

**ESTUDIO DE LA TÉCNICA DE SUELO-CEMENTO PARA LA ESTABILIZACIÓN  
DE VÍAS Terciarias EN COLOMBIA QUE POSEAN  
UN ALTO CONTENIDO DE CAOLÍN**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**JONATAN RODRIGO GARCÍA TORO**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D. C.,  
DE 2019**

**ESTUDIO DE LA TÉCNICA DE SUELO-CEMETO PARA LA ESTABILIZACIÓN  
DE VÍAS TERCIARIAS EN COLOMBIA QUE POSEAN  
UN ALTO CONTENIDO DE CAOLÍN**

**JONATAN RODRIGO GARCÍA TORO**

**Proyecto de grado para optar por  
el título de ingeniero civil**

**Director:  
MSc David Fernando Bernal Acosta**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ, D. C, DE 2019**



## Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:  
**Atribución-NoComercial 2.5 Colombia (CC BY-NC 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:  
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/co/>

### Usted es libre de:



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra  
hacer obras derivadas

### Bajo las condiciones siguientes:



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.

Nota de Aceptación:

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Presidente del Jurado

---

Presidente del Jurado

Bogotá D.C. Abril de 2019

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	12
1. GENERALIDADES .....	13
1.2    1.1 ANTECEDENTES.....	13
1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	14
1.2.1. Descripción del problema .....	14
1.2.2. Formulación del problema .....	15
2. OBJETIVOS .....	16
2.2    Objetivo general .....	16
2.3    Objetivos específicos.....	16
3. JUSTIFICACIÓN .....	16
4. DELIMITACIÓN .....	17
5. ESTADO DEL ARTE .....	18
6. MARCO TEÓRICO.....	20
6.2    Estabilización de suelos con cemento .....	20
7. MARCO CONCEPTUAL.....	22
7.2    Suelo.....	22
7.3    Tipos de suelo .....	22
7.3.1. Suelos arcillosos blandos compresibles y suelos orgánicos .....	22
7.3.2. Suelos volcánicos.....	23
7.3.3. Suelos expansivos.....	23
7.3.4. Principales propiedades de los suelos.....	23
7.4    Cemento.....	24
7.4.1. Tipos de cemento.....	24
7.5    Vías.....	24
7.5.1. Tipos de vías .....	24
7.6    Pavimento .....	25
7.6.1. Tipos de pavimentos .....	25
7.7    Subrasante .....	26
7.8    Subbase granular .....	26
7.9    Base granular .....	26
7.10    Carpeta de rodadura.....	26
7.11    El tránsito .....	27
7.12    Cargas monotónicas.....	27

7.13	Estabilización de suelos .....	27
7.14	Estabilización de suelos con la adición de cemento .....	27
7.15	Factores que afectan la mezcla de suelo cemento .....	27
7.16	Estabilización de suelos con la adición de Cal.....	28
7.17	Estabilización de suelos con asfalto .....	28
7.18	Estabilización con ácido fosfórico .....	29
7.19	Estabilización con cloruro de sodio.....	29
7.20	Estabilización con soda cáustica .....	29
7.21	Uso de polímeros y resinas .....	29
7.22	Estabilización electroquímica con aceite sulfonado .....	29
8.	METODOLOGÍA.....	31
8.2	Recopilación de la información .....	31
8.3	Elección del tipo de suelo .....	32
8.4	Ensayos de caracterización física del suelo arcilloso.....	32
8.4.1.	Límites de Atterberg .....	32
8.4.2.	Gravedad específica.....	35
8.4.3.	Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos (Hidrometría)	38
8.5	Relaciones de humedad- Peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación).....	42
8.6	Diseño de mezcla .....	46
8.7	Elaboración de cuerpos de prueba .....	46
8.8	Ensayos monotónicos de resistencia.....	48
8.8.1.	Resistencia a la compresión inconfiada .....	48
8.8.2.	Resistencia a tracción indirecta .....	50
9.	RESULTADOS .....	51
9.2	Caracterización Física del suelo de estudio - Caolín.....	51
9.2.1.	Granulometría por hidrómetro.....	51
9.2.2.	Gravedad Específica .....	51
9.2.3.	Límites de Atterberg .....	52
9.3	Caracterización Mecánica del suelo de estudio .....	53
9.3.1.	Ensayo Compactación Proctor normal.....	53
9.3.2.	Ensayos de compresión inconfiada .....	54
9.3.3.	Ensayo de Tracción Indirecta .....	55
9.4	Características de la mezcla Suelo – Cemento.....	56
9.4.1.	Límites de atterberg.....	56

9.5	Características Mecánica de la mezcla Suelo – Cemento .....	58
9.5.1.	Proctor normal.....	58
9.5.2.	Ensayo de compresión inconfiada .....	58
9.5.2.1.	Según el porcentaje de cemento .....	58
9.5.2.2.	Según los días de curado .....	60
9.5.2.3.	En estado de saturación .....	62
9.5.2.4.	Envoltentes de falla .....	63
9.5.3.	Ensayos de resistencia a la tracción indirecta .....	64
9.5.3.1.	Según el porcentaje de cemento .....	64
9.5.3.2.	Según los días de curado .....	66
9.5.3.3.	En estado de saturación .....	68
9.5.3.4.	Envoltentes de falla .....	69
10.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	71
11.	CONCLUSIONES .....	73
12.	RECOMENDACIONES .....	74
13.	BIBLIOGRAFÍA .....	75

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Trabajos relacionados.....	18
Tabla 2. Identificación de suelos blandos .....	22
Tabla 3. Ensayos de caracterización de suelos arcillosos.....	32
Tabla 4. Valores de K para el cálculo del diámetro de las partículas.....	39
Tabla 5. Valores de profundidad efectiva, basados en hidrómetro y cilindro de tamaños especificados.....	39
Tabla 6. Diseño de mezcla para 1 cilindro .....	46
Tabla 7. Cronograma de cilindros .....	47
Tabla 8. Ensayos para determinar la resistencia de cuerpos de prueba. ....	48
Tabla 9. Datos de ensayo granulométrico por hidrómetro 152-H .....	51
Tabla 10. Datos para determinar la gravedad específica del material .....	51



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estado de la red vial no pavimentada .....	14
Figura 2. Estado de la red vial pavimentada. ....	15
Figura 3. Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento .....	20
Figura 4. Clasificación de los vehículos en Colombia .....	21
Figura 5. Metodología llevada a cabo .....	31
Figura 6. Cazuela de Casagrande .....	34
Figura 7. Separación de muestra con ranurador .....	34
Figura 8. Muestras para límites de Atterberg .....	35
Figura 9. Picnómetro de 500 ml .....	37
Figura 10. Bomba de vacíos .....	37
Figura 11. Hidrómetro 152 H .....	38
Figura 12. Beaker con muestra en dispersión .....	41
Figura 13. Probetas con agua y suelo en dispersión.....	41
Figura 14. Medición de profundidad con el hidrómetro.....	42
Figura 15. Molde de 4" más collarín.....	45
Figura 16. Material seco al horno.....	45
Figura 17. Medidas del molde.....	46
Figura 18. Toma de diámetro y altura a cilindros .....	49
Figura 19. Falla de cilindros a compresión inconfiada.....	50
Figura 20. Falla de cilindros a tracción indirecta .....	50

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva de fluidez para mezcla con 0% de cemento .....	53
Gráfica 2. Humedad óptima para mezcla con 0% de cemento.....	54
Gráfica 3. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 0% de cemento - compresión .....	55
Gráfica 4. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 0% de cemento – tracción .....	55
Gráfica 5. Curva de fluidez para mezcla con 4% de cemento .....	56
Gráfica 6. Curva de fluidez para mezcla con 8% de cemento .....	56
Gráfica 7. Curva de fluidez para mezcla con 10% de cemento .....	57
Gráfica 8. Curva de fluidez para mezcla con 12% de cemento .....	57
Gráfica 9. Humedad óptima para mezcla con 4% de cemento.....	58
Gráfica 10. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 12% de cemento - compresión ..	59
Gráfica 11. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 10% de cemento - compresión ..	59
Gráfica 12. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 8% de cemento - compresión ....	60
Gráfica 13. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 4% de cemento - compresión ....	60
Gráfica 14. Esfuerzo Vs Deformación a los 28 días de curado - compresión .....	61
Gráfica 15. Esfuerzo Vs Deformación a los 14 días de curado - compresión .....	61
Gráfica 16. Esfuerzo Vs Deformación a los 7 días de curado - compresión .....	62
Gráfica 17. Esfuerzo Vs Deformación en estado de saturación - compresión .....	62
Gráfica 18. Envolvente para 28 días de curado – Compresión .....	63
Gráfica 19. Envolvente para 14 días de curado – Compresión .....	63
Gráfica 20. Envolvente para 7 días de curado – Compresión .....	64
Gráfica 21. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 12% de cemento – tracción .....	64
Gráfica 22. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 10% de cemento – tracción .....	65
Gráfica 23. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 8% de cemento – tracción .....	65
Gráfica 24. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 4% de cemento – tracción .....	66
Gráfica 25. Esfuerzo Vs Deformación a los 28 días de curado – tracción .....	67
Gráfica 26. Esfuerzo Vs Deformación a los 14 días de curado – tracción .....	67
Gráfica 27. Esfuerzo Vs Deformación a los 7 días de curado – tracción .....	68
Gráfica 28. Esfuerzo Vs Deformación en estado de saturación – tracción .....	68
Gráfica 29. Envolvente para 28 días de curado – Tracción.....	69
Gráfica 30. Envolvente para 14 días de curado – Tracción.....	69
Gráfica 31. Envolvente para 7 días de curado – Tracción.....	70

## RESUMEN

Los pavimentos en Colombia y en gran parte del mundo están compuestos por una serie de capas de material granular que son las encargadas de absorber y disipar las cargas generadas por el tránsito. Dichas capas son la sub-rasante, la sub-base, la base y la capa de rodadura, siendo esta última la encargada de recibir directamente el flujo vehicular.

Una de las técnicas empleadas para la estabilización del suelo consiste en la adición de cemento al terreno natural, mezclándolo con agua para luego llevar a cabo una correcta compactación con la finalidad de mejorar las características físicas del terreno aumentando su resistencia, durabilidad e impermeabilidad.

En este proyecto investigativo se busca estudiar la técnica de mezcla suelo-cemento y su comportamiento mecánico en un tipo de arcilla, para esto se emplea el caolín como suelo tipo, siendo este un agregado mineral muy estable proveniente de la caolinita, además se adicionan diferentes porcentajes de cemento que varían desde el 0% hasta el 12% de peso en masa.

Se busca evaluar la resistencia de la mezcla, para poder lograr dicho objetivo se funden cuerpos de prueba los cuales son sometidos a ensayos de resistencia a la compresión y tensión indirecta por compresión. Se tienen en cuenta tiempos de curado de 7, 14 y 28 días para determinar el aumento o disminución de la rigidez en dichos periodos.

A través de esta investigación se busca determinar qué incidencia tiene el cemento en los suelos blandos para poder viabilizar dicha técnica en los suelos finos inclusive llegar a sustituir la capa de sub-base en el pavimento si se alcanzan resistencias altas.

**Palabras clave:** Suelo-cemento, caolín, pavimento, estabilización.

## INTRODUCCIÓN

La red viaria en Colombia está clasificada en vías primarias, secundarias y terciarias, éstas comunican gran parte del país, atravesando ciudades, municipios o veredas. En los últimos años se han venido desarrollando proyectos para la ampliación y mejoramiento de la red vial Según el INVIAS<sup>1</sup> para el segundo semestre de 2018 el país contaba con un 84.87% de vías pavimentada, además de esto en el último boletín expedido el 31 de diciembre del mismo año por el INVIAS se adelantaban planes de importancia estratégica para la conectividad vial nacional, los cuales se denominan “vías para la equidad”<sup>2</sup>, algunos de los proyectos que lo componen son: El cruce- Pajarito (Casanare) terminado el 25 de diciembre 2018, Quibdó- Totoró La Plata (Cauca) En construcción, Transversal central del pacífico (Chocó) con un 5% del proyecto ejecutado, Transversal Medellín (Quibdó sector 1) con 10,2 % ejecutado, entre otros.

En las veredas o zonas alejadas de la ciudad las vías pavimentadas no son muy comunes, ya que para ello se requiere una gran inversión, la cual como se mencionaba anteriormente va destinada a la mejora de carreteras primarias y secundarias, afortunadamente existen algunas organizaciones que apoyan el desarrollo del país, ya que “en Colombia se llevó a cabo un programa , financiado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) y desarrollado en los departamentos de Caquetá, Meta, Tolima y Cauca entre 2011 y 2017, el cual estuvo orientado a mejorar la infraestructura vial veredal”<sup>3</sup>.

Las metodologías empleadas en la mejora de las vías terciarias van desde la construcción de placa huella hasta la estabilización y compactación del terreno a través de la adición de cal, cemento o diferentes aglomerantes. La técnica del suelo cemento es muy aplicada en este tipo de casos, debido a que la granulometría de los terrenos veredales normalmente es muy uniforme, es decir, contiene todos los tamaños de partículas lo cual facilita el fraguado y adherencia del cemento.

En el presente proyecto se abordó la técnica de mezcla suelo-cemento con la utilización del caolín el cual es un suelo que más del 90% de sus partículas son pasantes del tamiz N° 200, ya que dicha técnica tiene poca exploración para suelos finos, con esto se buscó definir su efectividad y determinar la posible implementación en zonas del país donde el terreno cuente con suelos de similares condiciones. Para tal fin, se realizó el diseño de la mezcla suelo-cemento y se evaluó en laboratorio las características físicas y mecánicas, por medio de ensayos mecánicos de carga monotónica, tales como: compresión confinada y tracción indirecta con el propósito de identificar los incrementos de resistencia a compresión simple y resistencia a la tracción por compresión diametral.

---

<sup>1</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Estado de la Red Vial. [En línea] 2018  
<<https://www.invias.gov.co/index.php/component/content/article/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>>  
[citado 10 de septiembre de 2018]

<sup>2</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Programa de obra pública (Red primaria) [En línea]  
<<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/seguimiento-a-proyectos-2016/8845-red-primaria-31-de-diciembre-2018/file>> [citado 18 de abril de 2019]

<sup>3</sup> MARTÍNEZ, Eduardo OLIVEROS: Esquema de mantenimiento y mejoramiento en vías terciarias: Colombia responde. Bogotá D.C. 2019. Universidad de los Andes. Revista de ingeniería

## 1. GENERALIDADES

### 1.2 1.1 ANTECEDENTES

A mediados del siglo XX, en el mundo se ha venido implementando la estabilización del suelo con cemento exitosamente en varios países, ya que gracias a su bajo costo de construcción y mantenimiento se puede utilizar en varios campos de la ingeniería como pavimentos, bases para estructuras en concreto, geotecnia, entre otros. Según el manual de estabilización de suelos con cal o cemento<sup>4</sup> la reglamentación ambiental ha restringido el uso desmedido de materiales granulares que estén fuera de la traza del proyecto, además de la necesidad por tener cimientos firmes que soporten un tráfico pesado, por estas razones se ha venido implementando el mejoramiento de los suelos in situ, proceso que resulta muy eficiente gracias a la maquinaria que permite agilizar los procesos de mezcla del suelo con el aglomerante.

En el país se ha recurrido al mejoramiento del suelo con cemento desde la década de los sesenta, llevado a cabo con un proceso no industrializado el cual no incluye ningún tipo de aditivo y se realiza con maquinaria de bajas dimensiones. El principal objetivo es aumentar la calidad y condicionar el terreno de vías terciarias, para el mejoramiento de la movilidad rural. En el departamento de Antioquia en el municipio de Rionegro la concretera Argos<sup>5</sup> evaluó múltiples alternativas y se llegó a la conclusión de que la estabilización con la metodología suelo-cemento era la mejor opción en cuanto a resistencia, duración y sostenibilidad, por esto en el 2016 se inició la recuperación de 144 kilómetros de vías rurales, lo cual es una gran cobertura que se pudo llevar a cabo por sus disminuidos costos y bajo requerimiento de maquinaria e insumos.

En la actualidad el proceso de mejoramiento de suelos con cemento en Colombia se ha normalizado con ayuda de varias entidades como el INVIAS con el artículo 350 de las especificaciones generales de construcción de carreteras<sup>6</sup> en el cual establece el procedimiento constructivo y las características que debe tener el suelo antes de llevar a cabo el proceso de estabilización. También, el Departamento Nacional de Planeación (DNP)<sup>7</sup> creó en el 2018 un proyecto tipo para el mejoramiento de 1km de vía terciaria en el cual explica el procedimiento que se debe seguir desde la toma de muestras en campo para determinar el diseño de mezcla, hasta la compactación y curado de la vía estabilizada.

---

<sup>4</sup> ANCADE, ANTER, IECA: Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Madrid, 2013. Instituto español del cemento y sus aplicaciones. ISSN:978-84-89702-23-3

<sup>5</sup> ARGOS: Con suelo cemento, Rionegro recupera 144 km de vías rurales. 2017. 360 grados en concreto.

<sup>6</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Especificaciones generales de construcción de carreteras. 2013

<sup>7</sup> DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN: Mejoramiento de vías terciarias-Vías de tercer orden. Bogotá, Colombia. 2018.

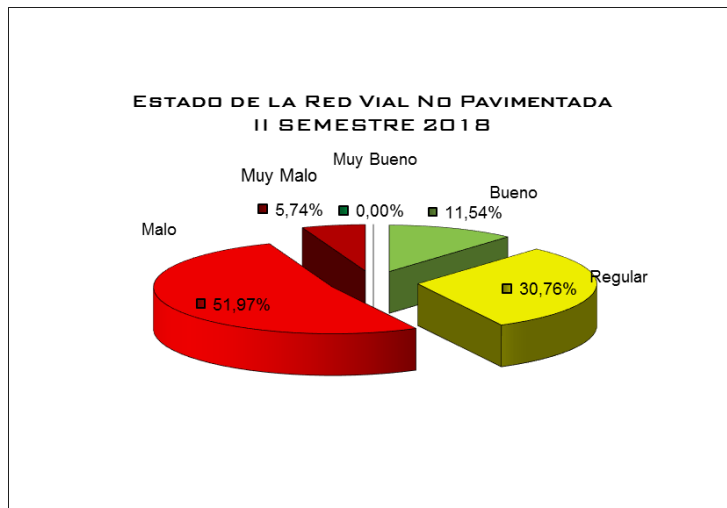
## 1.2. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.2.1. Descripción del problema

En Colombia, según el informe de desarrollo rural del PNUD<sup>8</sup>, el 25% de la población vive en zona rural. El desarrollo de dicha población agrícola está fundamentado en la venta de sus productos a diferentes mercados nacionales, para ello requieren de una infraestructura vial que permita realizar el traslado desde la zona de cultivo hasta los puntos de comercialización.

Según el último boletín sobre estado de la red vial publicado en el segundo semestre de 2018 por el INVIAS<sup>9</sup>, del 100% de vías no pavimentadas, el 11.54 % de ellas se encuentran en buen estado y el 51.97% en mal estado (ver Figura 1). Con estos porcentajes se puede afirmar que en Colombia aún es necesaria una inversión muy grande para lograr que todos los habitantes se puedan movilizar con comodidad y sin dificultad alguna de un lugar a otro.

Figura 1. Estado de la red vial no pavimentada

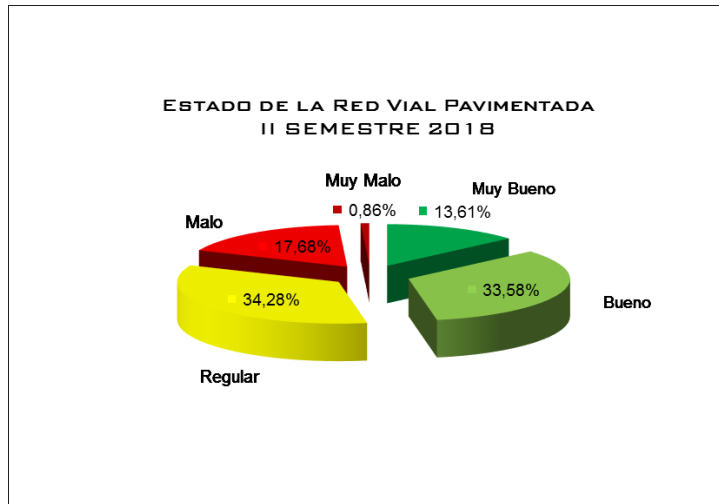


Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Estado de la Red Vial.

<sup>8</sup> PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO (PNDU): Objetivos de desarrollo del milenio. 2018

<sup>9</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Programa de obra pública (Red primaria) [En línea] <<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/seguimiento-a-proyectos-2016/8845-red-primaria-31-de-diciembre-2018/file>> [citado 18 de abril de 2019]

**Figura 2. Estado de la red vial pavimentada.**



Fuente. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Estado de la Red Vial.

