

8-2015

## **Evaluación de características físicas y mecánicas de una base estabilizada con cemento modificada con vidrio templado reciclado**

Sergio Andres Infante Ramos  
*Universidad de La Salle, Bogotá*

Follow this and additional works at: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil)



Part of the [Civil Engineering Commons](#)

---

### **Citación recomendada**

Infante Ramos, S. A. (2015). Evaluación de características físicas y mecánicas de una base estabilizada con cemento modificada con vidrio templado reciclado. Retrieved from [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_civil/30](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/30)

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Civil by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact [ciencia@lasalle.edu.co](mailto:ciencia@lasalle.edu.co).

EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UNA BASE  
ESTABILIZADA CON CEMENTO MODIFICADA CON VIDRIO TEMPLADO  
RECICLADO.

SERGIO ANDRES INFANTE RAMOS

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C.

2015

EVALUACIÓN DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UNA BASE  
ESTABILIZADA CON CEMENTO MODIFICADA CON VIDRIO TEMPLADO  
RECICLADO.

SERGIO ANDRES INFANTE RAMOS

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de  
Ingeniero Civil

Director temático

Ing. Sandra Ospina Lozano

Asesora metodológica

Mag. Marlene Cubillos Romero

UNIVERSIDAD DE LA SALLE  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTÁ D.C. 2015

**Nota de aceptación:**

---

---

---

---

---

---

---

---

**Firma del presidente del jurado**

---

**Firma del jurado**

---

**Firma del jurado**

**Bogotá, agosto de 2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

El autor expresa su agradecimiento a:

A todos los educadores de la Universidad de la Salle quienes contribuyeron a mi formación integral durante la carrera, motivándome a ser un buen profesional y que con su ejemplo de ética laboral contribuyeron para mi vida profesional.

A la Ingeniera Sandra Elodia Ospina Lozano, educadora de la Universidad de la Salle y directora de mi proyecto de grado, quien con sus conocimientos fue un apoyo vital para el resultado eficaz de este trabajo de grado.

A los Ingenieros Fernando Nieto y Martin Riascos docente de la Universidad de la Salle y jurados de mi trabajo de grado, por su colaboración y exigencia en el desarrollo del mismo.

A Marlene Cubillos Romero, magister en lingüística hispana, por su asesoría continua en el desarrollo metodológico de mi trabajo de grado.

A la Universidad De La Salle, por su apoyo incondicional en la realización de nuestras prácticas de laboratorio, instrumento ágil y eficaz para la sustentación práctica de nuestro trabajo de grado.

A todos mis familiares que aportaron a lo largo de este camino, que compartieron mis dificultades, aciertos y expectativas hasta llegar a este logro como profesional.

Gracias

## **DEDICATORIA**

A Dios y a la Santísima Virgen María quienes fueron mi guía en esta etapa de mi vida para no desfallecer cuando las fuerzas eran escasas, gracias a la presencia que Dios hizo en mi vida pude seguir adelante en mi formación como profesional sin dejar de lado mi crecimiento personal ante la sociedad.

A mis hermanos José Infante Ramos y Alexandra Infante Ramos, a mis padres José Clemente Infante Espitia y de forma especial a mi madre María Elvira Ramos Cárdenas quien siempre me sostuvo con su apoyo y confianza en mí, sin ella no hubiera sido posible cumplir este sueño ya que es quien me inspira siempre a seguir adelante.

A las personas que de una u otra forma estuvieron vinculados durante este proceso y que con su conocimiento y apoyo aportaron a mi conocimiento y que me impulsaron a culminar de forma satisfactoria este gran logro como profesional.

**Sergio Andrés Infante Ramos**

## CONTENIDO

<i>DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO</i> .....	12
Planteamiento del Problema .....	12
Delimitación .....	12
Justificación .....	14
 <i>OBJETIVOS</i> .....	 15
Objetivo General.....	15
Objetivos Específicos.....	15
 <i>MARCO REFERENCIAL</i> .....	 16
Antecedentes Teóricos.....	16
Marco Teórico .....	16
Marco Conceptual.....	18
Marco Normativo .....	19
 <i>CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL Y PROCESAMIENTO DE DATOS.</i> ..21	
1.1 Caracterización física del vidrio templado reciclado.....	21
1.2. Proceso de trituración del vidrio templado reciclado. ....	21
1.3. Metodología de trituración .....	22
 <i>CAPITULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL NATURAL</i> .....	 25
2.1. Requisitos del Artículo 341-07 INVIAS .....	25
2.2. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados INV E – 127 .....	28

2.3. Índices de alargamiento y aplanamiento INV E - 230.....	28
2.4. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles. INV E-218 .....	29
2.5. Límites de consistencia.....	30
2.5.1 Límite Líquido de los Suelos - I.N.V. E – 125 – 07.....	30
2.5.2. Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos - I.N.V. E – 126 – 07.....	31
2.6. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos INV E – 213 – 07 .....	32
2.7 Clasificación del material .....	36
 <i>CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL MATERIAL.....</i>	 38
3.1 Relaciones Humedad – Masa Unitaria de Mezclas de Suelo Cemento I.N.V. E – 806 – 07 .....	39
3.1.1 Mezclas de suelo – cemento VT 0%, VT5%, VT 10%, VT15%. .....	40
3.2. Resistencia a La Compresión de Cilindros Preparados de Suelo Cemento I.N.V. E809 – 07.....	42
3.3. Mezcla suelo – cemento – VT 0%, VT 5%, VT 10% y VT 15% .....	44
 <i>CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</i>	 48
 <i>CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</i>	 55
 <i>BIBLIOGRAFÍA.....</i>	 57
 <i>ANEXOS.....</i>	 59

**LISTA DE TABLAS**

Tabla 1: Plan de ensayos mezcla de suelo-cemento y suelo-cemento-vidrio templado.....13

Tabla 2. Numero de golpes necesarios para la trituración del vidrio templado. ....23

Tabla 3. Requisitos de los materiales para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland .....25

Tabla 4. Resumen ensayo de caras fracturadas .....28

Tabla 5. Resumen ensayo Índices de alargamiento y aplanamiento. ....29

Tabla 6. Resumen ensayo de desgaste de los agregados .....29

Tabla 7. Resumen de Ensayos – Características Físicas .....37

Tabla 8. Contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas de suelo- cemento según la PCA (Portland Cement Association).....38

Tabla 10. Porcentajes de agua usados en las mezclas. ....40

Tabla 11. Resultados - Ensayo de Compactación y Resistencia a la Compresión .....47

Tabla 12. Cuadro Comparativo Artículo 341 INVIAS 07 Vs Artículo 350 INVIAS 13 .....53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de recolección y trituración del vidrio templado.....	22
Figura 2. Curva granulométrica del vidrio templado triturado .....	24
Figura 3. Ficha técnica cemento CEMEX Tipo I.....	27
Figura 4. Curva de flujo- Material natural .....	31
Figura 5. Muestras de material después del ensayo de granulometría .....	32
Figura 6. Preparación del material para el ensayo de Compactación.....	34
Figura 7. Curvas Granulométricas de las mezclas. ....	35
Figura 8. Clasificación de suelos Sistema AAHSTO.....	36
Figura 9. Mezcla del material suelo – cemento – VT 10% ensayo de compactación.....	40
Figura 10. Graficas resistencia Vs Porcentaje de cemento .....	41
Figura 11. Extracción de la probeta y cuarto de curado de las probetas .....	43
Figura 12. Ensayo de resistencia a la compresión en la Maquina Versa Tester.....	43
Figura 13. Ensayo de resistencia a la compresión – Tipos de falla para las diferentes mezclas de Suelo-Cemento-Vidrio Templado .....	44
Figura 14. Graficas resistencia Vs Porcentaje de cemento .....	45
. Figura 15. Diagramas Esfuerzo Vs Deformación .....	46
Figura 16. Grafica de Resistencia Vs Porcentaje de vidrio.....	48
Figura 17. Grafica de Resistencia Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0% .....	49
Figura 18. Grafica Porcentaje de vidrio Vs Densidad Seca .....	49
Figura 19. Grafica de Densidad seca Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0% .....	50
Figura 20. Porcentaje de vidrio Vs Porcentaje de cemento.....	50
Figura 21. Grafica de Porcentaje de cemento Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0% .....	51
Figura 22. Grafica de Porcentaje de vidrio Vs Humedad optima .....	52
Figura 23. Grafica de Porcentaje de cemento Vs Humedad optima excluyendo la mezcla VT 0% .....	52
Figura 24. Grafica Porcentaje de cemento Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0% y Densidad Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0% .....	53

