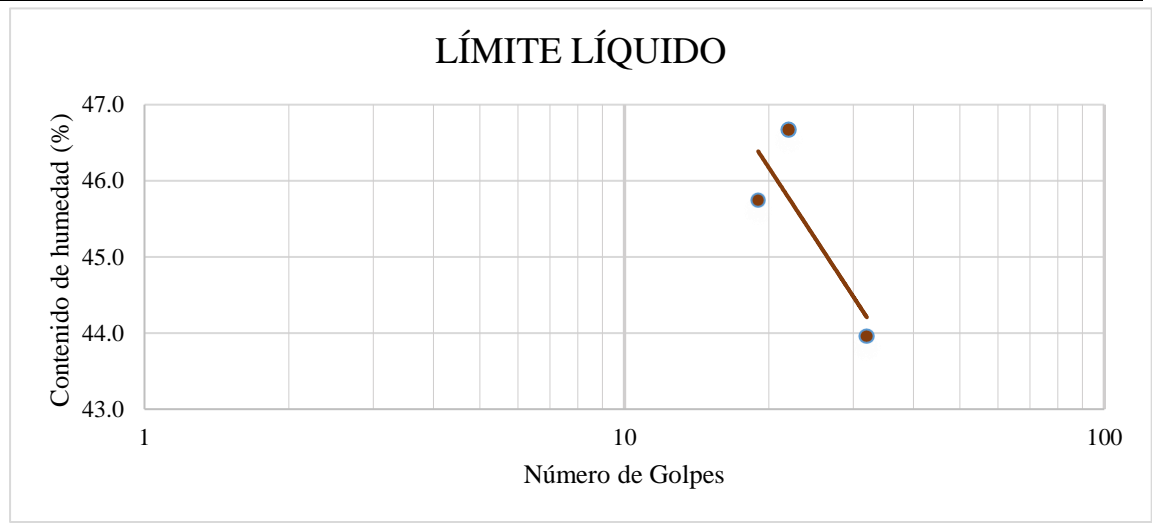
**Proyecto :** "Estudio de las propiedades físico-mecánicas de arcillas existentes en el cantón Gonzanamá como material impermeabilizante en pequeños embalses de uso agrícola"  
**Tesista :** Ismael González  
**Director de Tesis :** Ing. María del Cisne Veintimilla

**Ensayo :** LÍMITES DE CONSISTENCIA  
**LÍMITE LÍQUIDO** Norma : NTE INEN 691  
**LÍMITE PLÁSTICO** Norma : NTE INEN 692

**Ubicación:** Salida de Sunamanga (H)      **Fecha:** 20/06/19      **N° de muestra:** H1      **Ensayo realizado:** Laboratorio de Materiales de construcción

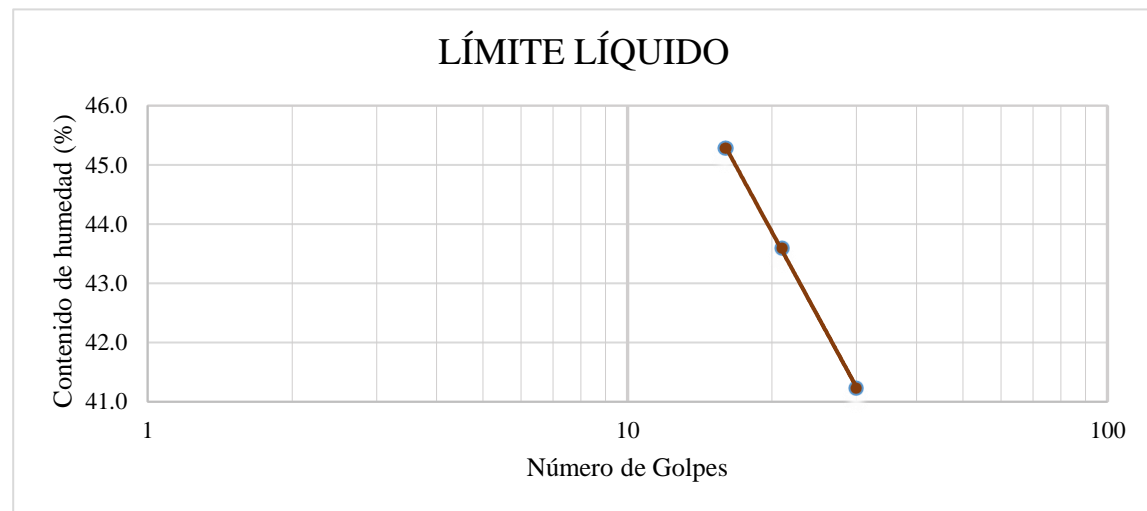
		Límite Líquido			Límite Plástico		Resumen Límites de Consistencia	
# de recipiente	Unidades	D5	D3	D4	D4	D3		
Peso del recipiente	gr	31.7	33.2	32.4	32.4	33.2	Límite Líquido	45.2
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	44.8	46.9	45.6	45	43.1	Límite Plástico	28.1
Peso del recipiente + muestra seca	gr	40.8	42.6	41.4	42.4	40.8	Índice de Plasticidad	17.1
Contenido de Humedad	%	44.0	45.7	46.7	26.0	30.3		
Número de Golpes		32	19	22	Promedio:	28.1		