### 1.2.2. Formulación del problema

La utilización de la técnica suelo-cemento para la estabilización de carreteras ofrece optimización en los procesos constructivos, ya que al conseguir una alta resistencia del suelo se pueden reducir las capas de base y sub-base para la construcción de una futura vía, e inclusive si es una vía terciaria basta con realizar el mejoramiento y dejar el suelo en afirmado. También, al mezclar los materiales presentes en el suelo con cemento disminuye su permeabilidad y la erosión trayendo consigo un aumento en la durabilidad. Dicha estabilización para vías terciarias se lleva a cabo con los materiales granulares del sitio, además de cemento y maquinaria, esto reduce la explotación de canteras beneficiando al medio ambiente, disminuye los costos de producción, favoreciendo al constructor y brinda a las familias rurales un camino apto para transportarse.<sup>10</sup>

Con lo anteriormente dicho se evidencia que son muchos los beneficios que trae la utilización de la técnica suelo-cemento, por esto es de vital importancia su estudio y análisis, determinando si dicha técnica también es aplicable para suelos finos tipo caolín, ya que en Colombia se tiene una alta presencia de ellos en zonas veredales.

¿Cuál es el incremento de resistencia a cargas monotónicas de un suelo fino tipo caolín al ser mezclado con altos contenidos de cemento?

<sup>10</sup> ARGOS: Con suelo cemento, Rionegro recupera 144 km de vías rurales. 2017. 360 grados en concreto.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.2 Objetivo general**

Estudiar el comportamiento físico-mecánico de una mezcla suelo-cemento en laboratorio, por medio de ensayos de respuesta a la carga monotónica con el fin de establecer los valores de resistencia para un suelo fino tipo caolín y su posible implementación en vías terciarias del país de similar composición.

### **2.3 Objetivos específicos**

- ✓ Ejecutar ensayos de laboratorio para establecer las características físicas de un suelo blando.
- ✓ Determinar el contenido óptimo de agua para lograr la máxima densidad de un suelo convencional y de una mezcla suelo-cemento.
- ✓ Evaluar el porcentaje de cemento en una mezcla de suelo para atender los mayores valores de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción.
- ✓ Establecer una curva de tendencia que describa el comportamiento ante las cargas tanto a tracción como a compresión del material de estudio.

## **3. JUSTIFICACIÓN**

En la presente investigación se analizó la importancia que tiene el estudio de la técnica de suelo cemento en un suelo fino tipo caolín, ya que esta es la composición de muchos terrenos en el país por estar situado en una región tropical. Además de esto cabe resaltar que la estabilización de suelos arcillosos generalmente se realiza con cal, debido a su capacidad de impermeabilización, por esto se quiere determinar la incidencia que tienen los diferentes porcentajes de cemento en la resistencia mecánica de la muestra.

La justificación de esta investigación está fundamentada en poder generar una alternativa de desarrollo vial en zonas rurales a través de la implementación de la técnica de suelo cemento en suelos de tipo blando. Esta alternativa trae beneficios representados en menores tiempos de viaje, acceso de vehículos de mayor capacidad, mayor acceso de los pobladores a servicios que puedan suplir sus necesidades, y en general menores costos de transporte lo cual puede mejorar la calidad de vida de los campesinos, agilizando la distribución de los productos y dinamizando la economía regional.

Por otra parte, el estudio de la resistencia del caolín sirvió para establecer una envolvente que describe el comportamiento del material ante la acción de cargas monotónicas, obteniendo el punto máximo de resistencia con la variación de los porcentajes de cemento. Por lo anteriormente dicho se puede afirmar que el presente proyecto trajo consigo un beneficio a la investigación en el área de pavimentos, ya que aportó conocimiento en cuanto a la estabilización de suelos de tipo arcilloso.



#### 4. DELIMITACIÓN

El desarrollo del presente proyecto se llevó a cabo en 16 semanas, en la cuales se organizó de manera precisa las actividades a realizar, iniciando con la búsqueda de la información la cual fue crucial para determinar el tipo de suelos, los porcentajes empleados en la mezcla y la cantidad de ensayos de laboratorio necesarios. Seguido de esto se inició con la caracterización del suelo para la posterior elaboración de las briquetas y finalmente someterlas a ensayos de resistencia a la carga monotónica. Cabe resaltar que la investigación solo abarca porcentajes de cemento que van desde el 0% hasta el 12% y que el suelo de estudio correspondió a una arcilla de tipo caolín, estos factores fueron limitantes al momento de obtener y presentar los resultados.

En cuanto a la caracterización de la muestra fue necesario emplear los laboratorios de mecánica de suelos y mecánica de sólidos en los cuales se contó con los equipos necesarios para llevar a cabo los ensayos como lo son la cazuela de Casagrande para el límite líquido, el horno para el secado de las muestras, la bomba de vacíos para la gravedad específica, los moldes para el proctor simple y algunas herramientas en general. La máquina universal de ensayos MTS fue de gran importancia ya que allí se midió la resistencia de los especímenes tanto a compresión confinada como a tracción indirecta.

Para la elaboración de las briquetas se tuvieron en cuenta diferentes porcentajes de cemento y suelo fino adecuados para lograr la máxima resistencia ante cargas de tránsito permanentes, para ello se construyeron un total de 120 briquetas, en las cuales se garantizaron tiempos de curado de 7, 14 y 28 días, posteriormente se sometieron a ensayos monotónicos de compresión confinada y tracción indirecta, teniendo un margen de error de 3 cilindros, donde el resultado de la resistencia fue el promedio de ellos. Sumado a lo anterior se midió la resistencia de los especímenes llevados un estado de saturación.

Los alcances corresponden a la determinación de la resistencia mecánica a compresión y a tracción de un suelo fino arcilloso tipo caolín para la obtención de envoltantes que permitieran definir una proyección del comportamiento de dicho material, siendo esta una base para la posible implementación de la técnica de suelo cemento en vías terciarias que tengan una composición similar al suelo de estudio.

## 5. ESTADO DEL ARTE

En la siguiente tabla (ver Tabla 1) se nombran algunos de los trabajos, tesis e investigaciones que fueron relevantes en el desarrollo del presente proyecto investigativo.

**Tabla 1. Trabajos relacionados.**

<b>Autores de investigación</b>	<b>Título del trabajo</b>	<b>Resumen</b>	<b>Fecha de publicación, institución y ciudad</b>
Portland Cement Association (Portland Cement Association, 2001)	Suelo-cemento inspector manual	Manual creado para explicar detalladamente el procedimiento que se debe llevar a cabo para la construcción de una vía utilizando la mezcla suelo-cemento.	2001, Portland Cement Association. Orchard Road, Skokie, Illinois
Younes Amini, Amir Hamidi* (Younes Amini, 2014)	Triaxial shear behavior of a cement-treated sand/gravel mixture	Se realiza un análisis del comportamiento de un suelo cementado de arena y grava, para ello se emplea el ensayo triaxial confinado e inconfinado	16 September 2014, School of Engineering, Kharazmi University, Tehran, 15614, Iran
S. Sasaniana, T.A. Newson (S. Sasaniana, 2014)	Basic parameters governing the behaviour of cement-treated clays	Se analiza el comportamiento mecánico de las arcillas ante la adición de cemento Portland y se relaciona con parámetros como la mineralogía, límite de liquidez e índice de plasticidad de cada una de ellas	2014, The University of Western Ontario, London, ON, Canada
Murad Abu-Farsakh, Sanjay Dhakal, Qiming Chen (Murad Abu-Farsakh, 2015)	Laboratory characterization of cementitious treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading	Se define el mejor método de estabilización para 5 diferentes tipos de suelo de baja resistencia dependiendo de sus características físicas.	2015, Louisiana Transportation Research Center, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70808, United States
Instituto del Cemento Portland Argentino (INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO, 2015)	Construcción de bases y subbases de suelo cemento	Se busca dar a conocer y transferir experiencias, compartidas con empresas constructoras, vialidades, consultoras, proveedores de equipos, etc., para mejorar el uso de la técnica suelo cemento en Argentina.	2015, Departamento técnico de pavimentos. Argentina.
Daniel Ribeiro, Raquel Néri, Rafaela Cardoso (Daniel Ribeiro, 2016)	Influence of Water Content in the UCS of Soil-Cement Mixtures for Different Cement Dosages	En esta investigación se mide la influencia que tiene la variación de la cantidad de agua en una mezcla de suelo cemento, aplicando pruebas de resistencia a la compresión inconfinada y teniendo tiempos diferentes de curado	2016, Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal
Sara Rios, Catarina Ramos, António Viana da Fonseca, Nuno Cruz, Carlos Rodrigues (Sara Rios, 2016)	Colombian Soil Stabilized with Geopolymers for Low Cost Roads	Se utilizan algunos geopolímeros y cemento para estabilizar un suelo de composición arenoso limoso de la región colombiana. Se busca una solución económica para solventar la problemática de las vías sin pavimentar.	2016, Faculty of Engineering (FEUP), Portugal. Mota-Engil – Engenharia e Construção

**Continuación de la Tabla 1**

<b>Autores de investigación</b>	<b>Título del trabajo</b>	<b>Resumen</b>	<b>Fecha de publicación, institución y ciudad</b>
Nilo Cesar Consolia, Pedro Miguel Vaz Ferreira, Chao-Sheng Tang, Sérgio Filipe Veloso Marquesa, Lucas Festugatoa, Marina Bellaver Corte (Nilo Cesar Consolia, 2016)	A unique relationship determining strength of silty/clayey soils – Portland cement mixes	Se busca una relación entre la resistencia de varios suelos limosos/arcillosos estabilizados con cemento, mediante la variación de la humedad y porosidad del material	2016, Department of Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil. Department of Civil Environmental and Geomatic Engineering, University College London
Joaquim Tinoco, António Alberto, Paulo da Venda, António Gomes Correia <sup>1</sup> , Luís Lemos (Joaquim Tinoco, 2016)	A Data-Driven Approach for qu Prediction of Laboratory Soil-Cement Mixtures	Se realiza un estudio de numerosas investigaciones sobre la resistencia (qu) de una mezcla de suelo cemento para lograr crear una predicción de cómo será el comportamiento de estas mezclas ante la variación de algún parámetro físico	2016, University of Minho, Campus de Azurém, Guimarães, Portugal University of Coimbra, Coimbra, Portugal
Rafaela Cardoso, Daniel Ribeiro, Raquel Néri (Rafaela Cardoso, 2017)	Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures	Se estudia el aumento en la resistencia de una mezcla de arena con cemento, para ello se realizan ensayos de compresión en diferentes tiempos de curado	2017, Instituto Superior Técnico, University of Lisbon, Lisbon, Portugal
Manuel Gerardo Parra Gómez (Gómez, 2018)	Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante	Se evalúa la resistencia ante cargas monotónicas de compresión inconfiada en un suelo de tipo caolínico a través de la adición de cal y ceniza volante en diferentes porcentajes	2018, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C.

**Fuente. Autor.**

## 6. MARCO TEÓRICO

### 6.2 Estabilización de suelos con cemento

La mezcla de suelo con cemento es considerada como una técnica de estabilización de suelos granulares que conlleva un proceso de hidratación en el cual se desarrolla una red de enlaces entre las partículas del suelo, esto acarrea un aumento en la capacidad portante y un notable incremento en la resistencia mecánica del terreno. Dicha técnica se encuentra establecida en la normatividad del INVIAS y del IDU con en el artículo 350 de las especificaciones generales de construcción de carreteras.

Como toda técnica de mejoramiento y estabilización existen particularidades y limitantes que controlan la eficiencia del procedimiento, dichas restricciones se incluyen en la normatividad del instituto nacional de carreteras INVIAS<sup>11</sup>. Para la implementación de la técnica del suelo cemento es indispensable garantizar algunas condiciones iniciales del material a estabilizar ya que este no debe poseer un contenido de materia orgánica superior al 2% porque esto provocaría una interrupción en el proceso aglutinante del cemento retrasando el fraguado; otro factor que se debe garantizar para la correcta aplicación de la técnica es la granulometría (ver Figura 3) indicada el artículo 350 de las especificaciones generales de construcción de carreteras INVIAS 2013<sup>12</sup>.

**Figura 3. Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento**

TIPO DE GRADACIÓN		TAMIZ (mm / U.S. Standard)								
		50.0	37.5	25.0	19.0	9.5	4.75	2.00	0.425	0.075
		2"	1 1/2"	1"	3/4"	3/8"	No. 4	No. 10	No. 40	No. 200
		% PASA								
Tipo A	A-50	100	70-100	60-100	50-90	40-80	30-70	20-55	10-40	2-20
	A-25	-	-	100	70-100	60-100	50-85	40-70	20-45	2-25
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)		0%	7%				6%			3%
Tipo B	B-50-1	100	-	-	-	-	40-80	-	-	2-35
	B-50-2	100	-	-	-	-	60-100	-	-	0-50
Tolerancias en producción sobre la fórmula de trabajo (±)		0%	-				8%			5%

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Normas de ensayo de materiales para carreteras. Bogotá D.C, 2013.













<sup>11</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS): Normas de ensayo de materiales para carreteras. Bogotá D.C, 2013.

<sup>12</sup> INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Estado de la Red Vial. [En línea] <<https://www.invias.gov.co/index.php/component/content/article/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>> [citado 10 de septiembre de 2018]

El proceso de estabilización comienza con la caracterización del suelo de estudio a través de apiques en el terreno los cuales se recomienda realizar cada 250 m, teniendo una profundidad de 1.5 m, la muestra se lleva al laboratorio para realizar ensayos de análisis granulométrico, límites de Atterberg, CBR y proctor como mínimo. También se mide la capacidad de soporte de dicho material para tener un indicativo de su calidad en términos de resistencia.

Para realizar el diseño de la estructura de pavimento se tiene en cuenta el estudio de tránsito de la zona, ya que según el tipo de vehículo que transite se estiman los anchos de calzada y las curvas de giro, además de las cargas que se tendrán por eje equivalente. Los conteos que se realizan para vías terciarias rurales se llevan a cabo en periodos pico durante 10 horas continuas en dos días para llegar a obtener el tránsito de las 24 horas, en estos conteos se clasifican los vehículos como autos, motos, microbuses, buses y diferentes tipos de camiones (ver Figura 4).

**Figura 4. Clasificación de los vehículos en Colombia**

TIPO DE VEHICULO		ESQUEMA	TIPO DE VEHICULO		ESQUEMA
AUTOS			C3 Y C4	CAMION C3	
				CAMION C4	
				TRACTO-CAMION C2-S1	
				TRACTO-CAMION C2-S2	
				TRACTO-CAMION C3-S1	
BUSES	BUSETA		C5	TRACTO-CAMION C3-S2	
	BUS			> C5	TRACTO-CAMION C3-S3
	BUS METROPOLITANO				
C2-P	CAMION DE DOS EJES PEQUENO				
C2-G	CAMION DE DOS EJES GRANDE				

Fuente: SANCHEZ Sabogal, Caracterización del tránsito

El tipo de cemento utilizado en la estabilización de suelos corresponde al cemento hidráulico Portland de uso general, el cual no debe haber fraguado ni debe contener terrones endurecidos, por otra parte, el agua empleada no debe contener materia orgánica, álcalis u otras sustancias perjudiciales.

En el mejoramiento de un material con cemento para la conformación de base o subbase se realiza un proceso de escarificación a la altura necesaria para alcanzar los espesores definidos en el diseño, posteriormente se aplica el cemento en bolsas o a granel, teniendo en cuenta que el material no debe contener una humedad superior a la especificada en el diseño anteriormente nombrado.

La compactación del material se realiza en un lapso no mayor a 2 horas y se lleva a cabo tal que cada capa sea homogénea y tenga un espesor que puede variar de 10 a 20 cm dependiendo del proyecto. La finalidad de este proceso es garantizar que el suelo llegará a tener la densidad y la resistencia necesaria para la solicitud de cargas.

## 7. MARCO CONCEPTUAL

### 7.2 Suelo

La tierra o suelo se define como cualquier material no consolidado compuesto de distintas partículas sólidas con gases o líquidos incluidos. El tamaño máximo de las partículas que pueden clasificarse como suelo no es fijo, pero determina la función en que ellas están implicadas.

El suelo contiene una amplia variedad de materiales tales como la grava, la arena y las mezclas arcillosas depositadas por glaciares, las arenas aluviales y limos y arcillas de los depósitos aluviales de los ríos, las arcillas marinas blandas y las arenas de las playas de la costa, las rocas muy meteorizadas de los trópicos, y hasta las escorias, los bastidores de camas, las latas y las cenizas de los vertederos de las ciudades. Los suelos pueden ser mezclas bien definidas de unos cuantos minerales específicos o mezclas heterogéneas de cualquier cosa.<sup>13</sup>

### 7.3 Tipos de suelo

En Colombia se pueden identificar diversos tipos de suelos, entre ellos se encuentran algunos muy problemáticos en cuanto a su manejo por sus características de deformabilidad, de baja resistencia, expansividad y sensibilidad. Esto trae consigo problemas constructivos.

#### 7.3.1. Suelos arcillosos blandos compresibles y suelos orgánicos

Estos suelos son muy comunes en el país debido a las condiciones climáticas, ya que nos encontramos en una zona tropical con elevadas humedades, altos porcentajes de saturación en el aire y niveles freáticos superficiales<sup>14</sup>. En la siguiente tabla se muestran algunos valores para la identificación de estos suelos:

**Tabla 2. Identificación de suelos blandos**

Tipo de suelo	Resistencia a la compresión simple (Kg/cm <sup>2</sup> )	Límite líquido (%)	Índice de liquidez (IL)
Muy blando	< 0.25	>100	> 1.0

Fuente: FONSECA, Ing. Alfonso MONTEJO: Ingeniería de pavimentos. Bogotá D.C, 2002.

<sup>13</sup> GEORGE B. Sowers, GEORGE F Sowers: Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones. México, 1972. EDITORIAL LIMUSA-WILEY S.A.

<sup>14</sup> FONSECA, Ing. Alfonso MONTEJO: Ingeniería de pavimentos. Bogotá D.C, 2002. Universidad Católica de Colombia Ediciones y publicaciones.

## Suelos volcánicos

Estos suelos están presentes en la región Andina del país, este tipo de suelos presentan problemas de explanación y compactación debido a sus características de humedad, de susceptibilidad al remoldeo y de cambio en sus propiedades durante el secado. Se forman por la meteorización de rocas volcánicas de la época cuaternaria reciente.

### 7.3.2. Suelos expansivos

Se caracterizan por el cambio volumétrico que sufren ante la presencia del agua. El grado de expansión de este tipo de suelos depende de la cantidad de minerales arcillosos, los cuales se caracterizan por tener partículas muy pequeñas. El mineral arcilloso más activo es la montmorillonita y entre las que no son consideradas activas están las caolinitas y las illitas. En Colombia se ha encontrado gran presencia de estos minerales en Cali, en el norte del Valle, en Barranquilla, en el Huila y en el sur del Cauca.

### 7.3.3. Principales propiedades de los suelos

**Estabilidad volumétrica:** Se refiere a lograr suelos con volúmenes constantes, frente a la aplicación de cargas o debido a los agentes como el agua o el secado. Los cambios de humedad afectan la estabilidad volumétrica y son las causas del levantamiento de pavimentos, la inclinación de postes, la rotura de tubos, los asentamientos de muros y la inestabilidad de taludes.

**Resistencia mecánica:** Los suelos tienen una resistencia mecánica que permite la estabilidad de las estructuras que soporta o de los taludes.

**Permeabilidad:** Es la capacidad de un suelo de permitir el paso de un fluido a través suyo. La permeabilidad baja estimula el incremento de presión de poros y es un factor detonante de deslizamientos. Por otra parte, el flujo de agua a través del suelo permeable, de cohesión baja, puede originar la tubificación, el arrastre de partículas sólidas y la erosión interna del suelo.

**Durabilidad:** Es la capacidad que tiene el suelo de resistir a la acción del medio ambiente que lo rodea, o de la meteorización física o química; de la abrasión o de cualquier otro proceso de deterioro. El intemperismo, la erosión y la abrasión amenazan la vida útil de un suelo, como elemento estructural y funcional.

**Compresibilidad:** Es la propiedad de un suelo relacionada con su susceptibilidad a disminuir su volumen cuando es sometido a cargas. Afecta la permeabilidad, altera la magnitud y sentido de las fuerzas inter-partícula, modificando la resistencia del suelo al esfuerzo cortante. Los suelos poco compresibles son susceptibles a sufrir desplazamientos.<sup>15</sup>

---

<sup>15</sup> ESCOBAR, Enrique DUQUE ESCOBAR Gonzalo y Carlos: Estructura y características textuales del suelo. Galeón 2016.

## 7.4 Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.<sup>16</sup>

Dosificado y mezclado apropiadamente con agua y áridos debe producir un hormigón o mortero que conserve su trabajabilidad y capacidad de darle forma durante un tiempo suficiente, alcanzar unos niveles de resistencias preestablecido y presentar una estabilidad de volumen a largo plazo.<sup>17</sup>

### 7.4.1. Tipos de cemento

Las siguientes clasificaciones están dadas por la concretera Cemex<sup>18</sup>, que está actualizada en cuanto a la nomenclatura de los tipos de cemento:

**Cemento Uso General:** Es ideal para la elaboración de morteros y concretos de uso general. Tiene alta retención de agua que garantiza una excelente manejabilidad, moderado calor de hidratación que minimiza la aparición de fisuras y brinda estabilidad en sus propiedades de fraguado, resistencia y color.