## **LISTA DE ANEXOS**

**Anexo A.** Formatos de Laboratorio (Caracterización física del material natural)

**Anexo B.** Formatos de Laboratorio (Caracterización mecánica del material)

**NOTA:** Considerando la extensión de las normas y especificaciones éstas son presentadas en medio magnético. Dichos documentos pueden ser consultados en la página web del INVIAS ([www.invias.gov.co](http://www.invias.gov.co)) en la sección Documentos Técnicos.

## INTRODUCCIÓN

En este documento se presenta el proyecto de investigación que se realizó para optar al título de Ingeniero Civil, este consistió en la construcción de una capa de base constituida por material pétreo estabilizado con cemento portland y vidrio templado reciclado. A su vez se destaca que el material modificador usado es un material que se obtiene del reciclaje, por lo tanto, se genera una conciencia amigable con el medio ambiente al disminuir la contaminación.

La ejecución del proyecto permitió caracterizar las propiedades físicas y mecánicas una base estabilizada con cemento combinada con un material alternativo (vidrio templado) y determinar si sus propiedades cumplen con las especificaciones técnicas nacionales (Invias 2007). En resumen, se determinó cómo se ve afectada la resistencia, la compresibilidad y la durabilidad de un suelo cemento que ha sido modificado con vidrio templado reciclado. Para efectuar este trabajo experimental se diseñó una base estabilizada con cemento y se caracterizó físico-mecánicamente. Posteriormente, se prepararon 3 muestras de suelo – vidrio templado y se determinó su porcentaje óptimo de cemento. Cada una de las muestras preparadas (cuatro en total) fue expuesta a las pruebas y ensayos exigidos por las entidades nacionales. Con base en los resultados obtenidos se determinó el porcentaje de vidrio templado que ofreció los resultados más favorables.

## DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

### *Planteamiento del Problema*

Las especificaciones de construcción y de materiales actualmente limitan el uso de diferentes agregados pétreos y la evolución de estos documentos sigue limitando los tipos de material con los cuales se puede trabajar cumpliendo la normatividad, se suma también que las fuentes de material adecuado para la utilización en bases de pavimentos asfálticos, rígidos y llenos estructurales cada día son más escasas y los costos de explotación está en constante aumento debido a la creciente dificultad para fabricar materiales que cumplan con la especificaciones.

Observando que se descarta la posibilidad de usar agregados de menor calidad que mejorados pueden ser utilizados. Es aquí donde radica la importancia de este trabajo de grado. Se pretende mejorar un material arcilloso con cemento y vidrio templado reciclado, este último se tomó de vehículos siniestrados, ayudando a la reutilización de un material que solo generara contaminación. (Invias, 2007)

### *Delimitación*

El alcance principal de este proyecto de grado es conocer la resistencia de la mezcla de suelo-cemento-vidrio templado y la afectación en la cantidad de cemento usado en la mezcla, para esto se realizaron cuatro (4) mezclas con 0%, 5%, 10% y 15% de vidrio templado reciclado respecto al peso de la mezcla suelo-cemento, para este fin se realizaran únicamente los ensayos que se muestran en la Tabla 1 y que son exigidos por el Artículo 341 Invias - 07

Tabla 1: Plan de ensayos mezcla de suelo-cemento y suelo-cemento-vidrio templado

INVE -07	Nombre	Vidrio templado	Material granular	Mezclas de suelo - cemento			
				VT 0%	VT 5%	VT 10%	VT 15%
104	Procedimientos para la preparación de muestras de suelo por cuarteo.	1 Muestra	-	-	-	-	-
213	Análisis de agregados gruesos y finos.	1 Muestra	1 Muestra	-	-	-	-
218	Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles.	-	1 Muestra	-	-	-	-
125	Determinación del límite líquido de los suelos.	-	1 Muestra	-	-	-	-
126	Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.	-	1 Muestra	-	-	-	-
227	Porcentaje de caras fracturadas en los agregados.	1 Muestra	1 Muestra	-	-	-	-
230	Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras.	1 Muestra	1 Muestra	-	-	-	-
806	Relaciones humedad masa unitaria de mezclas de suelo cemento.	-	-	9 Briquetas	9 Briquetas	9 Briquetas	9 Briquetas
809	Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo cemento.	-	-	9 Briquetas	9 Briquetas	9 Briquetas	9 Briquetas

VT: Vidrio Templado. VT 0%: Mezcla sin VT. VT 5%: Mezcla con 5%VT. VT 10%: Mezcla con 10%VT. VT15%: Mezcla con 15% vidrio Templado.

Fuente: Elaboración Propia.

## *Justificación*

De acuerdo con lo que se observa en los factores positivos que tiene el suelo-cemento como lo son a) El aporte a la solución de problemas de estabilidad, durabilidad, y economía, b) Material adecuado para diferentes tipos de vías, c) Reducción del impacto sobre el medio ambiente, d) Ventajas de la utilización de capas estabilizadas en pavimentos Rígidos y e) Ventajas de utilización de capas estabilizadas en pavimentos flexibles (Mejia, 2001). Se quiere proponer un material alternativo que aproveche las bondades de esta mezcla y se pueda encontrar una forma diferente de reciclar el vidrio.

El alcance principal de este proyecto de grado es conocer la resistencia de la mezcla de suelo-cemento-vidrio templado y la afectación en la cantidad de cemento usado en la mezcla, para esto se realizaron cuatro (4) tipos de mezcla. Los ensayos que se realizaron para este fin son:

- Ensayos de características físicas del agregado y de las mezclas.
- Ensayos de características mecánicas de las mezclas
- No se realizó ningún ensayo químico.
- Solo se desarrollaron los laboratorios con los que cuenta la Universidad de La Salle.

## OBJETIVOS

### *Objetivo General*

Evaluar las características físicas y mecánicas de una mezcla de suelo-cemento-vidrio templado con miras a establecer una comparación con la mezcla convencional.

### **Objetivos Específicos**

- Realizar los ensayos necesarios para conocer las propiedades físicas y mecánicas del agregado base para el diseño del suelo-cemento y de las mezclas suelo-cemento-vidrio templado.
- Plantear un método de trituración del vidrio para ser utilizado como agregado en una mezcla de suelo-cemento para usar en el laboratorio.
- Comparar los resultados de los ensayos de compresibilidad de un suelo cemento y de un suelo – cemento – vidrio templado reciclado.
- Establecer las ventajas de la implementación de un material alternativo en la mezcla de suelo – cemento.
- Plantear una mezcla de suelo cemento con vidrio templado reciclado como material alternativo de construcción.

## MARCO REFERENCIAL

### *Antecedentes Teóricos*

El proyecto de investigación que más se conoce hasta el momento, en cuanto al uso del vidrio como aditivo es el concreto translucido. Ésta creación revolucionaria fue inventada por los ingenieros civiles Joel Sossa Gutiérrez y Sergio Omar Galván en el año 2005 (Gonzalez, 2012). Este revolucionario cemento da la capacidad al concreto de ser treinta por ciento (30%) más liviano que el concreto normal, además de ser más estético para una construcción.