<b>Lugar de muestreo:</b>	Salida de Sunamanga (H)
<b>N° de ensayo:</b>	Repetición 1
<b>Número de Golpes</b>	<b>Contenido de Humedad (%)</b>
32	44.0
19	45.7
22	46.7
25	45.2



<b>Ubicación:</b> Salida de Sunamanga (H)		<b>Fecha:</b> 20/06/19		<b>N° de muestra:</b> H2		<b>Ensayo realizado:</b>		Laboratorio de Materiales de construcción	
		<b>Límite Líquido</b>			<b>Límite Plástico</b>		<b>Resumen Límites de Consistencia</b>		
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>3</b>	<b>R3</b>	<b>M3</b>	<b>37</b>	<b>39</b>	Límite Líquido		42.4
Peso del recipiente	gr	31.4	30.6	31.5	33.2	31.9	Límite Plástico		26.6
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	47.5	47.4	46.9	43.2	43.2	Índice de Plasticidad		15.8
Peso del recipiente + muestra seca	gr	42.8	42.3	42.1	41.1	40.9			
Contenido de Humedad	%	41.2	43.6	45.3	26.6	26.7			
<b>Número de Golpes</b>		30	21	16	Promedio:	<b>26.6</b>			

<b>Lugar de muestreo:</b>	Salida de Sunamanga (H)
<b>N° de ensayo:</b>	Repetición 2
<b>Número de Golpes</b>	<b>Contenido de Humedad (%)</b>
30	41.2
21	43.6
16	45.3
25	42.4



<b>Ubicación:</b> Salida de Sunamanga (H)		<b>Fecha:</b> 20/06/19		<b>N° de muestra:</b> H3		<b>Ensayo realizado:</b>		Laboratorio de Materiales de construcción	
		<b>Límite Líquido</b>			<b>Límite Plástico</b>		<b>Resumen Límites de Consistencia</b>		
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>18</b>	<b>33</b>	<b>30</b>	<b>42</b>	<b>3</b>	Límite Líquido		43.2
Peso del recipiente	gr	30.6	33.2	31.5	32.6	31.4	Límite Plástico		26.8
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	45.5	48.6	47.8	42.3	41.1	Índice de Plasticidad		16.4
Peso del recipiente + muestra seca	gr	41.1	43.9	42.7	40.2	39.1			
Contenido de Humedad	%	41.9	43.9	45.5	27.6	26.0			
Número de Golpes		31	22	17	Promedio:	<b>26.8</b>			
<b>Lugar de muestreo:</b> Salida de Sunamanga (H)									
<b>N° de ensayo:</b> Repetición 3									
<b>Número de Golpes</b>	<b>Contenido de Humedad (%)</b>								
31	41.9								
22	43.9								
17	45.5								
25	43.2								