**Cemento Súper Resistente:** Altas resistencias iniciales y finales, provee una excelente durabilidad en ambientes con polución y tiene un buen desempeño en el terminado.

**Cemento Uso Ambiente Marino:** Los sulfatos presentes en ambientes marinos se combinan con un componente mineral del cemento, generando expansión de los morteros y concretos, lo que provoca la aparición de grietas y deterioro o destrucción de las construcciones.

**Cemento Uso Estructural:** Por sus características es un cemento especial para concretos estructurales. Su tiempo de fraguado incrementa el rendimiento de la obra, pues permite desencofrar en menor tiempo, siendo esto un comportamiento ideal para la elaboración de elementos prefabricados.

## 7.5 Vías

Las carreteras constituyen un aspecto fundamental en el desarrollo de un país, ya que por medio de estas se busca solventar la necesidad de moverse de un lugar a otro, lo cual facilita la interacción de las comunidades rurales y urbanas, permitiendo el intercambio de bienes y servicios.

### 7.5.1. Tipos de vías

En Colombia las vías se pueden clasificar de diferentes maneras una de ellas es según su funcionalidad:

---

<sup>16</sup> ANCADE, ANTER, IECA: Manual de estabilización de suelos con cemento o cal. Madrid, 2013. Instituto español del cemento y sus aplicaciones. ISSN:978-84-89702-23-3

<sup>17</sup> ANCADE, ANTER, IECA, op, cit.

<sup>18</sup> CEMEX: cemento gris [En línea] <<https://www.cemexcolombia.com/productos/cementos/cemento-gris>> [citado 18 de septiembre de 2018]



**Primarias:** Son aquellas troncales, transversales y accesos a capitales de Departamento que cumplen la función básica de integración de las principales zonas de producción y consumo del país y de éste con los demás países. Este tipo de carreteras pueden ser de calzadas divididas según las exigencias particulares del proyecto. Las carreteras consideradas como Primarias deben funcionar pavimentadas.

**Secundarias:** Son aquellas vías que unen las cabeceras municipales entre sí y/o que provienen de una cabecera municipal y conectan con una carretera Primaria. Las carreteras consideradas como Secundarias pueden funcionar pavimentadas o en afirmado.

**Terciarias:** Son aquellas vías de acceso que unen las cabeceras municipales con sus veredas o unen veredas entre sí. Las carreteras consideradas como Terciarias deben funcionar en afirmado. En caso de pavimentarse deberán cumplir con las condiciones geométricas estipuladas para las vías Secundarias.

## 7.6 Pavimento

Un pavimento normalmente está constituido por 4 capas, sub-rasante, base, sub-base y capa de rodadura, con la estabilización del suelo-cemento se puede llegar a reemplazar la capa de base o de sub-base. Para el caso de las vías terciarias simplemente se realiza la estabilización del suelo y se omiten las demás capas, dejando una vía en afirmado.<sup>19</sup>

Para la estabilización de un suelo se pueden utilizar diferentes materiales, algunos de ellos son: cal, la cual disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica, cemento tipo Portland que aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas, productos Asfáltico son emulsiones usados para material triturado sin cohesión, cloruro de Sodio el cual impermeabiliza y disminuye los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos, cloruro de calcio impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos, escorias de fundición este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil. Polímeros que se utilizan comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

En el presente trabajo de investigación se realizará la estabilización de suelos con cemento tipo Portland ya que es un material compatible con arenas y gravas finas, que son las más comunes en vías terciarias. Además, lo que se busca es mejorar la resistencia del suelo ante las cargas monotónicas impuestas por el tránsito.

### 7.6.1. Tipos de pavimentos

**Pavimentos flexibles:** Este tipo de pavimentos se caracterizan porque la capa principal tiene un revestimiento asfáltico (capa de rodadura o carpeta de rodadura) el cual se encuentra sobre una base granular. En este caso las cargas del tránsito son absorbidas por todas las capas predecesoras (base, sub-base, Sub-rasante) de manera vertical y pueden llegar a causar deformaciones por fatiga, trayendo consigo un ahuellamiento de del pavimento.

**Pavimentos semirrígidos:** Esta estructura tiene la misma composición del pavimento flexible, la única diferencia es que una de sus capas se encuentra rigidizada con algún

---

<sup>19</sup> MINISTERIO DE TRANSPORTE: Manual de diseño geométrico de carreteras. 2008

aditivo como lo es el cemento, emulsión, asfalto, cal y químicos. La finalidad de emplear estos aditivos es mejorar las características mecánicas de las capas de base y subbase, disminuyendo los costos de construcción.

**Pavimentos rígidos:** El principal componente estructural de este tipo de pavimentos es el concreto hidráulico. Las cargas impuestas por el tráfico son soportadas principalmente por la capa en concreto, debido a su alta resistencia estructural. En estos pavimentos basta con tener una capa de base o de sub-base, ya que los esfuerzos no se transmiten hasta la última capa.

**Pavimentos articulados:** Se caracterizan porque su composición está basada en adoquines los cuales pueden ser de concreto o de arcilla y componen la capa de rodadura. Este pavimento puede ir apoyado sobre una capa de arena la cual se encuentra sobre la base o subbase.<sup>20</sup>

### **7.7 Subrasante**

La subrasante es la última capa de un pavimento, su función principal es recibir las cargas transmitidas por las capas superiores. La calidad de la subrasante es fundamental para determinar el espesor que tendrá el pavimento, por esto es necesario no tener materiales expansivos en la subrasante que puedan afectar la estructura y si así fuera se debe estabilizar dicho suelo con algún aditivo.

### **7.8 Subbase granular**

Esta funciona como una capa de transición entre la subrasante y la base granular, impidiendo que el material fino de la base se contamine con partículas de la subrasante. Otra de las funciones que tiene la subbase es la de transmitir adecuadamente los esfuerzos que están impuestos por el tránsito hacia las capas subyacentes. Además de esto se puede decir que los materiales que componen esta capa son de mediana calidad y ayudan a disminuir los costos de todo el pavimento.

### **7.9 Base granular**

La base granular es la capa siguiente a la capa de rodadura, esta se encarga de transmitir los esfuerzos a la subbase y a la subrasante de manera apropiada, brindando un apoyo resistente. Se tienen materiales finos de buena calidad, los cuales son ubicados y compactados de manera uniforme.

### **7.10 Carpeta de rodadura**

La carpeta de rodadura es la capa superior de un pavimento, su función principal es brindar al usuario una superficie uniforme y estable. Es la encargada de soportar directamente los efectos del tránsito.<sup>21</sup>

---

<sup>20</sup> FONSECA, Ing. Alfonso MONTEJO: Ingeniería de pavimentos. Bogotá D.C, 2002. Universidad Católica de Colombia Ediciones y publicaciones.

<sup>21</sup> FONSECA, Ing. Alfonso MONTEJO, op, cit.

### **7.11 El tránsito**

El tránsito que pasa por determinada vía es fundamental para el cálculo de los espesores de cada una de las capas que constituyen el pavimento, por esto es necesario estudiar las cargas más pesadas por eje, sabiendo que se tienen eje simple, tándem o tridem dependiendo del tipo de vehículo que por allí se movilice. La frecuencia con la cual pasan dichos vehículos, la velocidad y el tiempo de estacionamiento son otros factores que se deben tener en cuenta en estos diseños.

### **7.12 Cargas monotónicas**

Están definidas como una carga constante que inicia en cero y va aumentando constantemente hasta llegar a la rotura del material sin producirse ningún tipo de descarga.

### **7.13 Estabilización de suelos**

La finalidad de la estabilización de suelos es brindar una mayor estabilidad y resistencia a un material para posteriores construcciones civiles. Algunos métodos utilizados recientemente para dicho proceso se llevan a cabo mediante la adición de cemento, cal, arena y asfalto.

### **7.14 Estabilización de suelos con la adición de cemento**

El Suelo Cemento es una técnica en que se aprovecha el material existente en las vías, el afirmado, y se mezcla con cemento. Luego se somete a un proceso de mezcla intensiva logrando su homogeneidad. Posteriormente es perfilado con una motoniveladora y se compacta para entrar a un proceso de hidratación del cemento, que se va endureciendo y va adquiriendo resistencia, para convertirse en una base durable para los pavimentos que a se construyan a futuro.<sup>22</sup>

### **7.15 Factores que afectan la mezcla de suelo cemento**

Existen algunos factores que dificultan la utilización de la técnica de suelo cemento y por lo tanto se deben mitigar en cada uno de los proyectos que se lleven a cabo. Algunos de estos factores son:

#### **La cantidad de materia orgánica**

Se debe garantizar que el suelo no posee más del 2% de materia orgánica ya que su presencia provoca retrasos en la acción aglutinante del cemento.

#### **El tipo de suelo**

---

<sup>22</sup> ARGOS: Con suelo cemento, Rionegro recupera 144 km de vías rurales. 2017. 360 grados en concreto.

El tipo de suelo debe cumplir las siguientes características si se desea un resultado óptimo: El suelo no contiene partículas mayores de 7.5 cm, menos del 50% del suelo pasa el tamiz de 0.074 mm, el límite líquido es inferior a 40 y el índice plástico es menor a 18.<sup>23</sup>

### **La cantidad de cemento**

La dosificación del cemento es fundamental al momento de llevar a cabo este tipo de estabilización, ya que el cemento es el componente que genera más costos y un uso excesivo de este puede llevar a un gasto innecesario. Además, la resistencia del suelo se encuentra estrechamente ligada a la cantidad de cemento. Según (FONSECA, 2002) en Colombia se fijó un valor de resistencia mínima a la compresión de probetas de 21 kg/cm<sup>2</sup>, la cual se toma como resistencia mínima de diseño.

### **La cantidad de agua**

La cantidad de agua adecuada garantiza que se va tener una compactación óptima, llegando a los valores máximos de densidad, por esto es necesario realizar ensayos de proctor normal para establecer la cantidad de agua que va a utilizar.

### **Compactación de la mezcla**

Una compactación adecuada es necesaria si se quiere llegar a valores de resistencia aceptables. Por este motivo en varios países se ha prohibido que la compactación se realice pasadas 2 horas desde la mezcla hasta la compactación.

### **Curado de la mezcla**

El curado de la mezcla es directamente proporcional a su resistencia, así lo indican ensayos de laboratorio en los cuales se demostró que a mayor tiempo de curado mayor es la resistencia a la compresión.

## **7.16 Estabilización de suelos con la adición de Cal**

La estabilización de suelos con cal se emplea en muchos casos ya que mejora las características plásticas de los suelos, disminuye la permeabilidad y aumenta su resistencia al corte. La cal es un material que se adapta muy bien a los suelos arcillosos, controlando así los cambios volumétricos. Existen diferentes tipos de Cal al momento de realizar una estabilización, por ejemplo, está la cal viva la cual produce un endurecimiento lento y se usa como aglomerante, cal grasa la cual se produce al calcinar piedras calizas con un contenido de arcilla inferior al 5%, cal Magra la cual tiene un contenido inferior al 5 % de arcilla y superior al 10% en magnesio, por último está la cal hidráulica que posee un contenido superior al 5 % de arcilla.

## **7.17 Estabilización de suelos con asfalto**

---

<sup>23</sup> FONSECA, Ing. Alfonso MONTEJO: Ingeniería de pavimentos. Bogotá D.C, 2002. Universidad Católica de Colombia Ediciones y publicaciones.

Este método es muy utilizado en suelos arenosos o cohesivos, lo que se busca con este es aglomerar las partículas y brindar un efecto ligante entre ellas. La implementación de asfaltos líquidos o emulsiones asfálticas exige algunos requerimientos: El tamaño máximo de la partícula debe ser menor a 1/3 del espesor de la capa compactada, más del 50% del material debe pasar el tamiz de 4.76 mm y más del 35% el de 0.425m, entre 10 y 15% debe pasar el tamiz de 0.074 mm y el límite líquido de la fracción fina no puede ser mayor de 40 ni el índice plástico superior a 18.

#### **7.18 Estabilización con ácido fosfórico**

Esta es una técnica que ofrece una ventaja con respecto a las otras en cuanto a la rápida acción cementante. Se comprobó que es poco rentable su implementación ya que para llegar a estabilizar un suelo se requieren cantidades entre 2% y 4% de peso en masa, siendo su precio muchas veces mayor que el del cemento o la cal. Sumado a esto se determinó que este método no es efectivo en suelos con grandes cantidades de carbonato de calcio.

#### **7.19 Estabilización con cloruro de sodio**

Este tipo de estabilización ha sido poco estudiada en el país, se dice que puede ser aplicada a cualquier tipo de suelo menos a los que contienen materia orgánica. El principal problema que representa la técnica es la solubilidad de la sal ante la presencia del agua. La sal produce un aumento en la humedad óptima de los suelos, así como una disminución en la densidad y en la resistencia a la compresión inconfiada.

#### **7.20 Estabilización con soda cáustica**

El hidróxido de calcio estabiliza adecuadamente los suelos de tipo laterítico los cuales se convertían en suelos de fácil compactación. Por otra parte, se estima que el costo de implementación resulta ser elevado y además este tipo de mezclas tienen una carbonatación bastante acelerada al contacto con el aire.

#### **7.21 Uso de polímeros y resinas**

Este tipo de materiales se pueden emplear como impermeabilizantes en los suelos agregando cantidades de 1% a 2%, es considerada una técnica poco viable ya que no aporta a la resistencia del terreno y solo puede ser aplicada en suelos ácidos, también presenta una alta degradación por parte de micro-organismos y un elevado costo de implementación.

#### **7.22 Estabilización electroquímica con aceite sulfonado**

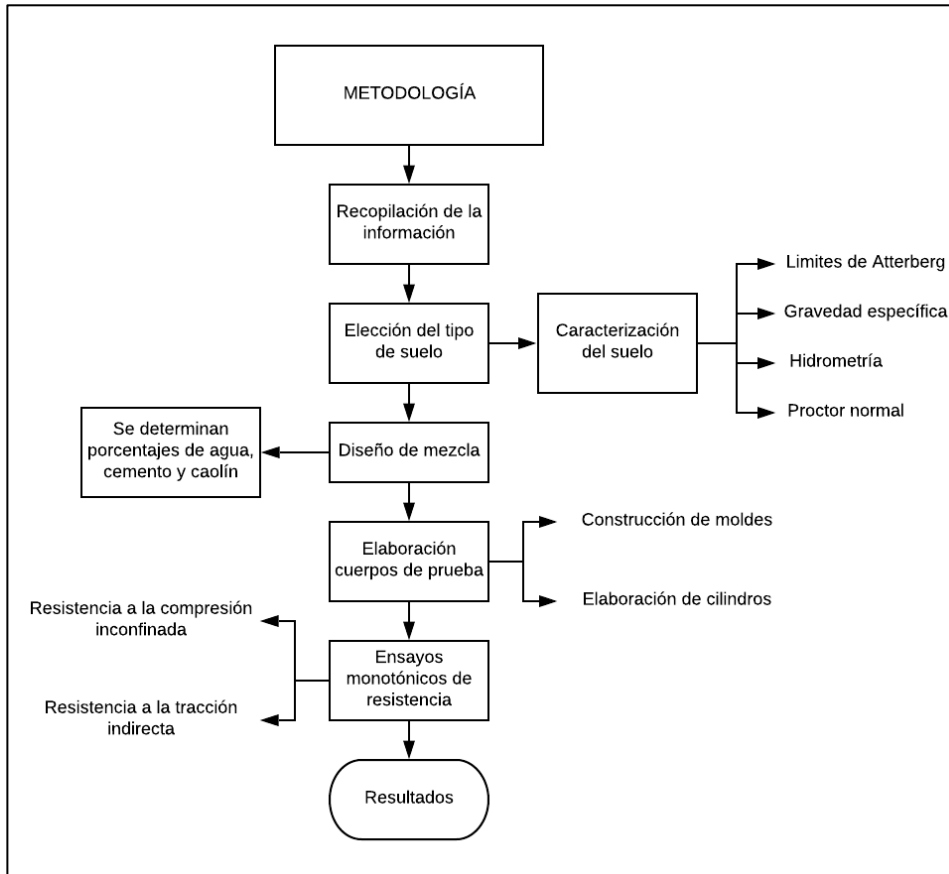
Esta técnica de estabilización es utilizada en suelos finos como arcillas y limos debido a su alto potencial de intercambio iónico, lo cual provoca un proceso químico en el cual las partículas de agua adheridas al suelo pierden sus enlaces y se desprenden. En un

experimento realizado en Venezuela se comprobó que al utilizar esta técnica se disminuyó la humedad entre un 30% y 90%, aumentando hasta el 15% la relación de densidad máxima.

## 8. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del presente proyecto de investigación se realizaron diferentes cuerpos de prueba los cuales fueron sometidos a cargas monotónicas de resistencia a la compresión inconfiada y tracción indirecta con la finalidad de establecer la incidencia que tenían los diferentes porcentajes de cemento en una mezcla de suelo (ver Figura 5).

Figura 5. Metodología llevada a cabo



Fuente: Autor

### 8.2 Recopilación de la información

Para recolectar la información necesaria se realizó una búsqueda exhaustiva en la base de datos Science Direct en la cual se utilizaron diferentes palabras clave de búsqueda como "Soil stabilization whit cement", "Soil-cement mixtures" y "Soil improvement with cement". En cada una de estas búsquedas se dio prioridad a los últimos 5 años, es decir, las investigaciones o artículos científicos de 2013 hasta la fecha actual. De allí se seleccionaron 10 artículos que son pertinentes a la investigación en curso. Sumado a esto se buscaron algunas fuentes nacionales como libros de estabilización de suelos, pavimentos, materiales y normas vigentes que rigen el diseño de estructuras viales.

### 8.3 Elección del tipo de suelo

Durante el trabajo experimental se trabajó con un suelo tipo el cual tuvo unas características físicas que se midieron en el laboratorio, dicho suelo correspondió a la caolinita. Se decide trabajar con dicho material ya que se busca medir la incidencia del cemento en suelos arcillosos y la caolinita es uno de ellos, además de ser un suelo muy estable.

### 8.4 Ensayos de caracterización física del suelo arcilloso

Estos ensayos se aplican a la muestra de suelo para poder tener una estimación de las características físicas del material de estudio y así establecer el diseño de mezcla adecuado. Los ensayos que se aplican están resumido en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 3. Ensayos de caracterización de suelos arcillosos.

Nombre	Descripción	Norma
DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS	Contenido de humedad expresado en porcentaje del suelo secado en el horno, cuando éste se halla en el límite entre el estado líquido y el estado plástico.	I.N.V. E – 125 – 13
LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD DE SUELOS	El límite plástico de un suelo es el contenido más bajo de agua, determinado por este procedimiento, en el cual el suelo permanece en estado plástico.	I.N.V. E – 126 – 13
DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS DE LOS SUELOS Y DEL LLENANTE MINERAL	Relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada	I.N.V. E – 128 – 13
DETERMINACIÓN DE LOS TAMAÑOS DE LAS PARTÍCULAS DE LOS SUELOS A TRAVÉS DEL HIDRÓMETRO	Determinar los porcentajes de suelo que pasan por los distintos tamices de la serie empleada en el ensayo.	I.N.V. E – 123 – 13
RELACIONES DE HUMEDAD – MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS (ENSAYO NORMAL DE COMPACTACIÓN)	Se emplean para determinar la relación entre la humedad y la masa unitaria de los suelos compactados	I.N.V. E – 141 – 13

Fuente. Autor.

#### 8.4.1. Límites de Atterberg

##### ➤ Teoría

Los límites de Atterberg para un material arcilloso están divididos entre el límite líquido y el límite plástico. Para la determinación del límite líquido se utiliza el procedimiento establecido en la norma INV E-125-13 la cual lo define como el contenido de humedad del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados líquido y plástico. También se utiliza la norma INV E-126-13 para el límite plástico e índice de plasticidad, siendo este el contenido de agua del suelo, expresado en porcentaje, cuando se halla en el límite entre los estados plástico y semisólido.

Para la estimación del límite líquido se utiliza un sistema multipuntos, definido por el (INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS), 2013) como “El límite líquido multipunto,



Método A, requiere 3 o más tanteos sobre un rango de contenidos de agua, cuyos resultados se dibujan para establecer una relación a partir de la cual se determina el límite líquido a los 25 golpes”. Este método resulta muy preciso ya que para utilizar el método con un solo punto se debe tener un alto grado de experticia en la realización de este tipo de ensayos.

Para el cálculo del contenido de agua se utiliza la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido de agua} = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del suelo secado al horno}} * 100 \quad [1]$$

Para la determinación del límite plástico mediante el método manual se debe formar un rollo de diámetro uniforme en toda su longitud. El rollo se debe adelgazar más con cada rotación, hasta que su diámetro alcance 3.2 mm (1/8”), tomándose para ello no más de dos minutos.

Cuando el diámetro del rollo llegue a 3.2 mm, éste se divide en varios trozos. Se juntan los trozos y se comprimen hasta que el rollo de 3.2 mm de diámetro se desmorone bajo la presión requerida para el enrollamiento y el suelo no pueda ser enrollado más en cilindros de 3.2 mm de diámetro. Se recogen las porciones de suelo desmoronado y se colocan en un recipiente adecuado de masa conocida. Se determinan los contenidos de agua de los suelos contenidos en los dos recipientes y se anotan los resultados. Se calcula el promedio de los contenidos de agua y el valor obtenido se redondea al entero más cercano. Este valor es el límite plástico (LP).