El concreto translucido, concreto con fibra de vidrio y el concreto reforzado con fibra de vidrio son productos que se encuentran en el mercado y que pueden cambiar la imagen sombría y gris que se encuentra en el concreto que se utiliza en las construcciones cotidianas, a esto se suman las propiedades mecánicas que se han encontrado y que son comunes en los productos ya mencionados, alto límite de elasticidad, alto módulo de rotura y su gran resistencia al impacto. En Colombia SIKA COLOMBIA S.A<sup>1</sup> (SIKA) es la empresa en la que más se ha dado importancia al concreto reforzado con fibra de vidrio en Colombia y tiene diversidad de productos con los cuales busca soluciones a problemas de ingeniería.

Luego de la investigación bibliográfica y de la aplicación del vidrio templado reciclado como aditivo en el concreto, se realizó una investigación exhaustiva en busca de su aplicación en el suelo-cemento, donde lamentablemente no se encontraron antecedentes que nos puedan servir como bases para la investigación.

### *Marco Teórico*

El continuo afán por obtener estructuras de pavimentos con relación beneficio/costo cada vez

---

<sup>1</sup> SIKA Colombia es una empresa dedicada a producir químicos para la construcción y la industria.

más altas, ha desencadenado importantes esfuerzos en la búsqueda de alternativas diferentes a las convencionales que puedan estar asociadas a múltiples ventajas. Es así, como surge la idea de mostrar desde el nivel más básico una metodología para que un sin número de suelos típicos en el país puedan brindar la posibilidad de mejorar su comportamiento ante la acción de las cargas del tránsito con la adición de pequeñas cantidades de cemento el cual ayuda a la estabilización del suelo.

La estabilización, es el primer paso para que las vías ofrezcan la mayor durabilidad una vez pavimentadas y así los entes territoriales hagan una buena inversión para beneficio de los ciudadanos.

En la antigüedad, los pueblos que lograban dominar la tecnología de materiales más avanzados, tales como el hierro, tenían superioridad sobre los pueblos que se encontraban todavía en la edad de piedra, por su bajo nivel de desarrollo en el área de los materiales (Mejia, 2001).

Hoy en día el hombre en su intento por mejorar las condiciones de vida, muchas veces, los cambios que realiza pueden repercutir desfavorablemente para las futuras generaciones. Por tal razón debe existir una conciencia global por parte de los ingenieros encargados de transformar los recursos.

La necesidad de materiales pétreos para obras de ingeniería, la construcción, mejoramiento y mantenimiento de vías, son necesidades que se deben suplir, pero se debe tener en cuenta que no puede ser una explotación indiscriminada del medio ambiente. A esto se suma que las fuentes de materiales adecuados para la utilización en bases de pavimentos asfálticos, rígidos y llenos estructurales cada día se hacen más escasas (Mejia, 2001).

Cuando se tienen en cuenta los daños irreparables que se pueden producir al medio ambiente, se puede buscar un equilibrio entre la humanidad, el desarrollo y la naturaleza; generando una optimización en la explotación de recursos. Esta investigación toma importancia ya que se generan nuevas alternativas como lo es el suelo-cemento modificado con vidrio templado reciclado.

### *Marco Conceptual*

Con la intención de complementar el objeto de la presente investigación, a continuación se define teóricamente el tipo de material con el cual se trabajó (suelo – cemento) y las características evaluadas.

**Base granular:** En los pavimentos flexibles la función principal de esta capa consiste en proporcionar un elemento resistente que transmita a la sub-base y a la sub rasante los esfuerzos producidos por el tránsito en una intensidad apropiada. (Montejo, 2006)

**Estabilización de suelos:** Este método se desarrolló con el fin de cumplir en mejor forma los requisitos deseados para el suelo y que la calidad obtenida sea la adecuada. Existen varios métodos para la estabilización, el más conocido es la compactación mecánica pero existen también por medios de drenaje, eléctricos, químicos, de calor y calcinación, por la adición de agentes estabilizantes específicos, etc. (Montejo, 2006)

**Resistencia:** Los suelos arcillosos al secarse obtienen gran resistencia. La acción abrasiva del tránsito puede hacer que un material cohesivo se pulverice y pierda su cohesión. Los métodos que mantienen al suelo sin cambios volumétricos sirven también para mantener la resistencia, como lo es la adición de agentes que transformen a un suelo fino con una masa rígida o granular; otro método para aumentar la resistencia es el de la precarga, y consiste en la colocación de una carga superficial sobre el suelo, con el objeto de pre consolidarlo. (Montejo, 2006)

**Compresibilidad:** Esta característica afecta la resistencia al corte del suelo, eliminar las presiones de poros promueve la consolidación. La compresibilidad se ve afectada por la relación de la carga aplicada respecto a la carga inicial del suelo y por el tiempo de aplicación de la carga una vez se ha disipado la presión de poros en exceso de la hidrostática. (Montejo, 2006)

**Reciclaje:** Someter un material usado a un proceso para que se pueda volver a utilizar (RAE 2014)

**Propiedades del vidrio templado:** El vidrio templado se utiliza principalmente en la industria de los automotores y la construcción. Hay dos maneras de templar el vidrio: templado químico y templado térmico.

Para fabricar vidrio templado térmicamente, el vidrio flotado se calienta gradualmente hasta una temperatura de reblandecimiento de entre 575 y 635 grados Celsius para después enfriarlo muy rápidamente con aire. De esta manera se consigue que el vidrio quede expuesto en su superficie a tensiones de compresión y en el interior a tensiones de tracción, confiriéndole mayor resistencia estructural y al impacto que el vidrio sin tratar, teniendo la ventaja adicional de que en caso de rotura se fragmenta en pequeños trozos inofensivos (por lo cual se le considera uno de los tipos de vidrio de seguridad). La resistencia mecánica del vidrio siempre rompe por tensiones de tracción en su superficie. (Amevec 2013)

**Suelo – cemento:** Es una mezcla de suelo con cemento Portland y agua que en porciones adecuadas es un perfecto aliado que trae como consecuencia un material resistente y durable con muy buenas propiedades mecánicas, y que se usa como base para pavimentos en muchos proyectos viales. (Mejia, 2001)

### ***Marco Normativo***

Para el desarrollo de esta investigación se tuvieron en cuenta las siguientes normas del 2007 del Instituto Nacional de Vías (Invias). Ver Anexos.

- INV E – 104 - 07: Procedimientos para la preparación de muestras de suelos por cuarteo.
- INV E – 213 – 07: Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos
- INV E – 218 - 07: Resistencia al desgaste de los agregados.
- INV E – 125 - 07: Determinación del límite líquido de los suelos.
- INV E – 126 - 07: Límite plástico e índice de plasticidad.
- INV E – 227 - 07: Porcentaje de caras fracturadas.
- INV E – 230 - 07: Índice de aplanamiento y alargamiento.
- INV E – 806 - 07: Relaciones de humedad – peso unitario de mezclas suelo cemento.
- INV E – 809 - 07: Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo cemento.

*Nota:* Para el presente trabajo se usó la normatividad con el Artículo 341-07 Invias y con la respectiva normatividad Invias 2007 que exige el Artículo en mención, a su vez se realizó un cuadro comparativo con el artículo 350 de 2013 con el fin de analizar la vigencia del proyecto respecto a la norma vigente (tabla 12)

## **CAPÍTULO 1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL Y PROCESAMIENTO DE DATOS.**

Durante el desarrollo del proyecto se realizó la caracterización de los materiales con que se trabajó con el fin de dar conclusiones certeras y resultados confiables, los resultados fueron los siguientes.