**LÍMITE LÍQUIDO**



### Anexo I4. Compactación

<b>Proyecto :</b>		<i>"Estudio de las propiedades físico-mecánicas de arcillas existentes en el cantón Gonzanamá como material impermeabilizante en pequeños embalses de uso agrícola"</i>			
<b>Tesista :</b>		<i>Ismael González</i>			
<b>Director de Tesis</b>		<i>Ing. María del Cisne Veintimilla</i>			
<b>Ensayo :</b>		Ensayo de Compactación método de Proctor Estándar			
<b>Norma:</b>		AASHTO T99-01/ASTM D 698			
<b>Ubicación:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)		<b>Fecha:</b> 27/06/19		<b>N° de muestra:</b>	
				S1	
				<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción	
<b>Altura interior del cilindro</b>		11.64		<b>Cm</b>	
<b>Diámetro interior del cilindro</b>		10.16		<b>Cm</b>	
<b>Volumen del cilindro</b>		943.7		<b>cm<sup>3</sup></b>	
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Peso del recipiente	gr	17.50	17.00	17.00	17.50
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	53.50	61.00	54.00	61.50
Peso del recipiente + muestra seca	gr	48.40	52.00	44.60	46.90
Contenido de Humedad	%	16.50	25.71	34.06	49.66
Peso del cilindro + base	gr	3417.50	3417.50	3417.50	3417.50
Peso del cilindro + base + muestra	gr	4645.00	4819.50	4992.50	4959.00
Peso muestra húmeda	gr	1227.50	1402.00	1575.00	1541.50
Peso volumétrico húmedo	gr/cm <sup>3</sup>	1.30	1.49	1.67	1.63
Peso volumétrico seco	gr/cm <sup>3</sup>	1.12	1.18	1.24	1.09

#### Curva de Compactación

Contenido de Humedad (%)	Peso específico seco (g/cm <sup>3</sup> )
16.50	1.12
25.71	1.18
34.06	1.24
49.66	1.09

<b>Ubicación:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)		<b>Fecha:</b> 27/06/19		<b>N° de muestra:</b>		S2	<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción
<b>Altura interior del cilindro</b>		11.64		cm			
<b>Diámetro interior del cilindro</b>		10.16		cm			
<b>Volumen del cilindro</b>		943.7		cm³			
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>		
Peso del recipiente	gr	17.00	17.50	17.50	17.50		
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	54.50	53.00	52.00	63.50		
Peso del recipiente + muestra seca	gr	49.80	45.60	43.40	48.50		
Contenido de Humedad	%	14.33	26.33	33.20	48.39		
Peso del cilindro + base	gr	3417.50	3417.50	3417.50	3417.50		
Peso del cilindro + base + muestra	gr	4632.50	4810.00	4990.50	4967.50		
Peso muestra húmeda	gr	1215.00	1392.50	1573.00	1550.00		
Peso volumétrico húmedo	gr/cm³	1.29	1.48	1.67	1.64		
Peso volumétrico seco	gr/cm³	1.13	1.17	1.25	1.11		
<b>Ubicación:</b> Vía antigua a Sacapalca (S)		<b>Fecha:</b> 27/06/19		<b>N° de muestra:</b>		S3	<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>2</b>	<b>D2</b>		
Peso del recipiente	gr	17.00	17.00	17.00	17.50		
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	52.50	69.00	56.00	59.50		
Peso del recipiente + muestra seca	gr	47.00	58.50	45.80	45.30		
Contenido de Humedad	%	18.33	25.30	35.42	51.08		
Peso del cilindro + base	gr	3417.50	3417.50	3417.50	3417.50		
Peso del cilindro + base + muestra	gr	4657.50	4829.00	4994.50	4950.50		
Peso muestra húmeda	gr	1240.00	1411.50	1757.00	1533.00		
Peso volumétrico húmedo	gr/cm³	1.31	1.50	1.67	1.62		
Peso volumétrico seco	gr/cm³	1.11	1.19	1.23	1.08		