Para el índice de plasticidad (IP) se calcula con la siguiente fórmula:

$$IP = LL - LP \quad [2]$$

Donde:

*IP*: Índice de plasticidad (%)

*LL*: Límite líquido (%)

*LP*: Límite plástico (%)

### ➤ Procedimiento

Para llevar a cabo el ensayo de límite líquido primero fue necesario la preparación de la muestra, seleccionando la cantidad en peso de cemento y caolín. Luego de esto se humedeció dicha muestra hasta lograr una masa homogénea la cual se ubicó en una capa de 1 cm de espesor en la Cazuela de Casagrande (ver Figura 6).

**Figura 6. Cazuela de Casagrande**



**Fuente. El autor**

Después, con ayuda del ranurador se realizó una abertura por el centro de la cazuela (ver Figura 7) con el objetivo de determinar la cantidad de golpes necesarios para que ambos extremos del suelo se unieran por lo menos 1 cm.

**Figura 7. Separación de muestra con ranurador**



**Fuente. El autor**

Cuando ambos extremos del suelo se unieron se detiene el ensayo, se toma lectura del número de golpes necesarios y se procede a determinar la humedad del suelo. Para la determinación de la humedad se procedió a tomar una pequeña muestra de cada cazuela, (ver Figura 8) las cuales fueron llevadas al horno durante 24 horas para obtener el peso seco de cada una de las muestras.

**Figura 8. Muestras para límites de Atterberg**



**Fuente. El autor**

Al finalizar, se realizó una curva de N° de golpes vs humedad, para cada uno de los porcentajes de cemento en la cual se determinó el límite líquido de las muestras a los 25 golpes.

Para el límite plástico se realizaron rollos tal que su diámetro llegara a 3.2 mm y que su textura se tornara quebradiza, luego de esto se tomaron dos muestras sumando un peso mínimo de 6 g y se llevaron al horno durante 24 horas para determinar su humedad. En la Figura 8 se pueden ver las cápsulas 5 y 21 las cuales contienen los rollos de la muestra. El límite plástico se calculó como el promedio de ambas humedades.

Para finalizar, se calcularon los diferentes índices de plasticidad, siendo estos la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

#### **8.4.2. Gravedad específica**

##### **➤ Teoría**

La gravedad específica se calcula y define como lo indica la norma INV E-128-13: “Es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada y libre de gas a igual temperatura. La temperatura generalmente usada como referencia es 20°C”.

Este ensayo es de gran importancia ya que el valor de la gravedad específica se emplea en el análisis granulométrico por hidrometría y además brinda un comparativo con diferentes tipos de suelos arcillosos.

##### **✓ Volumen calibrado de cada picnómetro ( $V_p$ )**

$$V_p = \frac{M_{pw,c} - M_p}{\rho_{w,c}} \quad [3]$$

Donde:

$M_{pw,c}$ : Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de calibración, g;

$M_p$ : Masa promedio del picnómetro seco, g;

$\rho_{w,c}$ : Densidad de masa del agua a la temperatura de calibración, g/cm<sup>3</sup>

✓ **Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura del ensayo ( $M_{pw,t}$ )**

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p * \rho_{w,t}) \quad [4]$$

Donde:

$M_{pw,t}$ : Masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo, g;

$M_p$ : Masa promedio de calibración del picnómetro seco, g;

$V_p$ : Volumen promedio de calibración del picnómetro seco, cm<sup>3</sup>;

$\rho_{w,t}$ : Densidad del agua a la temperatura de ensayo (Tt), g/cm<sup>3</sup>

✓ **Gravedad específica de las partículas sólidas del suelo a la temperatura de ensayo ( $G_t$ )**

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_{w,t}} = \frac{M_s}{[M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s)]} \quad [5]$$

Donde:

$\rho_s$ : Densidad de las partículas sólidas, g/cm<sup>3</sup>;

$\rho_{w,t}$ : Densidad del agua a la temperatura de ensayo (Tt), g/cm<sup>3</sup>;

$M_s$ : Masa de los sólidos del suelo secado en el horno, g;

$M_{pws,t}$ : Masa del picnómetro con agua y sólidos a la temperatura de ensayo, g;

✓ **Gravedad específica de las partículas sólidas del suelo a 20°C ( $G_{20^\circ C}$ )**

$$G_{20^\circ C} = K * G_t \quad [6]$$

Donde:

K: Coeficiente de corrección por temperatura

➤ **Procedimiento**

Para el ensayo de gravedad específica se seleccionó un picnómetro de 500 ml de capacidad (ver Figura 9) al cual se le tomó el peso seco, luego de esto se llenó de agua hasta llegar al menisco y se volvió a pesar tomando la temperatura. Después se dispuso de 40 g de caolín los cuales se introdujeron al picnómetro con ayuda de un embudo. Fue necesario remover todas las partículas de suelo que se quedaron en el cuello del picnómetro.

**Figura 9. Picnómetro de 500 ml**



**Fuente. El autor**

El siguiente paso fue extraer todas las burbujas de aire presentes en el suelo, para ello se empleó la bomba de vacíos (ver Figura 10) con la cual se debía agitar la muestra constantemente. Cuando la composición no tenía aire se procedió a tomar nuevamente el peso del picnómetro y su temperatura. Al final se vertió la mezcla en un tazón para llevarlo al horno y transcurridas 24 horas poder estimar el peso de la muestra seca y posterior a eso su gravedad específica.

**Figura 10. Bomba de vacíos**



**Fuente. El autor**

### 8.4.3. Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos (Hidrometría)

#### ➤ Teoría

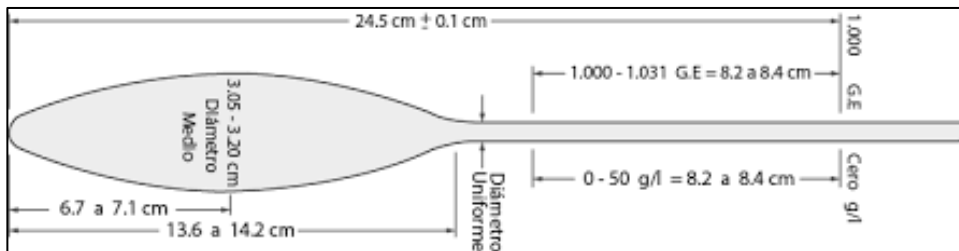
Este ensayo se realiza siguiendo los parámetros establecidos en la norma INV E-123-13:

“Esta norma se refiere a la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de un suelo. La distribución de las partículas mayores de 75 micrómetros (retenidas en el tamiz No. 200) se determina por tamizado, mientras que la distribución de los tamaños de las partículas menores de 75 micrómetros se determina por un proceso de sedimentación empleando un hidrómetro”.

El proyecto investigativo se desarrolla con el caolín como suelo de estudio, este corresponde a un suelo arcilloso en donde todas sus partículas son pasantes del tamiz No. 200 por lo tanto se emplea el método de hidrometría.

Para este ensayo se emplea un Hidrómetro 152 H (ver Figura 11), el cual tiene las siguientes características:

Figura 11. Hidrómetro 152 H



Fuente: (GÓMEZ, 2016)

Este hidrómetro permite tomar las medidas desde 0 hasta 60, donde cada una de ellas corresponde a una profundidad efectiva. Sumado a esto se debe tomar la lectura de temperatura en los periodos de tiempo de 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos como lo indica la norma. Luego, se calcula el diámetro de las partículas con la siguiente ecuación:

$$D = k \sqrt{\frac{L}{T}} \quad [7]$$

Donde:

*k*: Constante que depende del valor de la gravedad específica del suelo y de la temperatura de la suspensión. Los valores de *k* se presentan en la Tabla 4. El valor *K* no cambia para una serie de lecturas que constituyan un ensayo, mientras que los valores *L* y *T* sí varían;

*L*: Distancia entre la superficie de la suspensión y el nivel al cual se mide su densidad, se conoce como “profundidad efectiva” (ver Tabla 5), cm;

$T$ : Lapso transcurrido desde el comienzo de la sedimentación hasta la toma de la lectura, min;

**Tabla 4. Valores de K para el cálculo del diámetro de las partículas**

Temperatura °C	Gravedad específica de las partículas de suelo								
	2,45	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85
16	0,0151	0,01505	0,01481	0,01457	0,01435	0,01414	0,01394	0,01374	0,01356
17	0,01501	0,01486	0,01462	0,01439	0,01417	0,01396	0,01376	0,01356	0,01338
18	0,01492	0,01467	0,01443	0,01421	0,01399	0,01378	0,01359	0,01339	0,01321
19	0,01474	0,01449	0,01425	0,01403	0,01382	0,01361	0,01342	0,01323	0,01305
20	0,01456	0,01431	0,01408	0,01386	0,01365	0,01344	0,01325	0,01307	0,01289
21	0,01438	0,01414	0,01391	0,01369	0,01348	0,01328	0,01309	0,01291	0,01273
22	0,01421	0,01397	0,01374	0,01353	0,01332	0,01312	0,01294	0,01276	0,01258
23	0,01404	0,01381	0,01358	0,01337	0,01317	0,01297	0,01279	0,01261	0,01243
24	0,01388	0,01365	0,01342	0,01321	0,01301	0,01282	0,01264	0,01246	0,01229
25	0,01372	0,01349	0,01327	0,01306	0,01286	0,01267	0,01249	0,01232	0,01215
26	0,01357	0,01334	0,01312	0,01291	0,01272	0,01257	0,01235	0,01218	0,01201
27	0,01342	0,01319	0,01297	0,01277	0,01258	0,01239	0,01221	0,01204	0,01188
28	0,01327	0,01304	0,01283	0,01264	0,01244	0,01255	0,01208	0,01191	0,01175
29	0,01312	0,0129	0,01269	0,01249	0,0123	0,01212	0,01195	0,01178	0,01162
30	0,01298	0,01276	0,01256	0,01236	0,01217	0,01199	0,01182	0,01165	0,01149

Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Especificaciones generales de construcción de carreteras.

**Tabla 5. Valores de profundidad efectiva, basados en hidrómetro y cilindro de tamaños especificados**

HIDRÓMETRO 152 H			
LECTURA REAL DEL HIDRÓMETRO	PROFUNDIDAD EFECTIVA, L, cm	LECTURA REAL DEL HIDRÓMETRO	PROFUNDIDAD EFECTIVA, L, cm
0	16,3	31	11,2
1	16,1	32	11,1
2	16	33	10,9
3	15,8	34	10,7
4	15,6	35	10,6
5	15,5	36	10,4
6	15,3	37	10,2
7	15,2	38	10,1
8	15	39	9,9
9	14,8	40	9,7
10	14,7	41	9,6
11	14,5	42	9,4
12	14,3	43	9,2

Continuación de la Tabla 5

LECTURA REAL DEL HIDRÓMETRO	PROFUNDIDAD EFECTIVA, L, cm	LECTURA REAL DEL HIDRÓMETRO	PROFUNDIDAD EFECTIVA, L, cm
13	14,2	44	9,1
14	14	45	8,9
15	13,8	46	8,8
16	13,7	47	8,6
17	13,5	48	8,4
18	13,3	49	8,3
19	13,2	50	8,1
20	13	51	7,9
21	12,9	52	7,8
22	12,7	53	7,6
23	12,5	54	7,4
24	12,4	55	7,3
25	12,2	56	7,1
26	12	57	7
27	11,9	58	6,8
28	11,7	59	6,6
29	11,5	60	6,5
30	11,4		

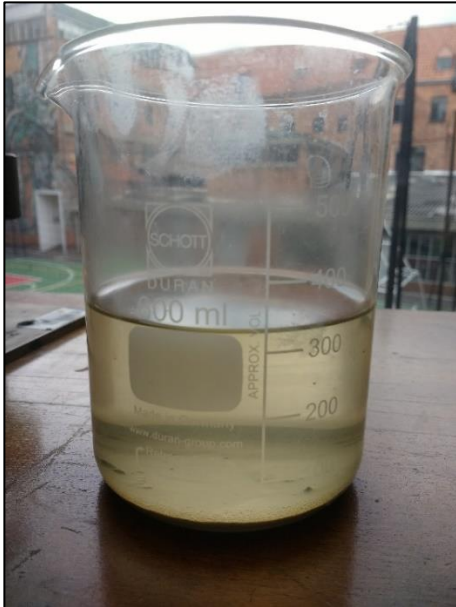
Fuente: INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS: Especificaciones generales de construcción de carreteras.

➤ **Procedimiento**

Para determinar el diámetro de las partículas del suelo se llevó a cabo un ensayo de granulometría, en el cual primero se preparó la muestra 24 horas antes del ensayo. Se tomó un beaker de 500 ml, se vertieron 300 ml de agua y se aplicaron 20 g de hexametáfosfato, el cual es un químico que actúa como agente dispersante, luego de esto se añadieron 65 g de suelo a la mezcla (ver Figura 12).



**Figura 12. Beaker con muestra en dispersión**



**Fuente: Autor**

Cuando la muestra estaba lista se procedió a utilizar dos probetas de 1000 ml de capacidad, la primera se llenó con agua y en la segunda se vertió la muestra dispersada y se completó el nivel máximo con agua (ver Figura 13).

**Figura 13. Probetas con agua y suelo en dispersión**



**Fuente. El autor**

Luego de esto se introdujo el hidrómetro 152 H en la segunda probeta para realizar la lectura de inmersión (ver Figura 14) y se midió la temperatura con ayuda de un termómetro digital. Estas mediciones se realizaron a los 2, 5, 15, 30, 60, 250 y 1440 minutos, teniendo en cuenta que antes de realizar cada lectura se debía introducir el hidrómetro en la probeta con agua para remover las partículas adheridas.

**Figura 14. Medición de profundidad con el hidrómetro**



Fuente. El autor

Al final se determinó el diámetro de las partículas partiendo de la gravedad específica antes calculada y según el tamaño obtenido se clasificó en arena fina y limos.

## **8.5 Relaciones de humedad- Peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación)**

### **➤ Teoría**

Las relaciones de humedad de un suelo se definen como lo indica la norma INV E-141-13:

“Se emplean para determinar la relación entre la humedad y el peso unitario seco de los suelos (curva de compactación) compactando en un molde de 101.6 o 152.4 mm (4” o 6”) de diámetro, con un martillo de 24.5 N (5.5 lbf) que cae libremente desde una altura de 305 mm (12”), produciendo una energía de compactación aproximadamente de 600 kN-m/m<sup>3</sup> (12 400 lbf-pie/pie<sup>3</sup>)”

Se desarrolla y se lleva a cabo este ensayo de laboratorio para lograr establecer la densidad máxima y la humedad óptima que tiene el suelo tipo.

### **✓ Masa seca de la fracción de ensayo ( $M_{SFE}$ )**

$$M_{SFE} = \frac{M_{HFE}}{1 + \frac{W_{FE}}{100}} \quad [8]$$

Donde:

$M_{HFE}$ : Masa húmeda de la fracción de ensayo, aproximada a 1 g;

$W_{FE}$ : Humedad de la fracción de ensayo, aproximada a 0.1 %

✓ **Porcentaje de la fracción gruesa ( $P_{FG}$ )**

$$P_{FG} = \frac{M_{SFC}}{M_{SFC} + M_{SFE}} * 100 \quad [9]$$

Donde:

$M_{SFC}$ : Masa seca de la fracción gruesa, aproximada a 1g,

✓ **Porcentaje de la fracción de ensayo ( $P_{FE}$ )**

$$P_{FE} = 100 - P_{FG} \quad [10]$$

✓ **Densidad húmeda de cada sub-muestra ( $P_H$ )**

$$P_H = K * \frac{M_T - M_{MD}}{V} \quad [11]$$

Donde:

$P_H$ : Densidad húmeda de la sub-muestra compactada (punto de compactación), con 4 dígitos significativos, g/cm<sup>3</sup> o kg/m<sup>3</sup>;

$M_T$ : Masa del suelo húmedo dentro del molde, aproximada a 1 g;

$M_{MD}$ : Masa del molde de compactación, aproximada a 1 g;

$V$ : Volumen del molde, cm<sup>3</sup> o m<sup>3</sup>

$K$ : Constante de conversión que depende de las unidades de densidad y de volumen:

Usar 1, para g/cm<sup>3</sup> y volumen en cm<sup>3</sup>

Usar 1000 para g/cm<sup>3</sup> y volumen en m<sup>3</sup>

Usar 0.001 para kg/cm<sup>3</sup> y volumen en m<sup>3</sup>

Usar 1000 para kg/m<sup>3</sup> y volumen en cm<sup>3</sup>

✓ **Densidad seca de cada sub-muestra ( $P_d$ )**

$$P_d = \frac{P_H}{1 + \frac{W}{100}} \quad [12]$$

✓ **Peso unitario seco de cada sub-muestra ( $\gamma_d$ )**

$$\gamma_d = K_1 * P_d \quad \left[ \frac{kN}{m^3} \right] \quad [13]$$

$$\gamma_d = K_2 * P_d \quad \left[ \frac{lbf}{pie^3} \right] \quad [14]$$

Donde:

$\gamma_d$ : Peso unitario seco, aproximado a 0.01 kN/m<sup>3</sup> (0.1 lbf/pie<sup>3</sup>);

$K_1$ : Constante de conversión (9.8066 para densidad en g/cm<sup>3</sup>; 0.0098066 para densidad en kg/m<sup>3</sup>)

$K_2$ : Constante de conversión (62.428 para densidad en g/cm<sup>3</sup>; 0.062428 para densidad en kg/m<sup>3</sup>)

#### ➤ **Procedimiento**

Para este ensayo se determinaron 4 contenidos de humedad, los cuales fueron 10%, 15%, 20 % y 25%. Luego de esto se preparó cada una de estas muestras tomando 2000 g de suelo y garantizando la cantidad de agua adecuada. Se tomó el peso del molde de compactación sin incluir el collarín y además se tomaron las medidas para estimar el volumen de este elemento.

Para la compactación del material se empleó el método A en el cual se utiliza un molde de 4" de diámetro (ver Figura 15) y las partículas son pasantes del tamiz #4. Se realizó dicha compactación en 3 capas con 25 golpes cada una en forma circular llegando hasta el centro, para luego quitar el collarín y enraizar el material.

**Figura 15. Molde de 4" más collarín**



**Fuente. El autor**

Después de esto se procedió a tomar el peso del molde más el material compactado. Posteriormente se extrajo una muestra la cual fue llevada al horno (ver Figura 16) para determinar el contenido de humedad real y a partir de estos datos se realizó una curva la cual muestra la densidad máxima a la cual puede llegar el suelo y la humedad óptima para lograr ese resultado.

**Figura 16. Material seco al horno**



**Fuente: El autor**

## 8.6 Diseño de mezcla

Para el diseño de mezcla se dispuso de 3 materiales principalmente: Suelo tipo (Caolín), cemento y agua. La dosificación del cemento se definió con investigaciones posteriores en las cuales se trabajan porcentajes que van desde el 0% hasta el 20%. Para el caso de estudio se trabajaron 5 porcentajes los cuales corresponden al 0, 4, 8, 10 y 12 por ciento. Para definir la cantidad de agua se realizaron ensayos de proctor simple en los cuales se determinó la cantidad de agua necesaria para llegar a la densidad máxima de la mezcla. En la siguiente tabla se muestran los valores adoptados para cada uno de los porcentajes de cemento:

**Tabla 6. Diseño de mezcla para 1 cilindro**

	Porcentajes de cemento				
	0%	4%	8%	10%	12%
Cantidad caolín (g)	450	432	414	405	396
Cantidad cemento (g)	0	18	36	45	54
Cantidad H2O (ml)	90	94,5	99	101,25	103,5

Fuente: Autor

## 8.7 Elaboración de cuerpos de prueba

El molde empleado para la elaboración de los cilindros de prueba se realizó con tubería sanitaria pvc de 2" de diámetro por 11 cm de altura como se puede observar en la Figura 17, esto con la finalidad de disminuir costos, ya que un molde normal (4") requiere una cantidad considerable de material para abarcar su volumen total.

**Figura 17. Medidas del molde**



Fuente. El autor

Para poder tener múltiples resultados con una variación mínima de datos fue indispensable tener 3 cuerpos prueba para cada uno de los porcentajes de cemento propuestos, además

de esto se tuvieron en cuenta tiempos de curado de 7, 14 y 28 días. Para lograr controlar los tiempos estos tiempos se realizó un cronograma (ver Tabla 7) en el cual se plasmaron las fechas de fundición y de falla de cada uno de los cuerpos de prueba.