### ***1.1 Caracterización física del vidrio templado reciclado***

Para el desarrollo del proyecto no se realizaron los laboratorios para el vidrio templado reciclado ya que no se contempló en el alcance y a su vez la naturaleza del material no permite ser manejado fácilmente para las normas INV E-218, 125, 126, 227, 230. Para este material únicamente se realizaron los ensayos INV E-104 Procedimiento para la preparación de muestras por cuarteo y análisis granulométrico de agregados gruesos y finos INV E-213.

### ***1.2. Proceso de trituración del vidrio templado reciclado.***

Como se menciona a lo largo del proyecto el material que se usó para modificar el suelo cemento será el vidrio templado reciclado, el cual en Colombia no se tritura ya que las maquinas que se utilizan para tal objetivo se usan principalmente para la minería y trituración de piedras calizas, roca. Debido a lo anterior se tiene la necesidad de crear un método para la trituración del vidrio templado reciclado para usar en el laboratorio con el fin de tener una muestra de diferentes tamaños con mejor distribución dentro de la mezcla.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta un esquema del proceso de recolección y trituración del vidrio templado.

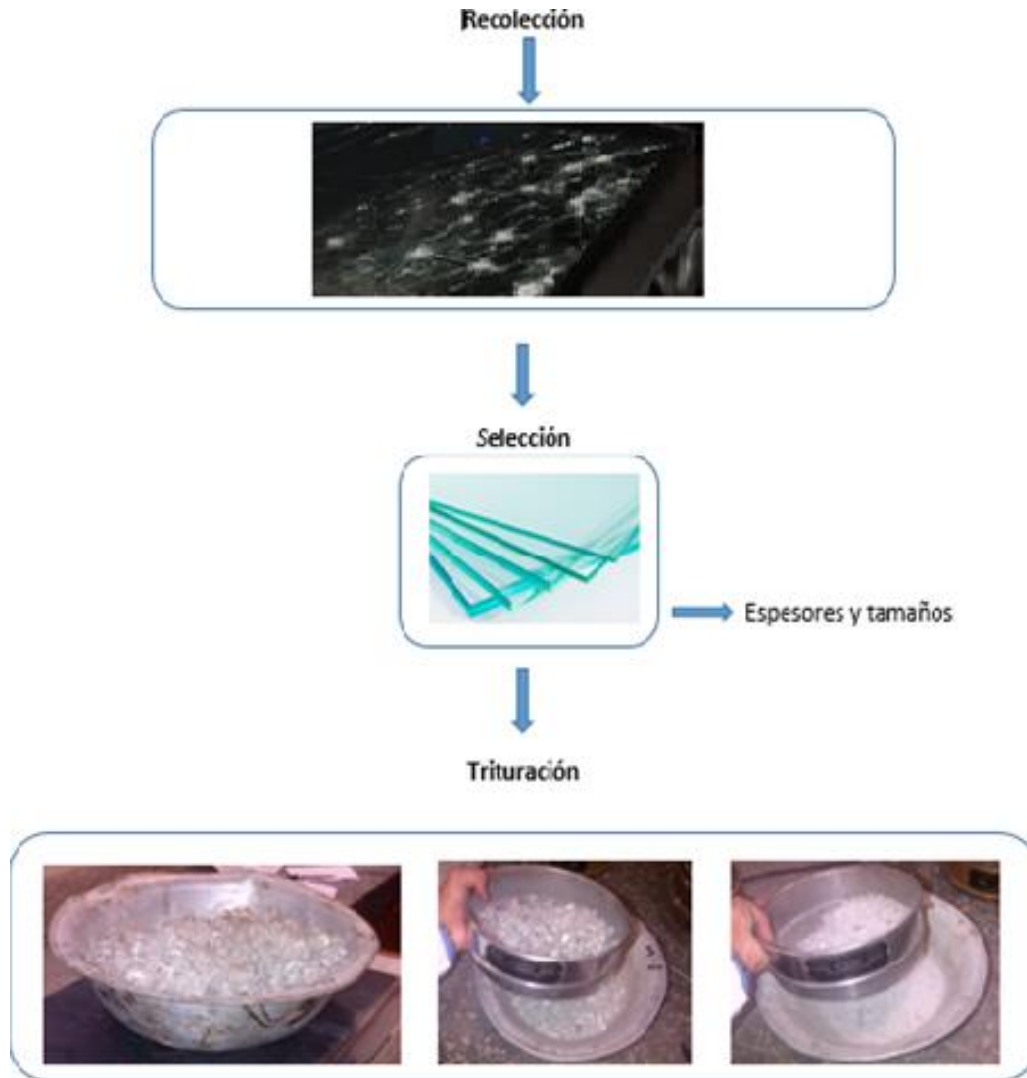


Figura 1. Esquema de recolección y trituración del vidrio templado  
*Fuente: Elaboración propia*

### ***1.3. Metodología de trituración***

Debido a lo ya mencionado fue necesario realizar la trituración del vidrio en el laboratorio de forma artesanal tomando como ejemplo el martillo de proctor para el efecto generado por el golpe, de esta manera con una pesa de 10 lb dejándola caer a un metro de altura se genera una fuerza de 98.1 N dentro de un tubo de PVC de 6" para que la carga siempre caiga de manera puntual, según la cantidad de golpes el vidrio se tritura en diferentes tamaños como se muestra en la tabla.

Tabla 2. Numero de golpes necesarios para la trituración del vidrio templado.

<i>Tamiz</i>	<i>Numero de golpes</i>
3/4"	0
1/2"	6
3/8"	10
1/4"	13
#4	20
#8	23
#10	26
#16	30
#30	33
#40	38
#50	44
#80	50
#100	60
#200	80

*Fuente:* Elaboración propia

Durante la trituración del vidrio templado se tomaron 500 gramos para cada tamiz con el fin de tener una buena cantidad de material, después se mezclaron en una sola muestra y se tomó una cantidad de material triturado por cuarteo lo cual arrojó la siguiente curva granulometría (figura 2).