<b>Proyecto :</b>		<i>"Estudio de las propiedades físico-mecánicas de arcillas existentes en el cantón Gonzanamá como material impermeabilizante en pequeños embalses de uso agrícola"</i>			
<b>Tesista :</b>		<i>Ismael González</i>			
<b>Director de Tesis</b>		<i>Ing. María del Cisne Veintimilla</i>			
<b>Ensayo :</b>		<b>Ensayo de Compactación método de Proctor Estándar</b>			
<b>Norma:</b>		AASHTO T99-01/ASTM D 698			
<b>Ubicación:</b> Salida de Sunamanga (H)		<b>Fecha:</b> 11/07/19	<b>N° de muestra:</b>		H1
				<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción	
<b>Altura interior del cilindro</b>		11.64	<b>Cm</b>		
<b>Diámetro interior del cilindro</b>		10.16	<b>Cm</b>		
<b>Volumen del cilindro</b>		943.7	<b>cm<sup>3</sup></b>		
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>
Peso del recipiente	gr	32.70	31.40	30.20	33.20
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	89.10	93.50	94.30	110.00
Peso del recipiente + muestra seca	gr	81.70	81.30	78.10	86.60
Contenido de Humedad	%	15.10	24.45	33.82	43.82
Peso del cilindro + base	gr	3417.50	3417.50	3417.50	3417.50
Peso del cilindro + base + muestra	gr	4786.00	4961.50	5086.00	5000.50
Peso muestra húmeda	gr	1368.50	1544.00	1668.50	1583.00
Peso volumétrico húmedo	gr/cm <sup>3</sup>	1.45	1.64	1.77	1.68
Peso volumétrico seco	gr/cm <sup>3</sup>	1.26	1.31	1.32	1.17

### Curva de Compactación

Contenido de humedad (%)	Peso específico seco (g/cm <sup>3</sup> )
15.10	1.26
24.45	1.31
33.82	1.32
43.82	1.17

<b>Ubicación:</b> Salida de Sunamanga (H)		<b>Fecha:</b> 11/07/19		<b>N° de muestra:</b>		H2	<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción
<b>Altura interior del cilindro</b>		11.64		<b>Cm</b>			
<b>Diámetro interior del cilindro</b>		10.16		<b>Cm</b>			
<b>Volumen del cilindro</b>		943.7		<b>cm³</b>			
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>		
Peso del recipiente	gr	33.20	31.90	30.60	30.60		
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	105.60	90.50	91.60	129.10		
Peso del recipiente + muestra seca	gr	96.50	79.40	76.80	98.10		
Contenido de Humedad	%	14.38	23.37	32.03	45.93		
Peso del cilindro + base	gr	3417.50	3417.50	3417.50	3417.50		
Peso del cilindro + base + muestra	gr	4710.00	4934.00	5095.00	4967.50		
Peso muestra húmeda	gr	1292.50	1516.50	1677.50	1550.00		
Peso volumétrico húmedo	gr/cm³	1.37	1.61	1.78	1.64		
Peso volumétrico seco	gr/cm³	1.20	1.30	1.35	1.13		
<b>Ubicación:</b> Salida de Sunamanga (H)		<b>Fecha:</b> 11/07/19		<b>N° de muestra:</b>		H3	<b>Ensayo realizado:</b> Laboratorio de Materiales de construcción
<b># de recipiente</b>	<b>Unidades</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>		
Peso del recipiente	gr	34.00	32.40	33.30	31.90		
Peso del recipiente + muestra húmeda	gr	94.60	106.10	92.80	117.00		
Peso del recipiente + muestra seca	gr	88.00	93.70	79.20	93.40		
Contenido de Humedad	%	12.22	20.23	29.63	38.37		
Peso del cilindro + base	gr	3417.50	3417.50	3417.50	3417.50		
Peso del cilindro + base + muestra	gr	4717.50	4915.00	5061.00	5032.50		
Peso muestra húmeda	gr	1300.00	1497.50	1643.50	1615.00		
Peso volumétrico húmedo	gr/cm³	1.38	1.59	1.74	1.71		
Peso volumétrico seco	gr/cm³	1.23	1.32	1.34	1.24		