**Tabla 7. Cronograma de cilindros**

Tiempo de Curado	Tipo de ensayo	CONTENIDO DE CEMENTO (%)			
		12%		4%	
		K		N	
7 días	Compresión	4c	Fundición: 15 marzo	4c	Fundición: 22 marzo
	Tracción	4c	Falla: 21 de marzo	4c	Falla: 28 de marzo
		F		I	
14 Días	Compresión	4c	Fundición: 8 marzo	4c	Fundición: 15 marzo
	Tracción	4c	Falla: 21 de marzo	4c	Falla: 28 de marzo
		A		D	
28 días	Compresión	4c	Fundición: 22 febrero	4c	Fundición: 1 marzo
	Tracción	4c	Falla: 21 de marzo	4c	Falla: 28 de marzo
		10%		0%	
		L		O	
7 días	Compresión	4c	Fundición: 20 marzo	4c	Fundición: 23 marzo
	Tracción	4c	Falla: 26 de marzo	4c	Falla: 29 de marzo
		G		J	
14 Días	Compresión	4c	Fundición: 13 marzo	4c	Fundición: 16 marzo
	Tracción	4c	Falla: 26 de marzo	4c	Falla: 29 de marzo
		B		E	
28 días	Compresión	4c	Fundición: 27 febrero	4c	Fundición: 2 marzo
	Tracción	4c	Falla: 26 de marzo	4c	Falla: 29 de marzo
		8%			
		M			
7 días	Compresión	4c	Fundición: 20 marzo		
	Tracción	4c	Falla: 26 de marzo		
		H			
14 Días	Compresión	4c	Fundición: 13 marzo		
	Tracción	4c	Falla: 26 de marzo		
		C			
28 días	Compresión	4c	Fundición: 27 febrero		
	Tracción	4c	Falla: 26 de marzo		

Fuente: Autor

## 8.8 Ensayos monotónicos de resistencia

Para medir la resistencia de los cuerpos de prueba se realizan dos ensayos los cuales corresponden a resistencia a la compresión confinada y tracción indirecta (ver Tabla 8).

Tabla 8. Ensayos para determinar la resistencia de cuerpos de prueba.

Nombre	Descripción	Norma
<b>COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELO</b>	Consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados o a núcleos, a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla	I.N.V. E – 152 – 13
<b>ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA</b>	Consiste en aplicar una carga diametral en cilindros, para conocer el valor del esfuerzo de tensión del espécimen	I.N.V. E – 152 – 13

Fuente: Autor

### 8.8.1. Resistencia a la compresión confinada

#### ➤ Teoría

Este ensayo se realizó teniendo en cuenta los parámetros establecidos en la norma I.N.V. E – 152 – 13: “describe el ensayo para determinar la resistencia a la compresión no confinada de suelos cohesivos, mediante la aplicación de una carga axial con control de deformación. El ensayo se puede realizar sobre muestras inalteradas, remodeladas o compactadas”.

#### ✓ Deformación axial ( $\varepsilon_1$ )

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L}{L_0} * 100 \quad [15]$$

Donde:

$\Delta L$ : Cambio de longitud del espécimen, obtenido a partir de las lecturas de deformaciones o calculado por un dispositivo electrónico, mm;

#### ✓ Sección transversal media ( $A_0$ )

$$A = \frac{A_0}{\left[1 - \frac{\varepsilon_1}{100}\right]} \quad [16]$$

Donde:

$A_0$ : Área media inicial de la sección transversal de la muestra, mm<sup>2</sup>;

$\varepsilon_1$ : Deformación axial para una carga dada, %.

#### ✓ Esfuerzo compresivo ( $\sigma_c$ )



$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad [17]$$

Donde:

$P$ : Carga aplicada, kN;

$A$ : Área media correspondiente de la sección transversal, mm<sup>2</sup>;

✓ **Gráfico**

Se puede dibujar un gráfico que muestre la relación entre los esfuerzos de compresión (en las ordenadas) y la deformación axial (en las abscisas). Se selecciona el valor del esfuerzo de compresión máximo, o el esfuerzo de compresión al 15% de deformación axial, lo que se alcance primero, y se anota como la resistencia a la compresión inconfiada, qu.

➤ **Procedimiento**

Para iniciar con el proceso de falla a compresión de los cilindros primero fue necesario tomar todas las medidas de cada uno de los especímenes tanto la altura como el diámetro, esta lectura se realizó 3 veces y se promedió el resultado (ver Figura 18).

**Figura 18. Toma de diámetro y altura a cilindros**



**Fuente: Autor**

Luego de esto se procedió a llevar los cilindros a la máquina universal de ensayos MTS (ver Figura 19), ubicándolo de manera vertical y aplicándoles carga monotónica, es decir, sin variar el incremento de velocidad ni provocando ciclos de descarga. Cuando los especímenes llegaban al punto de rotura se daba por terminado ese ensayo y se realizaba la lectura de la carga máxima soportada, junto con la deformación máxima del mismo.

**Figura 19. Falla de cilindros a compresión inconfiada**



Fuente: Autor

### **8.8.2. Resistencia a tracción indirecta**

Para llevar a cabo este ensayo se realizó el mismo procedimiento descrito en la norma I.N.V. E – 152 – 13 pero en este caso se cambió el sentido de los cilindros a una posición horizontal para someterlos a tracción indirecta (ver Figura 20). Al llegar a la rotura se determinó el esfuerzo máximo y la deformación máxima de cada uno de los especímenes para posteriormente realizar la curva de deformación.

**Figura 20. Falla de cilindros a tracción indirecta**



Fuente: Autor

## 9. RESULTADOS

En el presente capítulo se abordan los resultados obtenidos como parte de la campaña de ensayos realizada en el presente trabajo investigativo.

### 9.2 Caracterización Física del suelo de estudio - Caolín

#### 9.2.1. Granulometría por hidrómetro

A continuación, se muestra una tabla resumen de los datos tomados en laboratorio, así como los resultados obtenidos para el cálculo del diámetro de las partículas del suelo de estudio.

**Tabla 9. Datos de ensayo granulométrico por hidrómetro 152-H**

Hidrómetro 152- H					
Tiempo (min)	Lectura hidrómetro (g/l)	Temperatura (°C)	Profundidad efectiva L (cm)	Diámetro partículas (cm)	
0	6	20,5	15,3		Arena fina
2	46	20,8	8,8	0,0281	
5	42	20,8	9,4	0,0184	
15	36	20,8	10,4	0,0112	
30	34	20,9	10,7	0,0080	
60	31	21	11,2	0,0058	Limos
120	30	21,1	11,4	0,0041	
250	28	22,2	11,7	0,0029	
1440	22	20	12,7	0,0013	

Fuente: Autor

Luego de finalizar este ensayo transcurridos 1440 minutos se obtiene que el diámetro de la partícula más pequeña es de 0.0013 cm y el de la más grande corresponde a 0.0281 cm por lo cual se puede clasificar el suelo de estudio en el rango de arena fina hasta un limo arcilloso.

#### 9.2.2. Gravedad Específica

A continuación, se exponen tanto los datos tomados en laboratorio como los calculados que fueron necesarios en la determinación de la gravedad específica del caolín.

**Tabla 10. Datos para determinar la gravedad específica del material**

Datos tomados en el laboratorio	
Peso picnómetro + agua + muestra (g)	704,4
Temperatura picnómetro + agua + muestra (°C)	23,0
Peso picnómetro + agua (g)	665,4
Temperatura picnómetro + agua (°C)	21,0

**Continuación de la Tabla 10**

Peso picnómetro seco (g)	166,4
Peso muestra sumergido (g)	39,0
Resultados después de 24 horas en el horno	
Peso muestra seca + platón (g)	178,1
Peso platón (g)	115,4
Peso muestra seca (g)	62,7
Según tabla 128-2 (INV-128-13) se obtienen los siguientes valores	
Densidad H <sub>2</sub> O temperatura de ensayo (23°C)	0,99754
Densidad H <sub>2</sub> O temperatura de calibración (21°C)	0,99799
Coefficiente de corrección para 23°C	0,99858
Datos calculados	
Volumen en calibrado del picnómetro (cm <sup>3</sup> ) (V <sub>p</sub> )	500,005
Masa del picnómetro lleno de agua (g) (M <sub>pw,t</sub> )	665,175
Gravedad específica de los sólidos (G <sub>t</sub> )	2,67
Gravedad específica de los sólidos a 20°C (G <sub>t</sub> )	2,6671

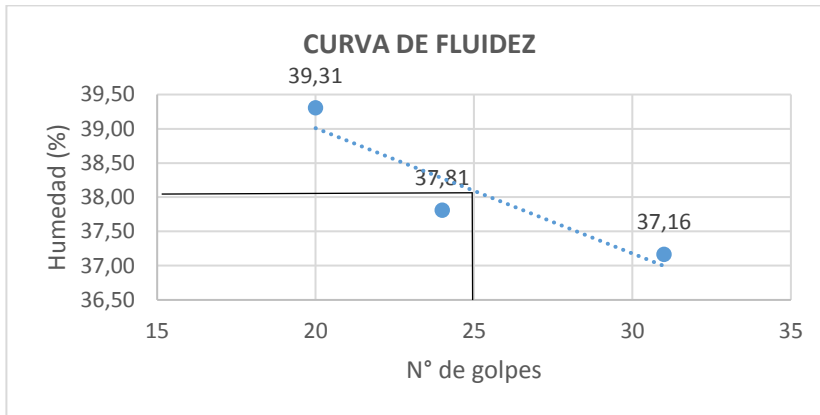
Fuente: Autor

La gravedad específica de los sólidos para el caolín corresponde a 2.66

**9.2.3. Límites de Atterberg**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cuanto a límites de Atterberg, que fueron obtenidos en laboratorio para el suelo tipo caolín sin tratar, es decir, con un cero por ciento de mezcla con cemento.

**Gráfica 1. Curva de fluidez para mezcla con 0% de cemento**



**Fuente: Autor**

*Límite líquido* = 38.1 %

*Límite plástico* = 23 %

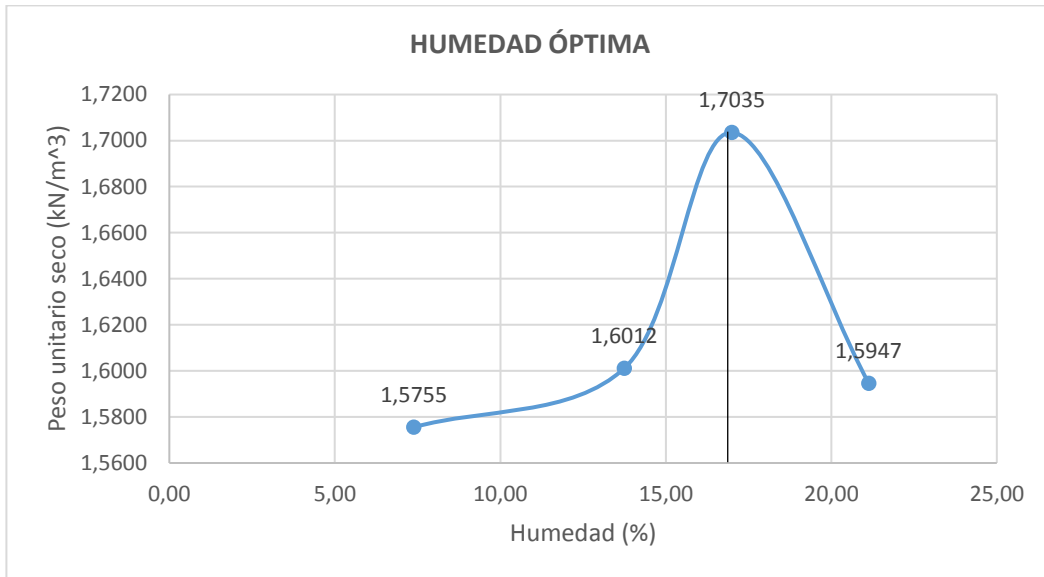
*Índice de plasticidad* = 38.1% – 23% = 15.1 %

### **9.3 Caracterización Mecánica del suelo de estudio**

#### **9.3.1. Ensayo Compactación Proctor normal**

A continuación, se muestra la gráfica de Peso unitario seco Vs Humedad del suelo de estudio sin contenido de cemento, es decir con un 0% de cemento que se determinó en laboratorio utilizando humedades del 10, 15, 20 y 25%.

**Gráfica 2. Humedad óptima para mezcla con 0% de cemento**



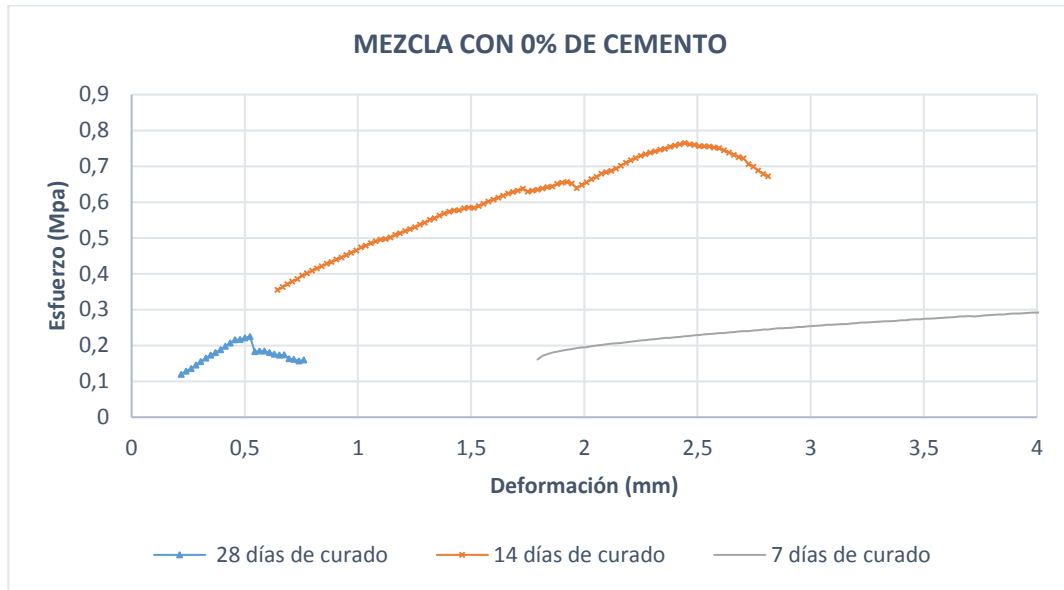
**Fuente: Autor**

En este caso la densidad máxima se obtiene con una humedad de 17%

### **9.3.2. Ensayos de compresión inconfiada**

La siguiente gráfica corresponde a los resultados obtenidos luego de someter las muestras con un 0% de cemento a ensayos de resistencia a la compresión inconfiada, para ello se tienen en cuenta tiempos de secado del suelo de 7, 14 y 28 días.

**Gráfica 3. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 0% de cemento - compresión**

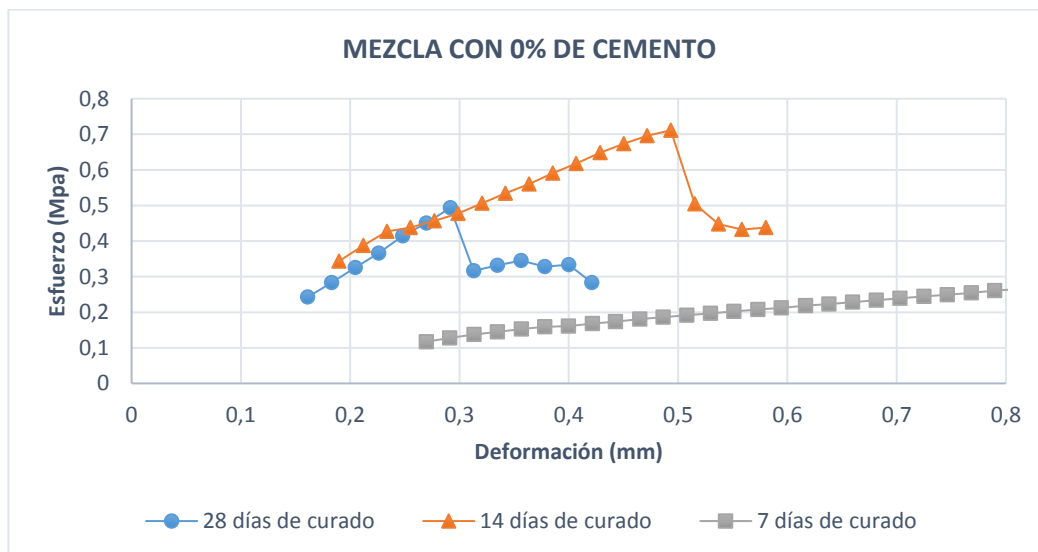


Fuente: Autor

### 9.3.3. Ensayo de Tracción Indirecta

A continuación, se muestra una gráfica comparativa de los resultados obtenidos luego de someter los cuerpos de prueba con 0% de cemento a ensayos de laboratorio de resistencia a la tracción indirecta, se tienen en cuenta tiempos de secado de 7, 14 y 28 días.

**Gráfica 4. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 0% de cemento – tracción**



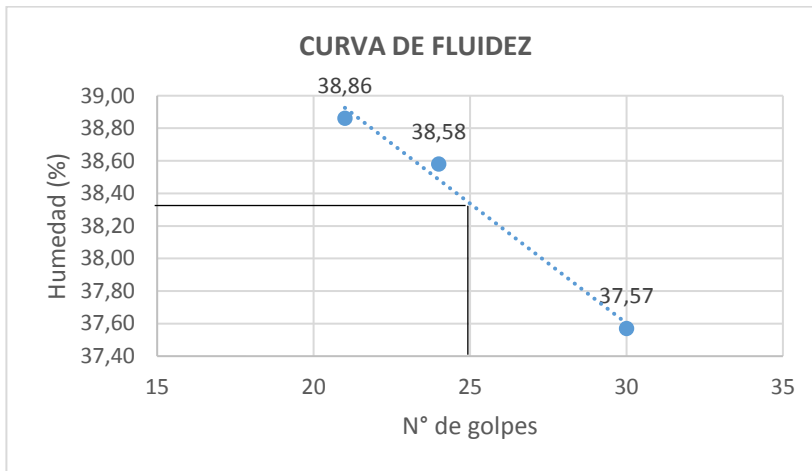
Fuente: Autor

## 9.4 Características de la mezcla Suelo – Cemento

### 9.4.1. Límites de atterberg

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cuanto a límites de Atterberg, que fueron obtenidos en laboratorio para las mezclas de suelo cemento correspondiente al 4%, 8%, 10% y 12% de cemento.

Gráfica 5. Curva de fluidez para mezcla con 4% de cemento



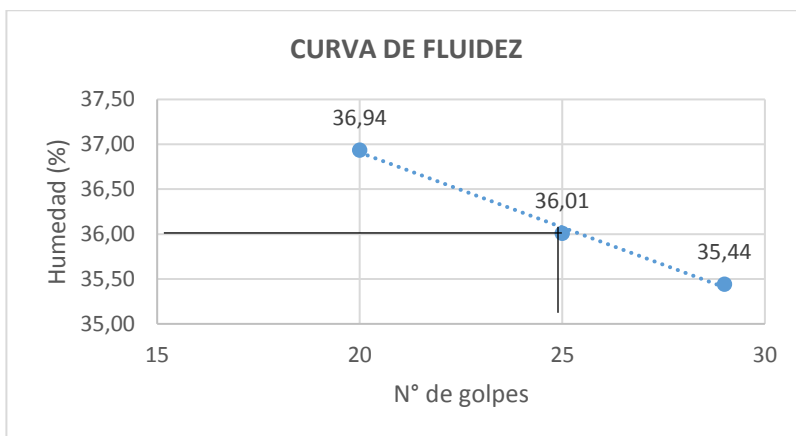
Fuente: Autor

Límite líquido = 38.35 %

Límite plástico = 23 %

Índice de plasticidad = 38.35% – 23% = 15.35 %

Gráfica 6. Curva de fluidez para mezcla con 8% de cemento



Fuente: Autor

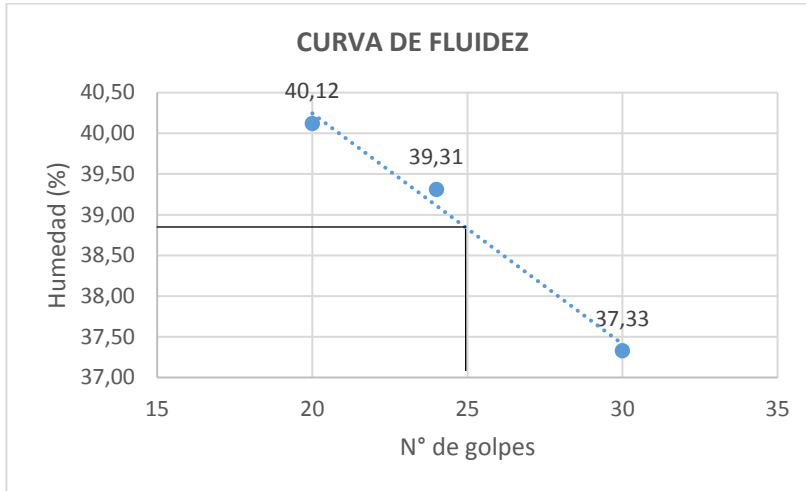


Límite líquido = 36.1 %

Límite plástico = 24 %

Índice de plasticidad = 36.1% – 24% = 12.1 %

**Gráfica 7. Curva de fluidez para mezcla con 10% de cemento**



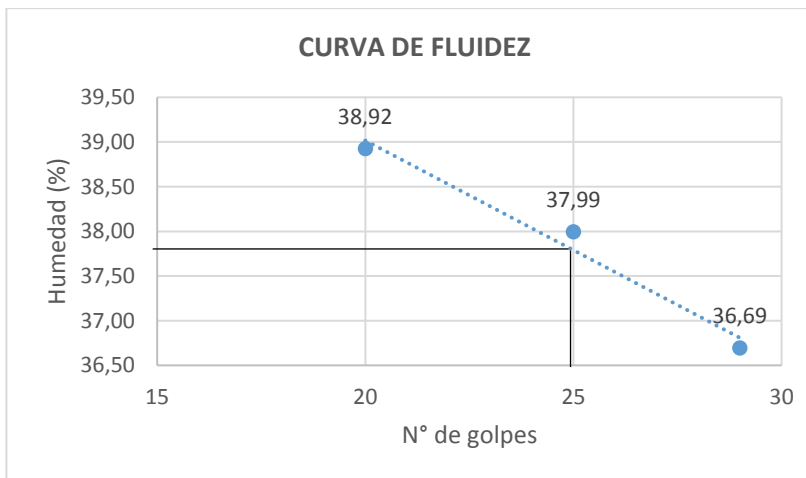
**Fuente: Autor**

Límite líquido = 38.8 %

Límite plástico = 24 %

Índice de plasticidad = 38.8% – 24% = 14.8 %

**Gráfica 8. Curva de fluidez para mezcla con 12% de cemento**



**Fuente: Autor**

Límite líquido = 37.75 %

Límite plástico = 25 %

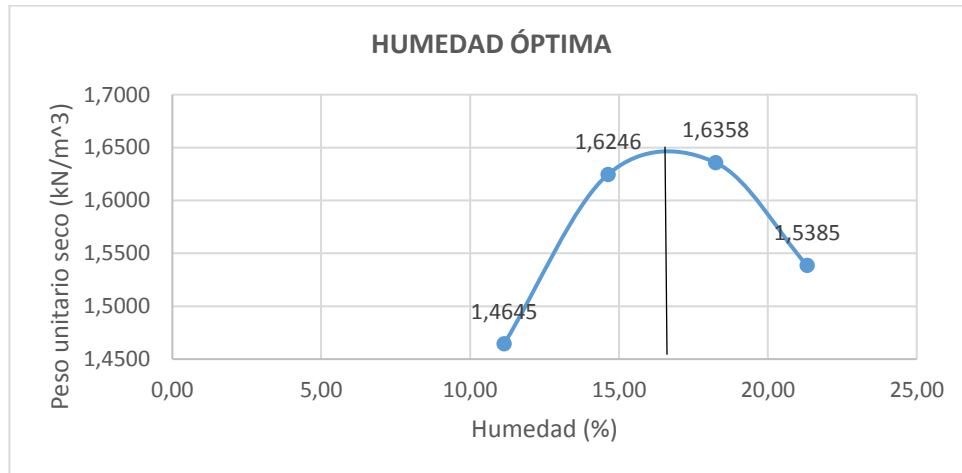
$\text{Índice de plasticidad} = 37.75\% - 25\% = 12.75\%$

## 9.5 Características Mecánica de la mezcla Suelo – Cemento

### 9.5.1. Proctor normal

La siguiente gráfica representa la humedad óptima requerida para obtener la máxima densidad en una mezcla con el 4% de contenido de cemento.