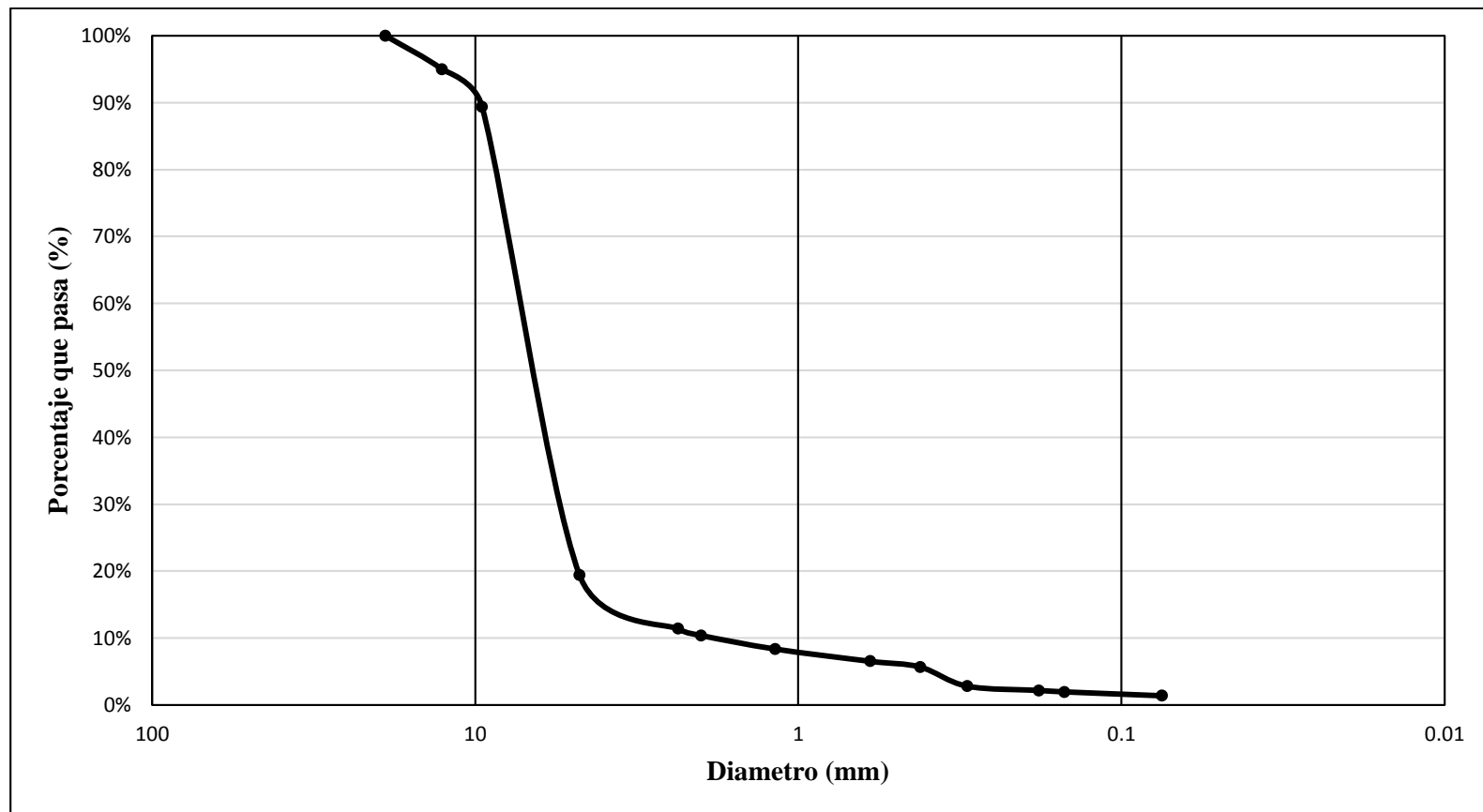


Figura 2. Curva granulométrica del vidrio templado triturado

*Fuente.* Elaboración propia

## CAPITULO 2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL NATURAL

El material con el cual se trabajo es natural, proveniente de una cantera localizada en la ciudad de Fusagasugá Cundinamarca. Este material fue sometido a modificaciones porcentuales con vidrio templado reciclado y permitió formar la mezcla de suelo-cemento-vidrio templado, la cual se sometió a los ensayos exigidos por el Artículo 341-07 del INVÍAS, permitiendo de esta manera determinar algunas de sus propiedades físico-mecánicas con lo cual se logró evaluar su uso en proyectos de ingeniería.

### 2.1. Requisitos del Artículo 341-07 INVÍAS

Cumpliendo los requisitos exigidos por el Artículo 341 - 07 del INVÍAS e indicados en la tabla 3 para la estabilización de suelos con cemento, se realizó el ensayo de límites de líquido y plástico al material natural. Posteriormente se realizó el ensayo de granulometría para determinar si el material es aceptado para realizar la mezcla suelo – cemento de acuerdo a los requisitos que se encuentran en la tabla 3.

<i>Ensayo</i>	<i>Norma</i>	<i>Requisito</i>
Límite líquido. % máximo	E - 125	35
Índice de plasticidad. % máximo.	E - 125, 126	15
<i>Granulometría</i>		
<i>Tamiz</i>		<i>Porcentaje que pasa (%)</i>
<i>Normal</i>	<i>Alternativo</i>	
4.75 mm	Nº 4	Mínimo 60
75 µm	Nº 200	Máximo 50

Tabla 3. Requisitos de los materiales para la construcción de bases estabilizadas con cemento Portland

*Fuente:* Artículo 341-07. Invias

El proyecto se rigió por las normas del Invias del 2007 y de su artículo 341-07 para hacer el diseño de mezcla de suelo-cemento.

Al obtener la humedad natural se realizó el ensayo INV E – 123 – 07, Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos, seguido del ensayo límites líquido y plástico para el agregado después de comparar con la tabla 300.1 del artículo 300<sup>2</sup> INVIAS, se continuó con el ensayo INV E-227 para encontrar el porcentaje de caras fracturadas seguido del ensayo INV E-218 resistencia de los materiales al desgaste, seguido de INV E-230 y se determinó el índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras como lo indica el Invias en el Artículo 341-07.

Las características solicitadas por el artículo 341-07 INVIAS para el agua y el cemento que se usó en el diseño de la mezcla son las siguientes y se cumplieron a cabalidad durante la realización de los ensayos

**Agua:** El agua que se usó para la realización de las muestras fue agua potable, libre de materia orgánica según lo exige el artículo 341-07 (Invias, 2007).

**Cemento:** El cemento para estabilización deberá ser Portland Tipo I, el cual deberá cumplir lo especificado en el artículo 501 (Invias, 2007)

---

<sup>2</sup> Requisitos de los agregados para afirmados, sub bases granulares y bases granulares

INFORMACIÓN TÉCNICA		
<b>Resistencias a compresión (Kg/cm<sup>2</sup>)</b>		
1 día	60 - 100	NA
3 días	130 - 190	Mínimo 80
7 días	170 - 240	Mínimo 150
28 días	245 - 300	Mínimo 240
<b>Análisis físicos</b>	<b>Rango resultados</b>	<b>Requisitos Norma NTC121</b>
Superficie específica Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3000 - 6000	Mínimo 2800
Tiempos de fraguado Vicat (minutos)		
Inicial	100 - 180	Mínimo 45
Final	180 - 260	Máximo 480
Expansión en autoclave (%)	0,00 - 0,20	Máximo 0,80
<b>Análisis químicos</b>		<b>Requisitos Norma NTC321</b>
% SO <sub>3</sub>	1,50 - 3,00	Máximo 3,5
%MgO	1,00 - 3,00	Máximo 7,0

Cumple las normas NTC 121 y 321 para Cemento Portland Tipo I.

Producto elaborado bajo un sistema de gestión de calidad certificado con ISO 9001 por ICONTEC.

### Manual de Uso

- Seleccionar cuidadosamente arena y grava, las cuales deben ser duras, del tamaño adecuado y libres de arcillas e impurezas.
- Mezcle los agregados y el cemento en seco sobre una superficie dura y limpia.
- Use la mínima cantidad de agua apta para la producción de la mezcla.
- Coloque uniformemente la mezcla dentro de un molde o formaleta, desalojando el aire atrapado mediante vibrado.
- Dependiendo de la temperatura ambiente, humedezca la superficie entre 1 a 4 horas aproximadamente después de la fundida.
- Repita el procedimiento anterior durante 28 días para garantizar la hidratación y el curado de la mezcla.
- Utilizar según las Normas Técnicas Colombianas (NTC 3318 y 3329) vigentes para la producción de concreto y mortero.

### Instrucciones de almacenamiento y manipulación

- Manténgase en un lugar cubierto, seco y alejado de la humedad. Cubrir con plástico en climas húmedos.
- Mantenerlo sobre estibas de madera o plásticas a 10 cm del suelo, alejado de las paredes.
- No apile más de 10 sacos en altura.
- Una vez abierto el saco, consúmalo de inmediato.
- Manipule con cuidado para evitar la rotura del saco. Si el saco está roto o dañado, no lo compre.

### Precauciones

- En caso de contacto con los ojos, lávese con abundante agua.
- Use guantes de látex, mascarilla y gafas.
- Manténgase fuera del alcance de los niños.
- Producto no comestible. En caso de ingesta, llame o acuda al médico.
- No inhalar.