Gráfica 9. Humedad óptima para mezcla con 4% de cemento



Fuente: Autor

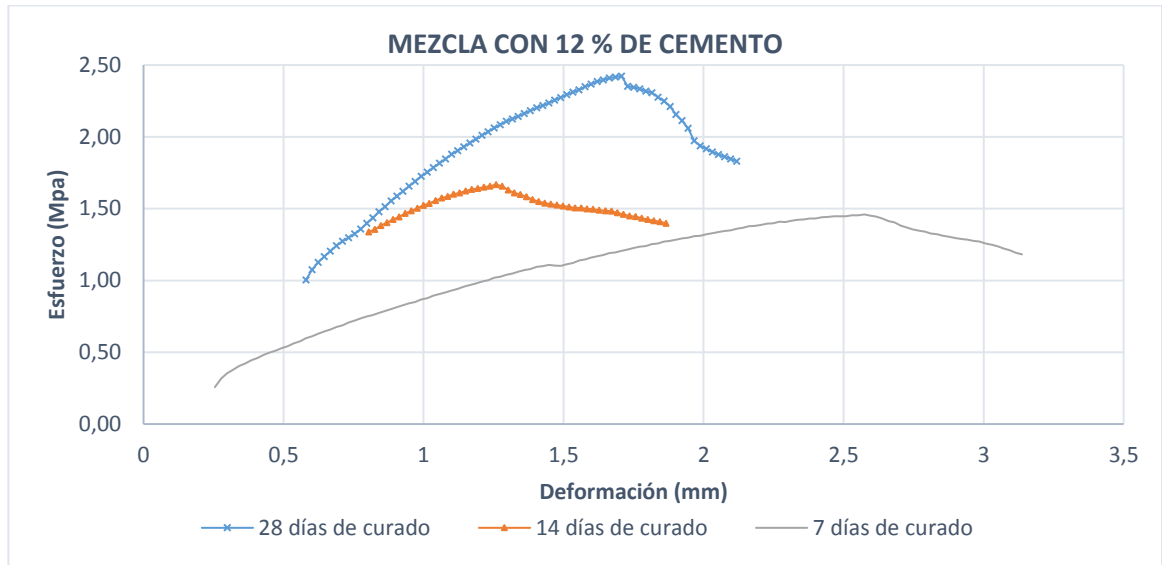
Para obtener la densidad máxima en este caso se requiere una humedad de 16.5%

### 9.5.2. Ensayo de compresión inconfiada

#### 9.5.2.1. Según el porcentaje de cemento

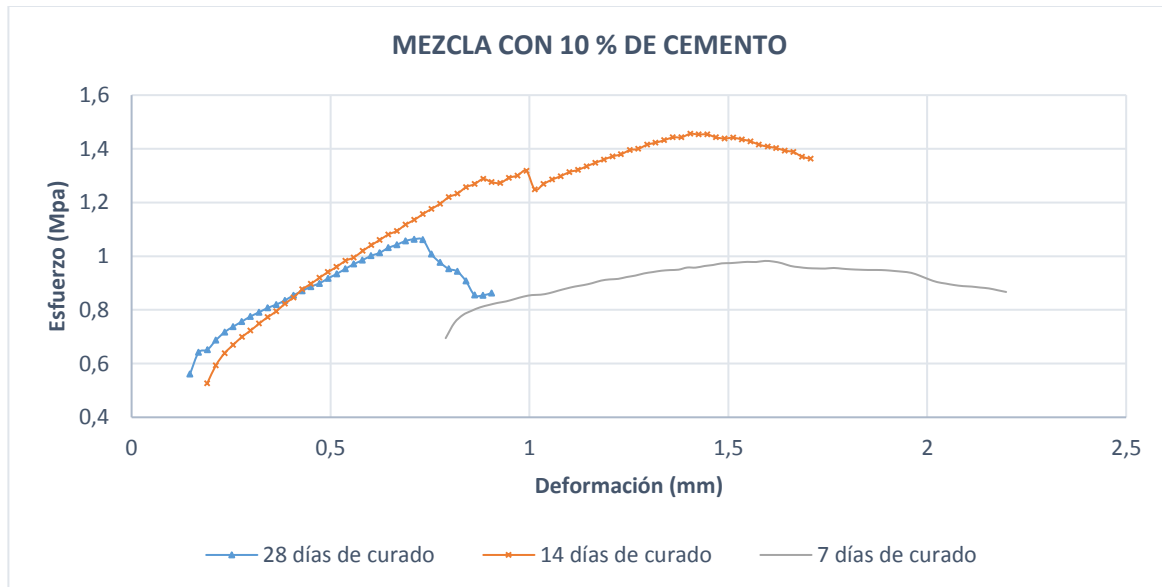
A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a la resistencia a compresión de la mezcla de estudio con contenidos de 12%, 10%, 8% y 4% de cemento, para ellas se tuvo en cuenta tiempos de curado de 7, 14 y 28 días.

**Gráfica 10. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 12% de cemento - compresión**



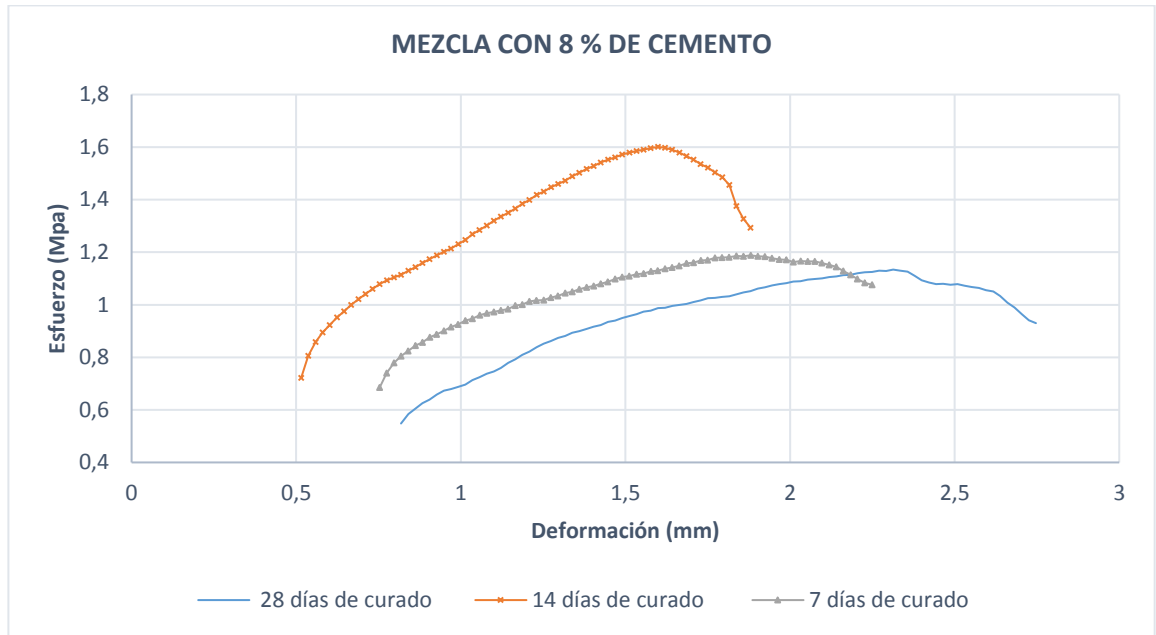
Fuente: Autor

**Gráfica 11. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 10% de cemento - compresión**



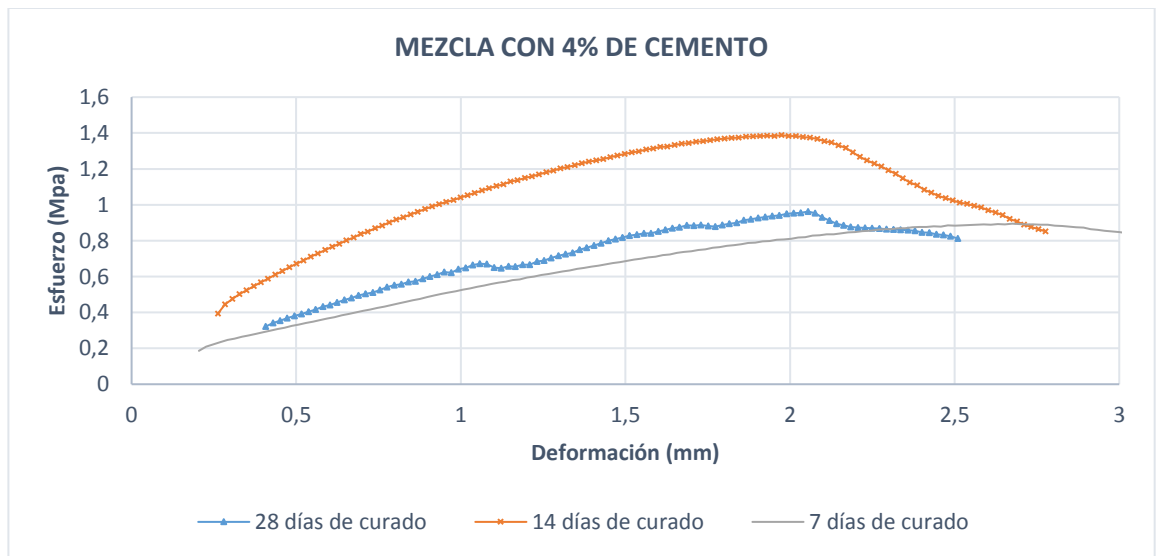
Fuente: Autor

**Gráfica 12. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 8% de cemento - compresión**



Fuente: Autor

**Gráfica 13. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 4% de cemento - compresión**



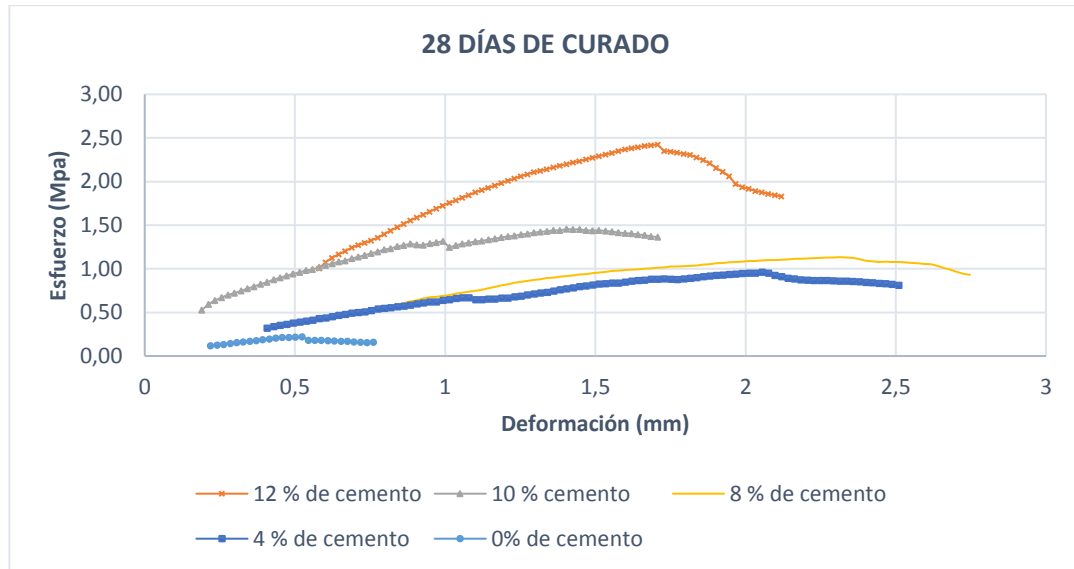
Fuente: Autor

### 9.5.2.2. Según los días de curado

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las mezclas evaluadas para un mismo periodo de curado. En estas graficas se pretende evidenciar la incidencia del

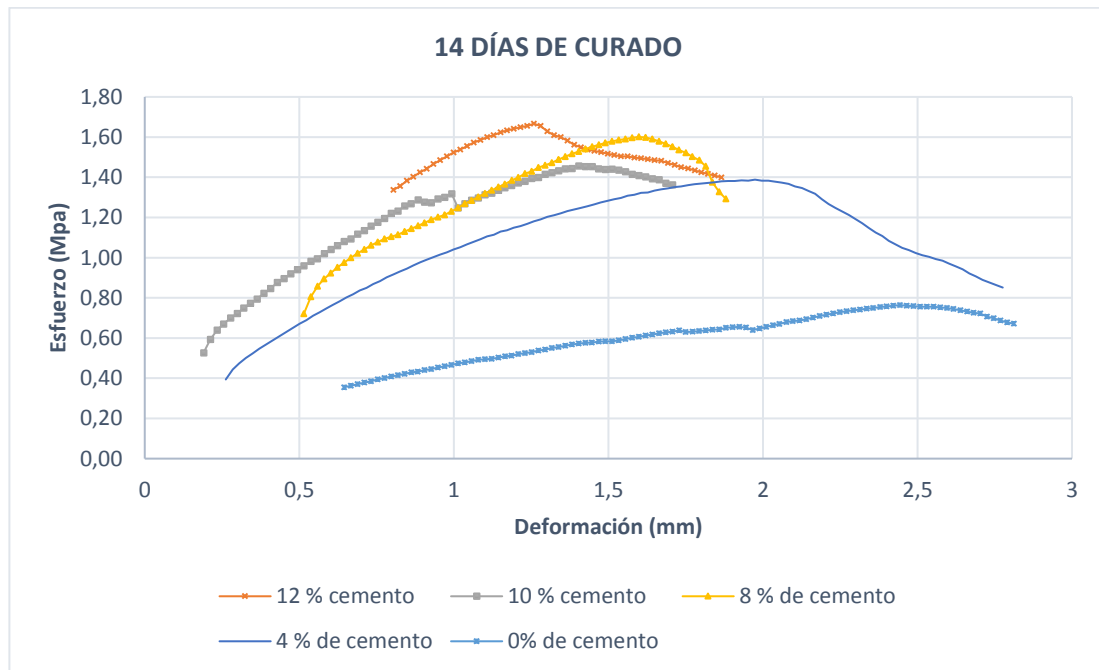
aumento del contenido de cemento sobre el comportamiento y la resistencia del suelo bajo condiciones similares de falla.

**Gráfica 14. Esfuerzo Vs Deformación a los 28 días de curado - compresión**



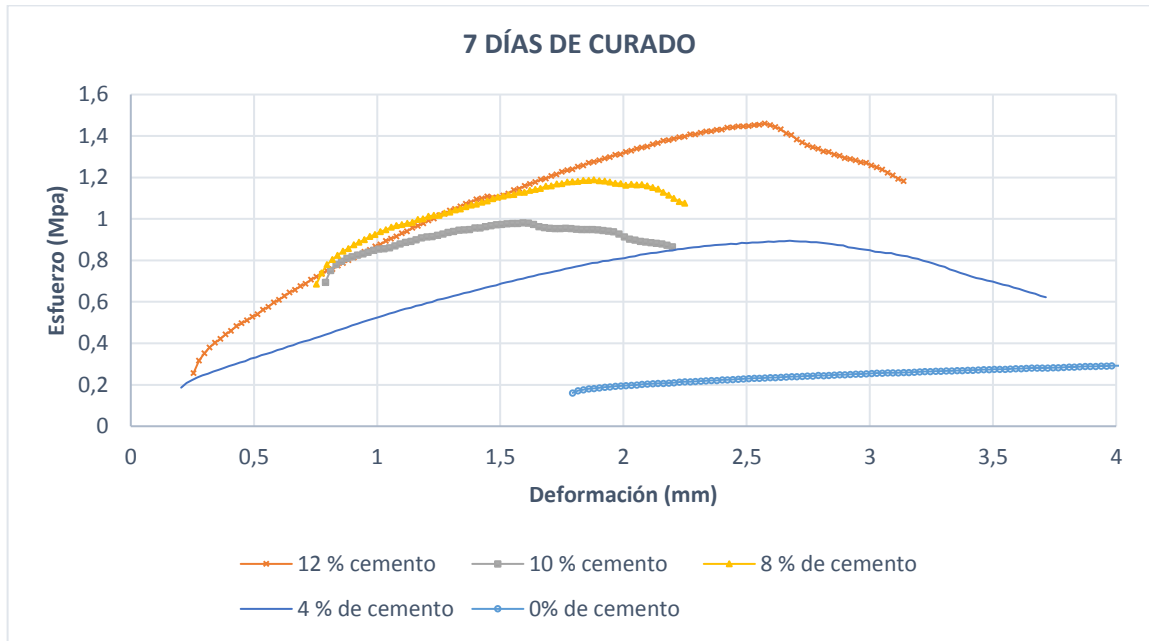
Fuente: Autor

**Gráfica 15. Esfuerzo Vs Deformación a los 14 días de curado - compresión**



Fuente: Autor

**Gráfica 16. Esfuerzo Vs Deformación a los 7 días de curado - compresión**

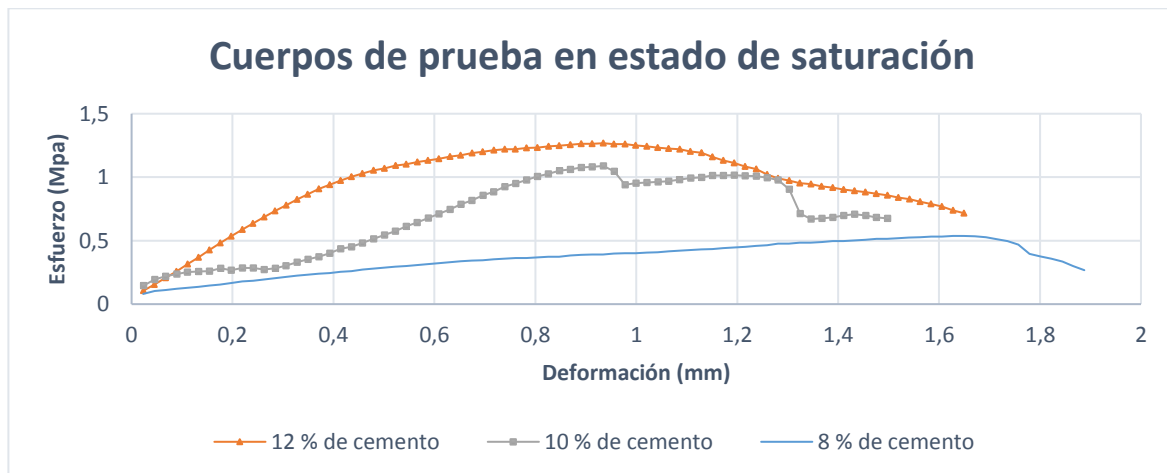


Fuente: Autor

### 9.5.2.3. En estado de saturación

A continuación, se muestra la gráfica de la resistencia a compresión para los cuerpos de prueba llevados a un estado de saturación. Se evalúan mezclas de 12%, 10% y 8% de cemento.

**Gráfica 17. Esfuerzo Vs Deformación en estado de saturación - compresión**

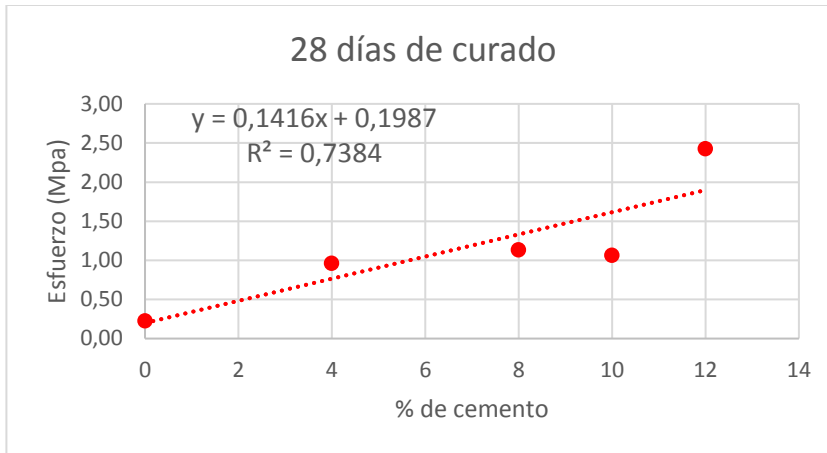


Fuente: Autor

#### 9.5.2.4. Envoltentes de falla

A continuación, se muestran las envoltentes que describen el comportamiento de la mezcla de estudio evaluadas a 7, 14 y 28 días de curado.

**Gráfica 18. Envoltente para 28 días de curado – Compresión**



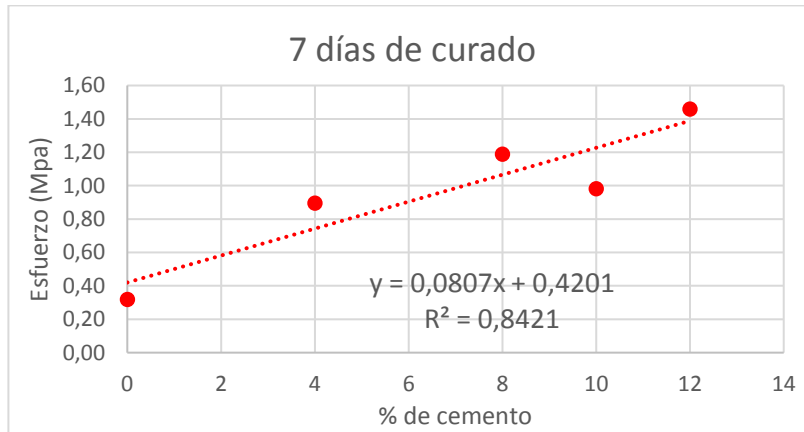
Fuente: Autor

**Gráfica 19. Envoltente para 14 días de curado – Compresión**



Fuente: Autor

**Gráfica 20. Envoltente para 7 días de curado – Compresión**



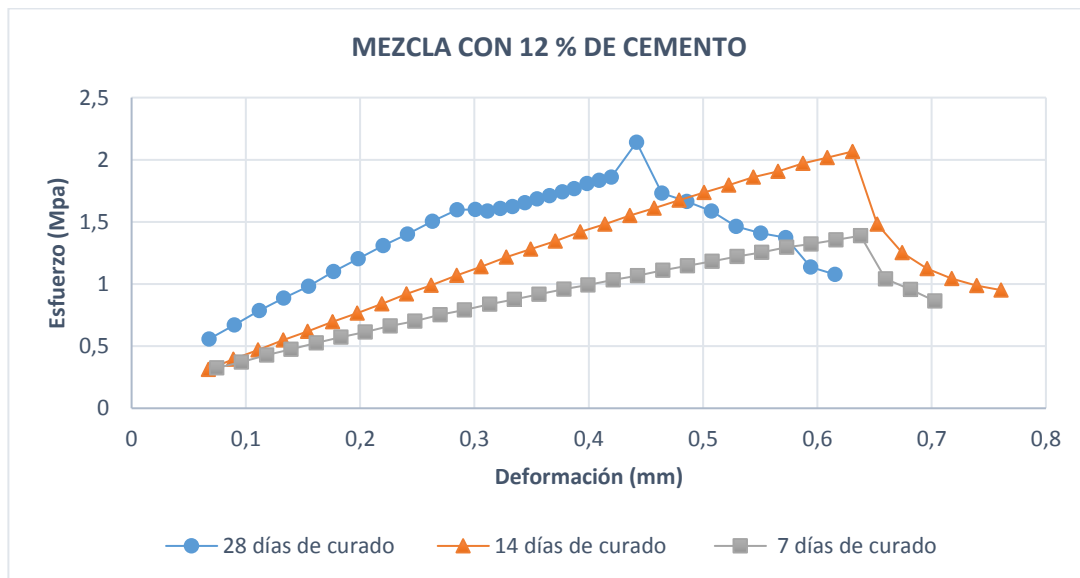
Fuente: Autor

### 9.5.3. Ensayos de resistencia a la tracción indirecta

#### 9.5.3.1. Según el porcentaje de cemento

A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a la resistencia a tracción indirecta de la mezcla de estudio con contenidos de 12%, 10%, 8% y 4% de cemento, para ellas se tuvo en cuenta tiempos de curado de 7, 14 y 28 días.

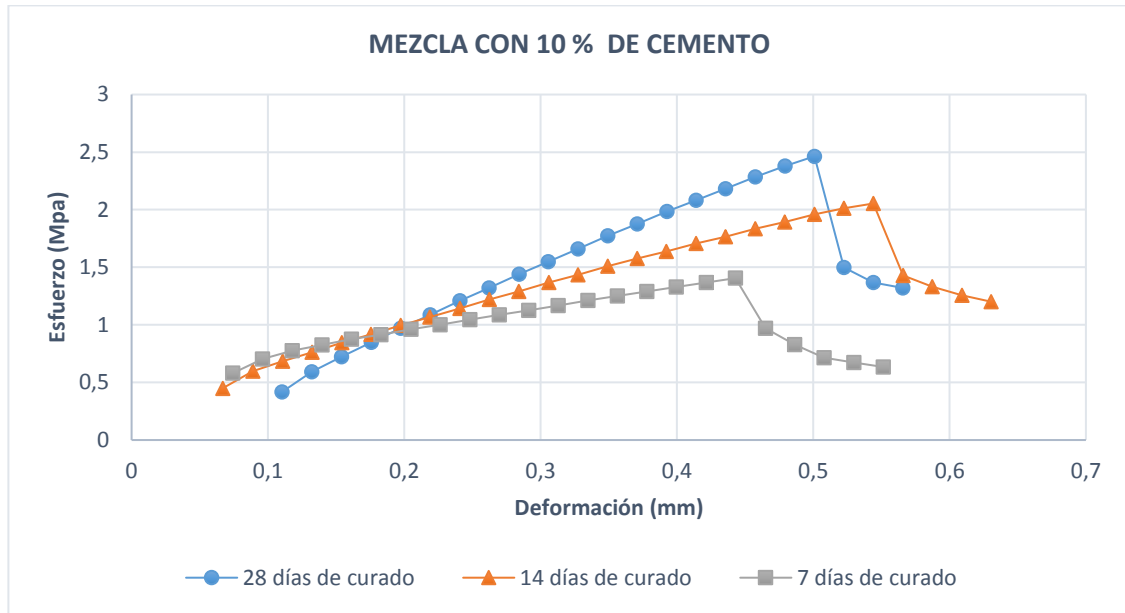
**Gráfica 21. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 12% de cemento – tracción**



Fuente: Autor

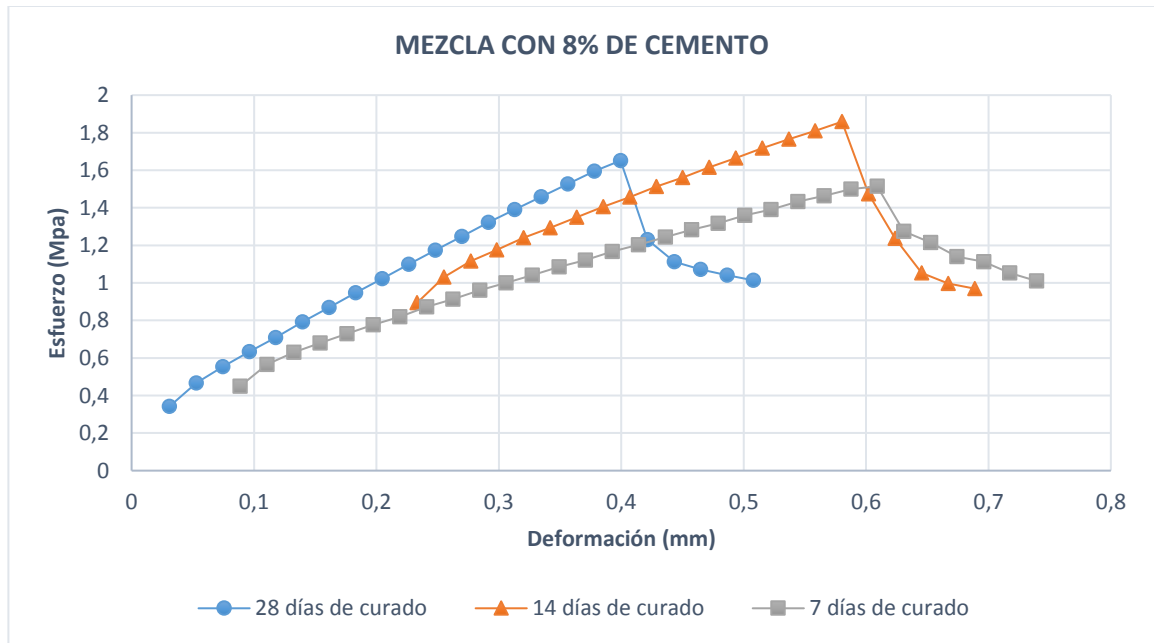


Gráfica 22. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 10% de cemento – tracción



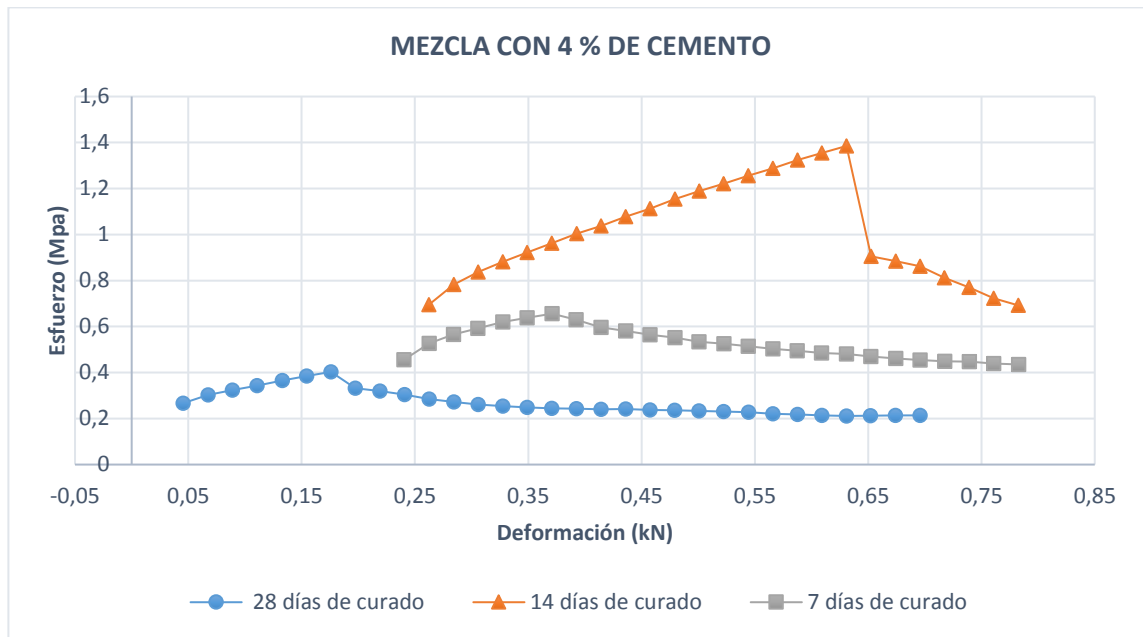
Fuente: Autor

Gráfica 23. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 8% de cemento – tracción



Fuente: Autor

**Gráfica 24. Esfuerzo Vs Deformación para mezcla con 4% de cemento – tracción**

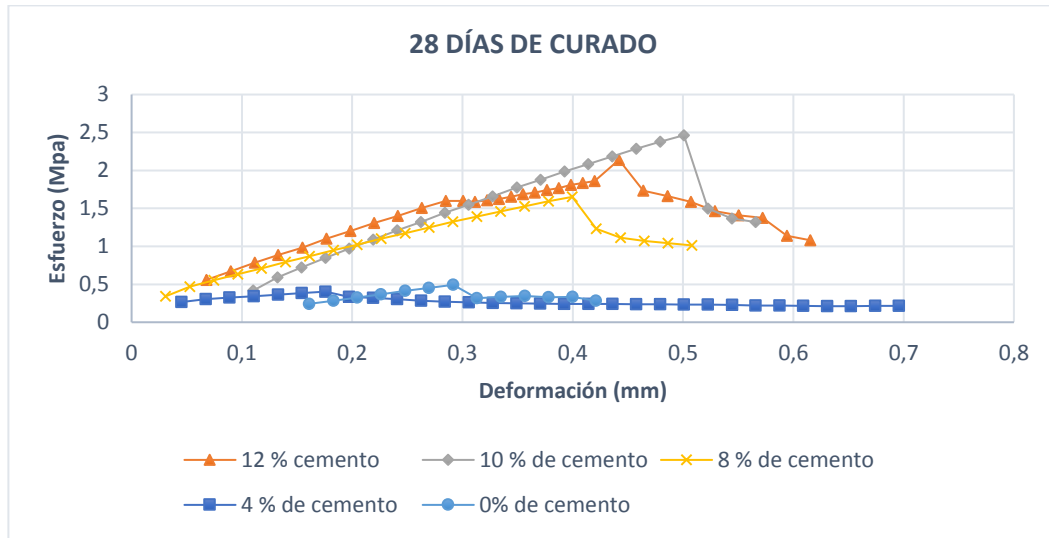


Fuente: Autor

### 9.5.3.2. Según los días de curado

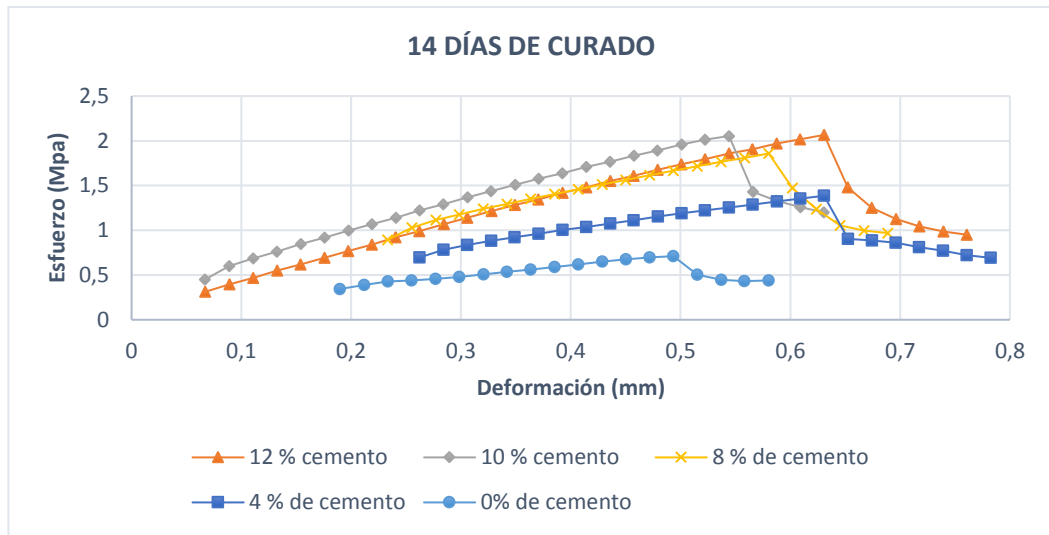
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las mezclas evaluadas para un mismo periodo de curado. En estas graficas se pretende evidenciar la incidencia del aumento del contenido de cemento sobre el comportamiento y la resistencia del suelo bajo condiciones similares de falla a la tracción indirecta.

**Gráfica 25. Esfuerzo Vs Deformación a los 28 días de curado – tracción**



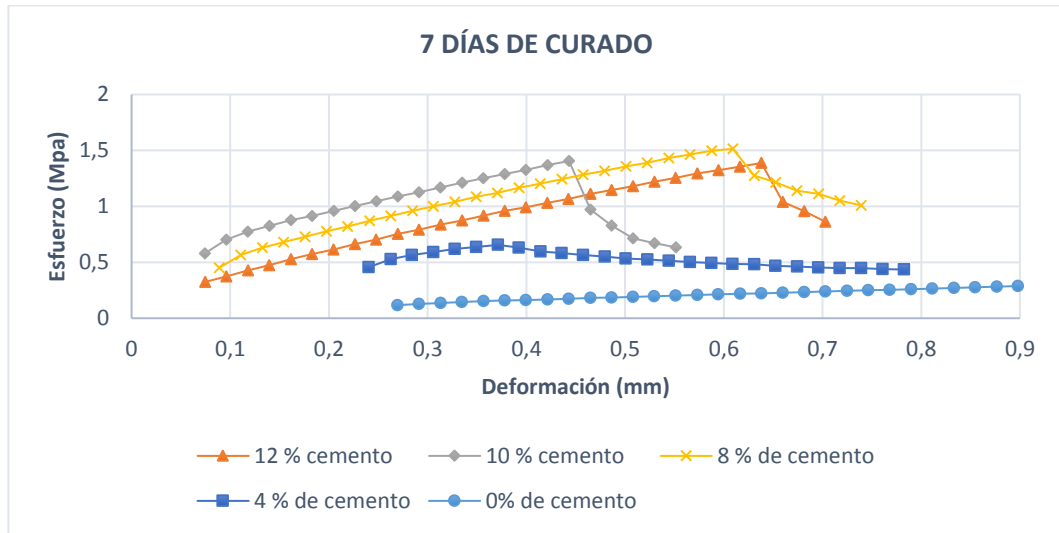
Fuente: Autor

**Gráfica 26. Esfuerzo Vs Deformación a los 14 días de curado – tracción**



Fuente: Autor

**Gráfica 27. Esfuerzo Vs Deformación a los 7 días de curado – tracción**

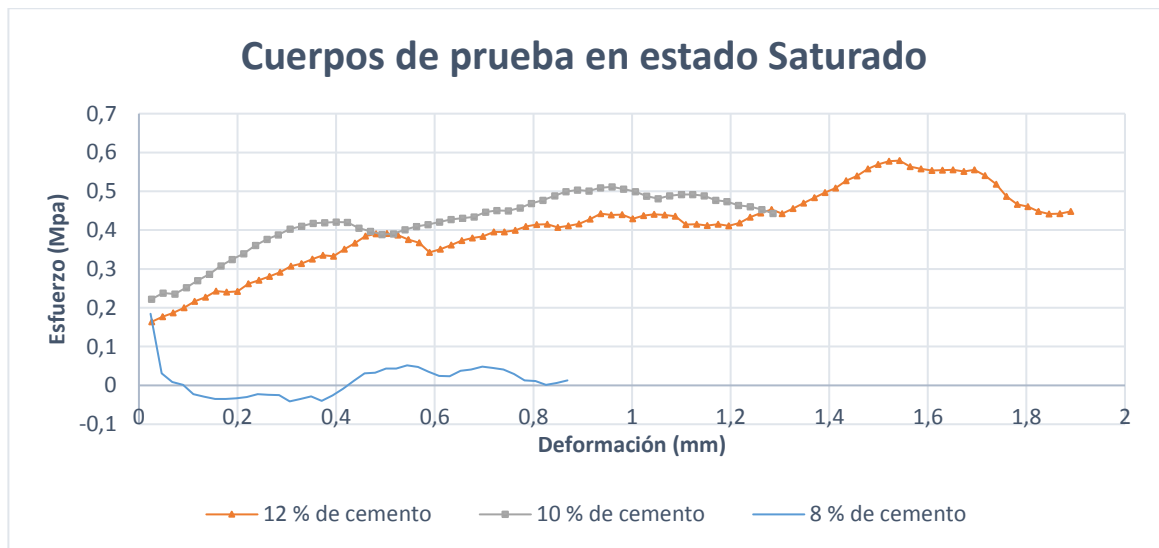


Fuente: Autor

### 9.5.3.3. En estado de saturación

La siguiente gráfica corresponde a la resistencia máxima de los cuerpos de prueba con 8%, 10% y 12% de cemento sometidos a ensayos de tracción indirecta, siendo llevados a un estado de saturación.