Figura 3. Ficha técnica cemento Cemex Tipo I

*Fuente:* Catalogo Soluciones Cemex

## 2.2. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados INVE – 127

El propósito de este ensayo es “incrementar la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregado ligadas o no ligadas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura para agregados usados en capas superficiales de pavimento” (Invias, 2007).

<b>Fracción granulométrica evaluada</b>	<b>1 o más caras fracturadas</b>	<b>2 o más caras fracturadas</b>
Retenida en el tamiz de 9,5 mm (3/8")	88%	82%
Pasa el tamiz de 9,5 mm (3/8") y se retiene en el de 4,75 mm (No. 4)	91,52%	88%

Tabla 4. Resumen ensayo de caras fracturadas

*Fuente:* Elaboración propia

Los resultados del ensayo cumplen debido a que el porcentaje de caras fracturadas que se presenta en la muestra de material son superiores al 80% frente a lo exigido por el artículo 330 Invias 2007 en la tabla 330-2<sup>3</sup>. En base en lo anterior se concluye que el material garantiza la que se cumple con la normatividad para la mezcla

## 2.3. Índices de alargamiento y aplanamiento INVE - 230

Este ensayo se usa para conocer la manejabilidad y consistencia de la mezcla, así como las propiedades de durabilidad y resistencia que en los agregados es un estimativo de calidad del agregado debido a que las partículas planas y alargadas generan problemas en la compactación

<sup>3</sup> Requisitos de los agregados para bases granulares

porque suelen partirse durante el transporte y en la mezcla se presenta una mayor cantidad de partículas pequeñas causando pérdida de la resistencia, los resultados del ensayo se muestran en la tabla 5.

<b>Índices de alargamiento y aplanamiento</b>	
Índice de alargamiento	27%
Índice de aplanamiento	12,27%

Tabla 5. Resumen ensayo índices de alargamiento y aplanamiento.

*Fuente:* Elaboración propia

El ensayo muestra que los resultados cumplen con la normatividad según la tabla 330-2 del artículo 330 Invias 2007, ya que se presentan valores inferiores al 35% dentro del agregado evitando de esta manera pérdida de resistencia y de durabilidad en el diseño de la mezcla.

#### **2.4. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la Máquina de los Ángeles. INV E-218**

Es una propiedad que depende directamente de las características de la roca madre, este factor cobra importancia cuando las partículas estarán sometidas a roces continuos como en los pavimentos, por lo general también es usado como indicador de calidad del agregado. Para nuestro material el porcentaje de desgaste del agregado es del 40.43%.

<b>Resistencia al desgaste de los agregados por medio de la Máquina de los Ángeles</b>	
Porcentaje de desgaste	40,43%

Tabla 6. Resumen ensayo de desgaste de los agregados

*Fuente:* Elaboración propia

El ensayo muestra que se supera el límite permitido por la norma del 40% (tabla 330-2 del artículo 330 Invias 2007) de desgaste solo en un 0.43% razón por la cual se decide continuar los trabajos con este material.

## ***2.5. Límites de consistencia***

### ***2.5.1 Límite Líquido de los Suelos - I.N.V. E – 125 – 07***

Este laboratorio se realiza con el fin de conocer el porcentaje de agua contenido por un suelo y es el responsable de delimitar la transición entre el estado líquido y el estado plástico del mismo.

Este límite se define como el contenido de humedad que necesitan dos mitades de pasta de suelo con 1 cm de espesor para poder fluir y que se unan en una longitud de 12 mm aproximadamente en el fondo de la muesca que separa las dos mitades, cuando la cápsula que la contiene golpea 25 veces desde una altura de 1 cm con una velocidad de 2 golpes por segundo.

Después el material se tamizo en el tamiz N°40, se tomó una muestra de 130 gramos de material con el cual se realizaron los ensayos de la norma INV E-125 determinación del límite líquido de los suelos el cual arrojó los siguientes resultados.

En la curva de flujo donde se relacionó el contenido de humedad del material en la abscisa y en la ordenada con escala logarítmica el número de golpes necesarios para cerrar la ranura aproximadamente 12mm en la cazuela (Figura 4).

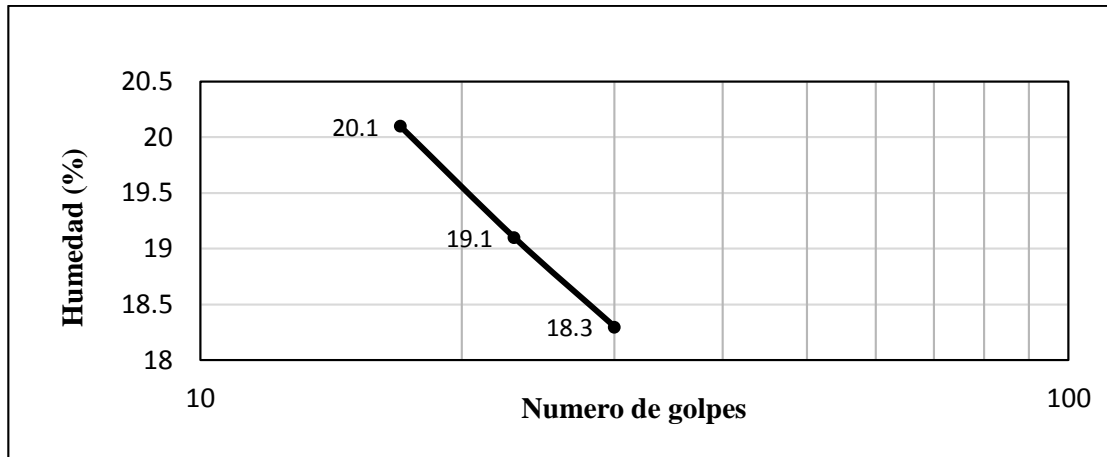


Figura 4. Curva de flujo- Material natural  
*Fuente:* Elaboración propia

En la curva de flujo, se concluye que el límite líquido del material granular es del 19%. Es importante destacar que para que el material pueda ser estabilizado con cemento debe tener un límite líquido inferior a 35%.

### **2.5.2. Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos - I.N.V. E – 126 – 07**

El límite plástico es el porcentaje de agua contenido por un suelo y es el responsable de delimitar la transición entre el estado semisólido a sólido; a continuación se describe el procedimiento para determinar el límite plástico del material utilizado en el trabajo de investigación.

El método que se usó para este procedimiento es el de moldeado manual de rollos de suelo que explica la norma I.N.V. E – 126 – 07. Los resultados de este ensayo fueron los siguientes:

Se tomaron dos muestras de los rollos de suelo cuyo diámetro fueron de aproximadamente 3 milímetros y se hicieron rodando el material entre la palma de la mano y una superficie lisa; cada una de las muestras fue mayor de 25 gramos para promediar y después de 30 se tomaron los pesos para realizar los cálculos de límite plástico e índice de plasticidad de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Límite plástico} = \frac{\text{Masa de agua}}{\text{Masa del suelo seco}} * 100$$

*Índice de plasticidad: Límite líquido – Límite plástico*

El límite plástico del material natural es de 19.2% obteniendo un índice de plasticidad del 0.2%, este valor se encuentra dentro de los permitidos para la mezcla suelo cemento.

### **2.6. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos INVE – 213 – 07**

El objetivo del ensayo de granulometría es determinar la distribución de los tamaños de las partículas del material por medio de mallas con aberturas cuadradas de tamaño dependiente a su tamiz. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.5** se muestra una imagen del material tamizado.



Figura 5. Muestras de material después del ensayo de granulometría

*Fuente: Elaboración propia*

La obtención de la muestra para el ensayo se realizó por selección por cuarteo. Se tomó una muestra de 5.000 gramos para realizar el ensayo manualmente con la siguiente serie de tamices que se observan en la Tabla 5.

En la Tabla 5 se presentan los resultados del ensayo de granulometría para el material granular sin adición de vidrio templado.

Al comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con los requisitos que exige el Artículo 341-07 INVIAS y que están descritos en la Tabla 4, donde se indica que el porcentaje mínimo que pasa el tamiz N° 4 debe ser del 60% y el máximo que pasa el tamiz N° 200 debe ser máximo 50%, se determinó que el material era apto para estabilizar con cemento puesto que los porcentajes para estos tamices fueron de 65% y 4% respectivamente.

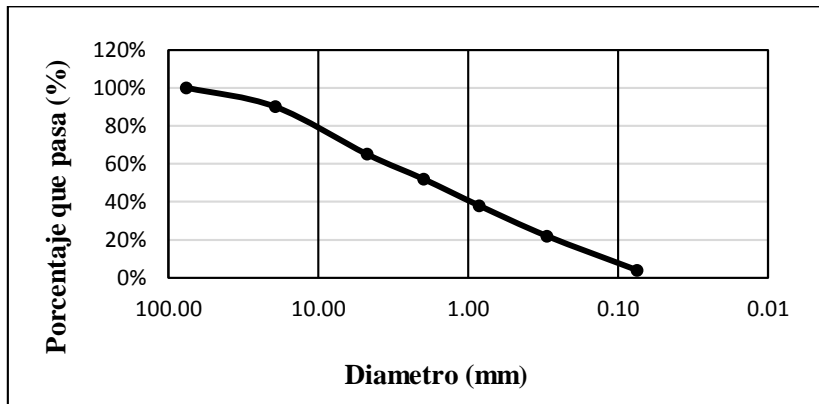
Después se tomó una muestra de material, se pesó y se tamizó por las mallas de 3", 3/8" y 4.74mm (N°4), para después descartar el material retenido en el tamiz 3". El suelo resultante en cada tamiz se pesó para determinar el porcentaje de cada uno de ellos y luego el material que quedo retenido en el tamiz 3/8" y N°4 se saturaron y se tomaron los pesos secados al horno después de 24 horas de cada uno de ellos. Se prosiguió a realizar el ensayo de compactación, el de resistencia a la compresión y el de humedecimiento y secado que exige el artículo 341 – 07 de INVIAS (Figura 6).

En la figura 7 se observan las curvas granulométricas que arrojaron los ensayos para cada tipo de mezcla.

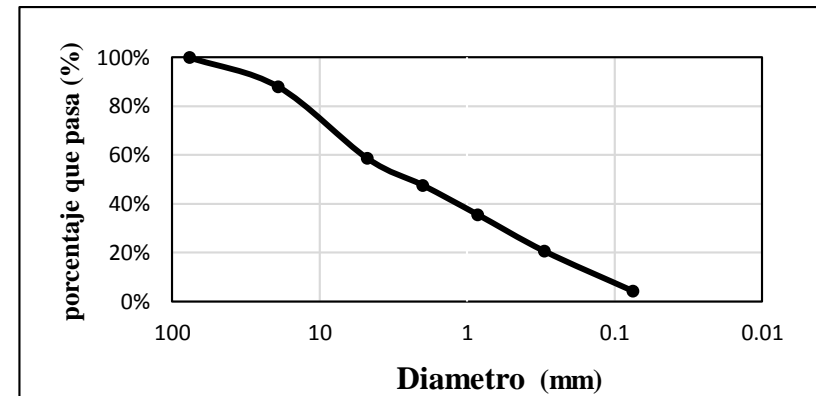


Figura 6. Preparación del material para el ensayo de Compactación

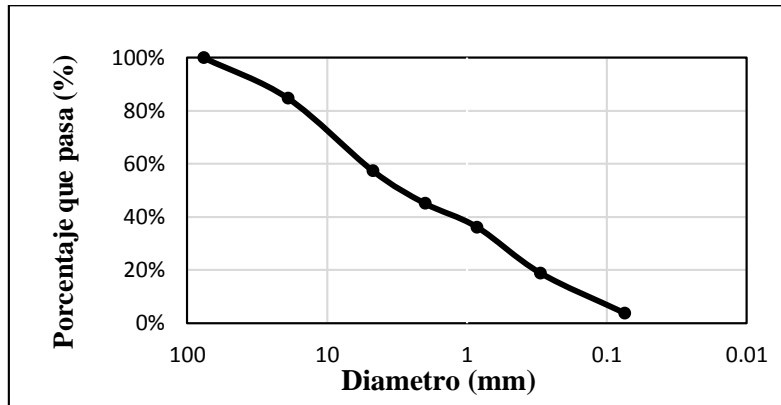
*Fuente:* Elaboración Propia



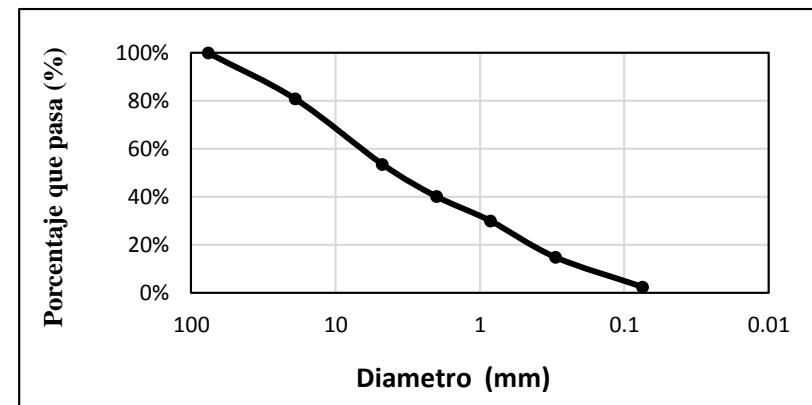
a) Mezcla Suelo-Cemento VT 0%



b) Mezcla Suelo-Cemento VT 5%



c) Mezcla Suelo-Cemento VT 10 %



d) Mezcla Suelo-Cemento 15 %

Figura 7. Curvas Granulométricas de las mezclas.

*Fuente:* Elaboración propia

## 2.7 Clasificación del material

La clasificación AASHTO se basa en los resultados obtenidos anteriormente límite líquido, índice de plasticidad y granulometría del material natural, con estos datos conocemos que el tipo de suelo que se tiene está ubicado en el grupo A-2-4. Figura 8.

Clasif. General	Materiales Granulares ( 35% o menos pasa la malla n° 200)						Limos y Arcillas ( 35% pasa malla n° 200 )				
Grupos	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Subgrupos	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				A-7-5/A-7-6
% que pasa tamiz :											
N° 10	50 máx										
N° 40	30 máx	50 máx	51 mín								
N° 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 mín	36 mín	36 mín	
Caract. Bajo N° 40											
LL				40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
IP	6 máx	6 máx	NP	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
IG	0	0	0	0	0	4 máx	4 máx	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipo de material	Gravas y Arenas		Arena fina	Gravas y arenas limosas y arcillosas				Suelos Limosos		Suelos arcillosos	
Terreno fundación	Excelente		Excelente	Excelente a bueno				Regular a malo			

Figura 8. Clasificación de suelos Sistema AAHSTO

*Fuente:* AASHTO

En la Tabla 7 se observa que el material natural cumple con todos los requerimientos exigidos, aunque la mezcla de suelo-cemento-vidrio templado VT 5% Y VT 10% en su análisis granulométrico con un 3% de porcentaje de error en el laboratorio cumple con la granulometría que exige el Artículo 341-07 Invias, se procedió a realizar los demás ensayos según el diseño. Es importante destacar que el ensayo de “Proporción de sulfatos de material combinado” no se realizó considerando que en el objeto de la presente investigación no contemplaba análisis químico