**Gráfica 28. Esfuerzo Vs Deformación en estado de saturación – tracción**

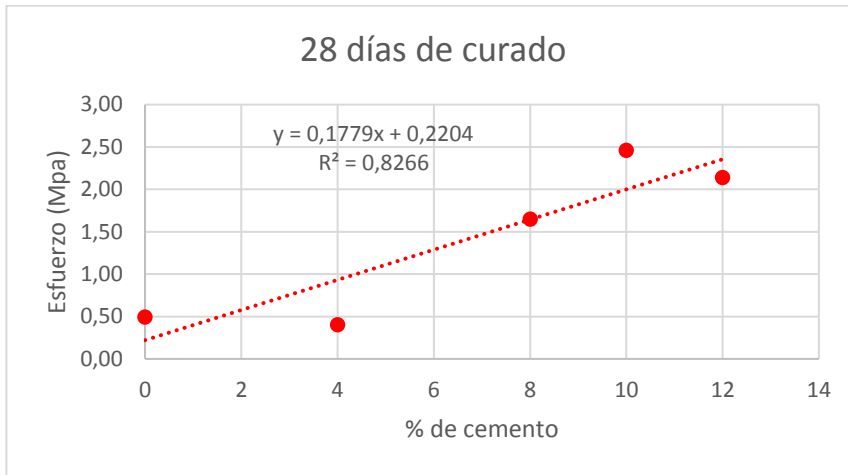


Fuente: Autor

### 9.5.3.4. Envoltentes de falla

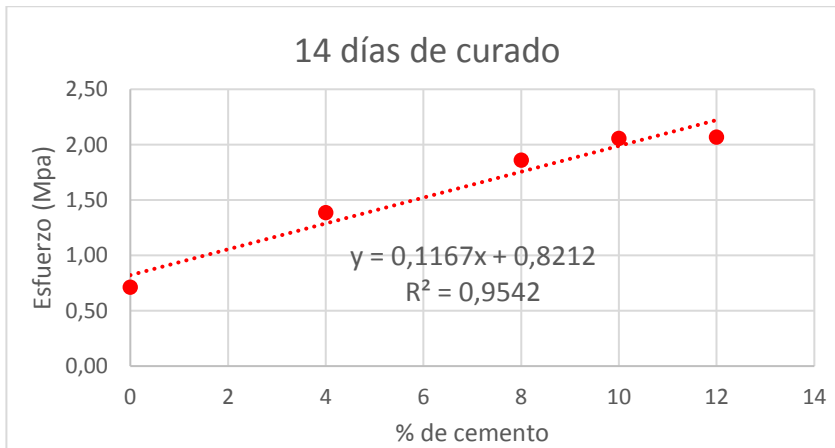
Las siguientes gráficas representan el comportamiento del material de estudio mediante envoltentes, siendo sometido a cargas de tracción indirecta. En estas gráficas se tienen en cuenta los diferentes porcentajes y los tiempos de curado de 7, 14 y 28 días.

**Gráfica 29. Envoltente para 28 días de curado – Tracción**



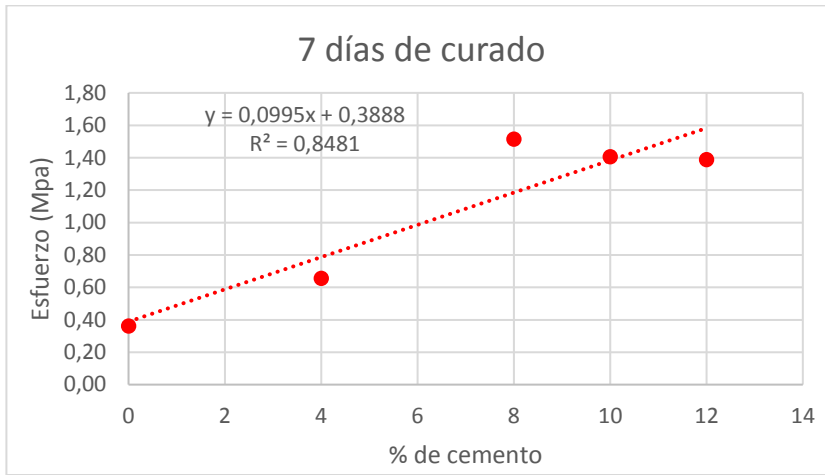
Fuente: Autor

**Gráfica 30. Envoltente para 14 días de curado – Tracción**



Fuente: Autor

**Gráfica 31. Envoltente para 7 días de curado – Tracción**



**Fuente: Autor**

## 10. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Según la Gráfica 8 se puede afirmar que la variación del índice de plasticidad el cual inicia con un 15.1 % teniendo 0% de cemento y disminuye hasta 12.75% con un 12% de cemento es una razón válida para decir que el caolín ante la presencia de cemento pasa de un estado plástico a un estado sólido con mayor rapidez aún sin haber dejado fraguar la mezcla. De esta manera el cemento cumple la función de ser un agente que controla el índice de plasticidad del suelo del estudio, provocando un aumento en el límite plástico y por consiguiente una disminución del límite líquido.

Cabe resaltar que la mezcla con un 0% de cemento no debería tener tiempos de curado puesto que este es un proceso que se realiza cuando hay presencia de cemento. Pero en este caso el curado se analiza como un tiempo de secado de los cilindros con 100% de caolín. Se puede observar en la Gráfica 3 que a mayor tiempo de secado del suelo la rotura se presenta con una deformación menor, es decir, el cuerpo de prueba falla mucho más rápido. Este fenómeno está asociado a la falla a tracción, ya que tiene un comportamiento frágil en el cual al llegar al momento de rotura disminuye súbitamente su resistencia, es por esto que se evidencia un pico y una caída de resistencia de alta pendiente en la Gráfica 22.

En la Gráfica 10 se puede observar que los cilindros con 12 % de cemento y 28 días de curado alcanzan una resistencia máxima de 2.42 Mpa, mientras que los que tienen 14 días de curado llegan hasta 1.66 Mpa y los de 7 días 1.46 Mpa. Es decir, que las propiedades de fraguado del cemento aumentaron en un 40% la resistencia del material desde los 7 días hasta los 28. Pese a lo anteriormente argumentado, según la Gráfica 11 se puede decir que como prueba de una desecación del cemento y posiblemente una falencia en el procedimiento de curado, la mezcla con 10% de cemento a los 14 días ofrece un mejor desempeño, ya que no pierde humedad y esto se puede ver evidenciado en que la mezcla con 14 días solo disminuye su resistencia en un 12% mientras que la de 28 días disminuye en un 55%.

El tiempo de curado indudablemente es fundamental en una mezcla de suelo con alto contenido de cemento para lograr alcanzar su resistencia máxima, como por ejemplo en el caso del 12 % de cemento, por otra parte, este mismo tiempo es el que provoca una disminución de la resistencia en las mezclas donde el contenido es menor, por esto se puede observar una relación directamente proporcional donde al disminuir el contenido de cemento también disminuye la resistencia máxima. Además, A medida que disminuye el contenido de cemento en la mezcla el material tiene un comportamiento más frágil ante la ausencia del agua, eso se demuestra en la Gráfica 12 ya que, al fallar el cilindro correspondiente a los 28 días de curado, ya que su resistencia es menor en un 30% comparada con la resistencia de los 28 días de curado. Este mismo fenómeno de disminución en la resistencia se presenta para el 10%, 8% y 4% de cemento fallados a compresión confinada.

En la Gráfica 4 se puede observar que el cilindro con 7 días de secado tiene una deformación muy alta cuando es sometido a tracción comparada con la de los 14 y 28 días, esto indica un comportamiento plástico ante cargas muy bajas por parte del material, al igual que ocurre con las cargas a compresión. Lo mismo ocurre cuando la mezcla posee un 0% y 4% de cemento, puesto que las deformaciones son mayores y las resistencias

máximas disminuyen. Por esto la estabilización de este tipo de suelos permite evitar estas deformaciones excesivas, mitigando así los asentamientos del terreno.

Los cilindros de caolín con contenidos de cemento inferiores al 4% al ser llevados a un estado de saturación se disolvieron en un lapso no mayor a 24 horas. Además de esto la resistencia a la compresión inconfiada para los cilindros con contenidos de cemento de 8%, 10% y 12% presentaron una disminución en la resistencia a la compresión de aproximadamente el 50% según la Gráfica 17. Así mismo la resistencia máxima a tracción de la muestra con 12 % de cemento disminuyó en un 75 %.

La curva de comportamiento del material tiene una tendencia lineal creciente la cual indica que a mayor porcentaje de cemento aumenta la resistencia de la mezcla. Por esto la mayor resistencia obtenida en esta investigación es la del 12% de cemento a compresión. La diferencia entre las resistencias obtenidas para los valores del 8%, 10% y 12% a la tracción varían alrededor de 0.2 Mpa a los 14 días de curado. Es decir que manejando un porcentaje del 8% se obtendrá una resistencia muy similar a la obtenida con el 12% de cemento.

Tanto a los 7, 14 como 28 días de curado los cilindros de prueba correspondientes al 10% de cemento presentaron una disminución en la resistencia comparados con los del 8% de cemento. Este fenómeno es de difícil explicación ya que al llegar al 12% de cemento la resistencia vuelve a aumentar linealmente. Caso contrario ocurre con la tracción ya que se evidencia que a los 28 días de curado el porcentaje de cemento que presenta una mayor resistencia corresponde al 10%, siendo dicha resistencia un 13% superior a la del 12% de cemento.

Al igual que el comportamiento a compresión se puede decir que cuando el contenido de cemento disminuye hasta un 4% la resistencia máxima se determina a los 14 días de curado, por consiguiente, se puede afirmar que el cemento en tan bajos porcentajes no brinda un aporte significativo a la resistencia a compresión ni a tracción.

Como se nombraba anteriormente, el tiempo de curado afecta directamente la resistencia de los cilindros con contenidos de cemento superiores al 10 %, por esto a los 14 días la mezcla con un 12% de cemento presentó una disminución de 30% en la resistencia máxima ya que no se garantizó el tiempo necesario para el correcto fraguado del cemento. En el caso de tracción indirecta los cuerpos de prueba presentan una falla mucho más rápida y esta es debida a que la longitud de falla es más corta, es decir se tiene una relación de 0.5 veces la altura del cilindro.



## 11. CONCLUSIONES

- El caolín, como la gran mayoría de suelos finos, presenta un comportamiento frágil ante la ausencia del agua, el cual se pudo compensar con un porcentaje del 12% de cemento, ya que este aumentó considerablemente el enlace entre sus partículas y por consiguiente su resistencia. Por otra parte, se puede decir que el estado de saturación en el material también es un problema, puesto que esto provoca que el suelo sin ningún tipo de adición se desintegre, perdiendo sus propiedades de resistencia mecánica y que el mismo suelo estabilizado con cemento en cantidades superiores al 8% disminuya hasta en un 50 % su resistencia.
- Para los suelos finos estabilizados con cemento se debe garantizar que el agua debida a las condiciones climáticas no va afectar la resistencia del terreno, por ello se requiere tener buenos sistemas de drenaje o bien sea aumentar la impermeabilidad del material.
- Se obtiene la mayor resistencia a la compresión inconfiada a los 28 días de curado con un contenido de 12% de cemento alcanzando una resistencia última de 2.42 Mpa lo cual según González Vallejo<sup>24</sup> corresponde con valores obtenidos para rocas blandas tipo Arcillolitas, Lutitas entre otras. Esto indica una relación directamente proporcional entre el porcentaje de cemento y el esfuerzo máximo soportado por el suelo.
- El cemento funciona muy bien como agente estabilizador de suelos, en este caso se comprobó que los porcentajes superiores al 8 % de cemento en la mezcla mejoran considerablemente la resistencia ante cargas monotónicas. Por otra parte cabe resaltar que estos contenidos del aglomerante son bastante altos y que si se quiere estabilizar una vía de gran longitud con un alto contenido de caolín o suelo fino el costo puede llegar a ser elevado, sin embargo, a nivel académico y experimental el presente trabajo de grado pretendió evaluar contenidos de 10% y 12% con el propósito de obtener envoltentes que permitan diagnosticar una tendencia de comportamiento de largo alcance en dichos materiales
- Cuando se emplea el método de estabilización de suelos con la adición de cemento es de suma importancia garantizar el contenido óptimo de agua y el tiempo de curado mínimo para lograr obtener la resistencia máxima requerida por el diseño, ya que como se observó en los resultados la resistencia máxima de las mezclas con 12% de cemento presentaba una disminución cuando eran menores los tiempos de curado.
- El agua tiene mayor incidencia en la resistencia a la tracción indirecta de los cuerpos de prueba que a compresión inconfiada, ya que según los datos obtenidos la resistencia a la tracción disminuyó en un 75% mientras que la resistencia a la compresión solo lo hizo en un 50%.

---

<sup>24</sup> VALLEJO, LUIS I. GONZÁLEZ: Ingeniería geológica. Madrid, 2002. Editorial: Isabel Capella.

- Según las envolventes la mayor resistencia a la compresión es alcanzada con un porcentaje correspondiente al 12 % de cemento, mientras que a tracción el 10 % fue el que predominó en cuanto a los valores de resistencia.

## **12. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda utilizar un método que disminuya la permeabilidad en los suelos arcillosos antes de emplear una mezcla de cemento, debido a que el cemento aumenta la resistencia ante las cargas, pero no garantiza que el agua no ingresará en la mezcla.
- Ya que en este proyecto solo se estudia la resistencia a la compresión inconfiada y a la tracción indirecta, lo cual representa cargas permanentes, se recomienda realizar este análisis con cargas cíclicas, es decir con ensayos de módulo resiliente, además de esto se recomienda evaluar mezclas de caolín con otro tipo de aglomerantes para evaluar su resistencia mecánica.
- Ya que el curado de las muestras es muy importante al momento de estimar la resistencia máxima de los especímenes se recomienda utilizar membranas o algún otro dispositivo que permita mantener la humedad dentro de la muestra.

### 13. BIBLIOGRAFÍA

**ANCADE, ANTER, IECA** Manual de estabilización de suelos con cemento o cal [Libro]. - Madrid : Instituto español del cemento y sus aplicaciones (IECA), 2012. - 978-84-89702-23-3.

**ARGOS 360** en concreto [En línea] = Con suelo cemento, Rionegro recupera 144 km de vías rurales. - 06 de 10 de 2017. - 10 de 09 de 2018. - <https://colombia.argos.co/Acerca-de-Argos/Innovacion/Suelo-cemento-construccion-vias-terciarias>.

**CEMEX** cemexcolombia [En línea] = Cemento gris. - 2018. - 18 de 09 de 2018. - <https://www.cemexcolombia.com/productos/cementos/cemento-gris>.

**Daniel Ribeiro Raquel Néri , Rafaela Cardoso** Influence of Water Content in the UCS of Soil-Cement Mixtures for Different Cement Dosages [Informe] / Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa. - Lisboa, Portugal : [s.n.], 2016.

**DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN** Mejoramiento de vías terciarias-Vías de tercer orden [Informe] / DNP. - Bogotá, Colombia : [s.n.], 2018.

**ESCOBAR Enrique DUQUE ESCOBAR Gonzalo y Carlos Galeon** [Libro] = Estructura y características textuales del suelo. - 2016.

**FONSECA Ing. Alfonso MONTEJO** Ingeniería de pavimentos [Libro]. - Bogotá D.C : Universidad Católica de Colombia Ediciones y publicaciones, 2002. - 958-96036-2-9.

**GEORGE B. Sowers GEORGE F Sowers** Introducción a la mecánica de suelos y cimentaciones [Libro]. - México : EDITORIAL LIMUSA-WILEY S.A, 1972.

**GÓMEZ Ing. María Fernanda Serrano Guzmán Ing. Luz Marina Torrado** <http://decor.upbbga.edu.co> [En línea] = Determinación de los tamaños de las partículas de suelos afectados por derrames de hidrocarburos. - Pontificia Universidad Bolivariana, 2016. - 08 de 04 de 2019. - <http://decor.upbbga.edu.co/documents/1.%20Determinaci%C3%B3n%20de%20los%20tama%C3%B1os%20de%20las%20part%C3%ADculas%20de%20los%20suelos%20afectados%20por%20derrames%20de%20hidrocarburo..pdf>.

**Gómez Manuel Gerardo Parra** Estabilización de un suelo con cal y ceniza volante [Informe] / Universidad Católica de Colombia. - Bogotá D.C : [s.n.], 2018.

**IECA** IECA [En línea] = COMPONENTES Y PROPIEDADES DEL CEMENTO . - 26 de 03 de 2018. - 16 de 09 de 2018. - <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/>.

**INSTITUTO DEL CEMENTO PORTLAND ARGENTINO ICPA** [En línea] = Construcción de Bases y Subbases de Suelo Cemento. - 2015. - 19 de 09 de 2018. - <http://www.icpa.org.ar/publico/files/articulos-tecnicos/2015-07-Construccion-Suelo-Cemento.pdf>.

**INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS** [www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co) [En línea] = Estado de la Red Vial. - 21 de 06 de 2018. - 10 de 09 de 2018. -

<https://www.invias.gov.co/index.php/component/content/article/2-uncategorised/57-estado-de-la-red-vial>.

**INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INVIAS)** Normas de ensayo de materiales para carreteras [Informe]. - Bogotá D.C : Instituto Nacional de vías (INVIAS), 2013.

**INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS** Especificaciones generales de construcción de carreteras [Informe]. - 2013.

**INVIAS** [www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co) [En línea] = Programa de obra pública (Red primaria). - 31 de 12 de 2018. - 18 de 04 de 2019. - <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/seguimiento-a-proyectos-2016/8845-red-primaria-31-de-diciembre-2018/file>.

**Joaquim Tinoco António Alberto, Paulo da Venda, António Gomes** A Data-Driven Approach for qu Prediction of Laboratory Soil-Cement Mixtures [Informe] / University of Minho, Campus de Azurém, Guimarães. - Portugal : [s.n.], 2016.

**MARTÍNEZ Eduardo OLIVEROS** Esquema de mantenimiento y mejoramiento en vías terciarias: Colombia responde [Publicación periódica] // Revista de ingeniería . - Bogotá D.C : Universidad de los Andes , 2019.

**MINISTERIO DE TRANSPORTE** Manual de diseño geométrico de carreteras [En línea]. - 2008. - 21 de 09 de 2018. - <http://artemisa.unicauca.edu.co/~carboled/Libros/Manual%20de%20Diseno%20Geometrico%20de%20Carreteras.pdf>.

**Murad Abu-Farsakh Sanjay Dhakal, Qiming Chen** Laboratory characterization of cementitiously treated/stabilized very weak subgrade soil under cyclic loading [Informe] / LouisianaStateUniversity,BatonRouge. - Louisiana, United States : [s.n.], 2015.

**Nilo Cesar Consolia Pedro Miguel Vaz Ferreira, Chao-Sheng Tang, Sérgio Filipe Veloso Marquesa, Lucas Festugatoa, Marina Bellaver Corte** A unique relationship determining strength of silty/clayey soils – Portland cement mixes [Informe] / Department of Civil Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil. - Brazil, London : [s.n.], 2016.

**PNUD** [www.co.undp.org](http://www.co.undp.org) [En línea] = Objetivos de desarrollo del milenio . - 2015. - 10 de 09 de 2018. - <http://www.co.undp.org/content/dam/colombia/docs/ODM/undp-co-odsinformedoc-2015.pdf>.

**Portland Cement Association** SOIL-CEMENT INSPECTOR'S MANUAL [Informe]. - Orchard Road, Skokie, Illinois : [s.n.], 2001. - 60077-1083.

**Rafaela Cardoso Daniel Ribeiro, Raquel Néri** Bonding effect on the evolution with curing time of compressive and tensile strength of sand-cement mixtures [Informe] / nstituto Superior Técnico, University of Lisbon. - Portugal : [s.n.], 2017.

**S. Sasaniana T.A. Newson** Basic parameters governing the behaviour of cement-treated clays [Informe] / The University of Western Ontario. - London, ON, Canada : [s.n.], 2014.

**Sara Rios Catarina Ramos, António Viana da Fonseca, Nuno Cruz, Carlos Rodrigues** Colombian Soil Stabilized with Geopolymers for Low Cost Roads [Informe] / Faculty of Engineering (FEUP), Portugal. - Portugal : [s.n.], 2016.

**VALLEJO LUIS I. GONZÁLEZ DE** Ingeniería geológica [Sección de libro] // Ingeniería geológica. - Madrid : Isabel Capella, 2002.

**Younes Amini Amir Hamidi** Triaxial shear behavior of a cement-treated sand/gravel mixture [Informe] / School of Engineering, Kharazmi University. - Iran : [s.n.], 2014.