<i>ENSAYO</i>	<i>REQUISITO ARTÍCULO 341-07</i>	<i>RESULTADO</i>	<i>CUMPLE</i>	
<b><u>Porcentaje de caras fracturadas I.N.V. E-127</u></b>				
<i>Retenida en el tamiz de 9,5 mm (3/8") más de dos caras fracturadas.</i>	N.A.	82%	N.A.	
<i>Pasa el tamiz de 9,5 mm (3/8") y se retiene en el de 4,75 mm (No. 4) más de dos caras fracturadas.</i>	N.A.	88%	N.A.	
<b><u>Cemento</u></b>				
<i>Cemento Cemex tipo I</i>	APLICA	-	SI	
<b><u>Agua</u></b>				
<i>Agua potable</i>	APLICA	-	SI	
<b><u>Índices de alargamiento y aplanamiento INVE - 230</u></b>				
<i>Índice de alargamiento</i>	N.A.	27%	N.A.	
<i>Índice de aplanamiento</i>	N.A.	12,27%	N.A.	
<b><u>Resistencia al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de los ángeles. INVE-218</u></b>				
<i>Porcentaje de desgaste</i>		40,43%		
<b><u>Límite Líquido de los Suelos I.N.V. E - 125 - 07</u></b>				
<i>Material Natural</i>	Máximo 35 %	19%	SI	
<b><u>Índice de Plasticidad de Suelos I.N.V. E - 125 - 07</u></b>				
<i>Material Natural</i>	Máximo 15 %	0,20%	SI	
<b><u>Clasificación del Suelo (AASHTO/SUCS)</u></b>				
<i>Material Natural</i>	N.A.	A-2-4 / CL-ML	N.A.	
<b><u>Análisis Granulométrico de Agregados Gruesos y Finos I.N.V. E - 213 - 07</u></b>				
<i>Material Natural</i>	Pasa tamiz No. 4	Mínimo 60%	65%	SI
<i>VT 0%</i>	Pasa tamiz No. 200	Máximo 50%	6%	SI
<i>Mezcla suelo VT</i>	Pasa tamiz No. 4	Mínimo 60%	59%	NO
<i>5%</i>	Pasa tamiz No. 200	Máximo 50%	4%	SI
<i>Mezcla suelo VT</i>	Pasa tamiz No. 4	Mínimo 60%	58%	NO
<i>10%</i>	Pasa tamiz No. 200	Máximo 50%	4%	SI
<i>Mezcla suelo VT</i>	Pasa tamiz No. 4	Mínimo 60%	54%	NO
<i>15%</i>	Pasa tamiz No. 200	Máximo 50%	3%	SI

N.A: No Aplica.

Tabla 7. Resumen de Ensayos – Características Físicas  
Fuente: Elaboración propia

### CAPÍTULO 3. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DEL MATERIAL

Una vez listo el material para realizar la mezcla del suelo con el cemento, se pasó por el tamiz N° 16 y se agregó a la proporción de suelo en peso de acuerdo a la Tabla 8 de la Norma General de Dosificación de Suelo – Cemento, elaborada por la PCA, la cual, indica la cantidad a ser usada en el ensayo de compactación. El siguiente ensayo que se realizó fue relaciones de humedad – peso unitario de mezclas suelo cemento INV E – 806 – 07, este con el fin de encontrar el porcentaje óptimo de agua y realizar los siguientes ensayos.

Posteriormente se realizaron las briquetas de suelo cemento y suelo – cemento vidrio templado para colocarlas en el cuarto de curado durante siete (7) días y fallarlas a compresión para encontrar el porcentaje óptimo de cemento, fue necesario entonces tomar tres (3) proporciones diferentes de cemento de acuerdo a la misma tabla de la PCA; se hicieron tres (3) briquetas por cada porcentaje de tal manera que por cada mezcla de suelo – cemento y suelo – cemento – vidrio templado se realizaron 9 briquetas y luego de 7 días se fallaron como lo indica la INV E – 809 - 07 Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo cemento. Una vez realizado el ensayo de resistencia a la compresión, se determinaron los porcentajes óptimos de cemento para cada mezcla.

Grupo de suelo según AASHTO	Porcentaje de cemento requerido en peso (%)	Contenido de cemento estimado para la prueba de compactación	Contenido de cemento para la prueba de humedecimiento y secado en peso
A1 - a	3 a 5	5	3, 4, 5, 7
A1 - b	5 a 8	6	4, 6, 8
<b>A2</b>	<b>5 a 9</b>	<b>7</b>	<b>5, 7, 9</b>
A3	7 a 11	9	7, 9, 11
A4	7 a 12	10	8, 10, 12
A5	8 a 13	10	8, 10, 12
A6	9 a 15	12	10, 12, 14

Tabla 8. Contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas de suelo- cemento según la PCA (Portland Cement Association)

*Fuente:* Portland Cement Association

Para definir las condiciones del suelo es necesario realizar la caracterización de la mecánica, en este caso se establecieron parámetros de diseño geotécnico, cumpliendo de esta manera con los requisitos del Artículo 341-07 del INVIAS para el uso del material que se utilizara en las mezclas de suelo-cemento. A continuación se procedió a mezclar el material con cemento Portland Tipo I.

Dando cumplimiento con el Artículo 341 – 07 del INVIAS la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo se debe diseñar mediante el ensayo de resistencia a la compresión (INV E-809) y como mínimo deberá ser de 2.1 MPa. Luego de siete (7) días de curado húmedo. Se procedió a realizar el ensayo de compactación para encontrar el porcentaje óptimo de agua y diseñar las briquetas con este valor para hacer la prueba de resistencia a la compresión.

### ***3.1 Relaciones Humedad – Masa Unitaria de Mezclas de Suelo Cemento I.N.V. E – 806 – 07***

Este ensayo determina la relación entre la humedad y la masa unitaria de las mezclas de suelo cemento, determinando de esta manera la resistencia del material a las cargas expuestas. Para determinar el porcentaje de cemento con el cual se realizó la prueba de compactación, se tuvo en cuenta la información de la Tabla 8. Contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas de suelo- cemento según la PCA (Portland Cement Association) la cual permite proyectar según el tipo de suelo que se tiene el porcentaje de cemento requerido en peso, el cual en este caso corresponde al grupo AASHTO A-2-4. Para realizar el ensayo de compactación de la mezcla suelo-cemento y suelo-cemento-vidrio templado en diferentes proporciones.

Para la realización de este ensayo se tuvo en cuenta el método B que explica la I.N.V E 806 - 07. Inicialmente se dejó al aire el material que iba a ser utilizado para este ensayo y para los posteriores.

### 3.1.1 Mezclas de suelo – cemento VT 0%, VT5%, VT 10%, VT15%.

Una vez preparado el material con su respectivo remplazo, se procedió a mezclar la cantidad de cemento requerida según la PCA. De acuerdo a los resultados del tipo de suelo A-2-4, se observó en la tabla y se determinó usar 7% de cemento para el ensayo. Se mezcló el material con el cemento, después de obtener una mezcla homogénea, se agregó agua para variar la humedad con los porcentajes de agua que se muestran en la Tabla 10 para las mezclas.

<i>Mezcla</i>	<i>Porcentajes de agua</i>
VT 0%	8%, 10%, 12% y 13%
VT5%	8%, 11%, 12% y 14%
VT 10%	8%, 11%, 13% y 15%
VT15%	8%, 11%, 12% y 14%

Tabla 9. Porcentajes de agua usados en las mezclas.

Fuente: Elaboración Propia.

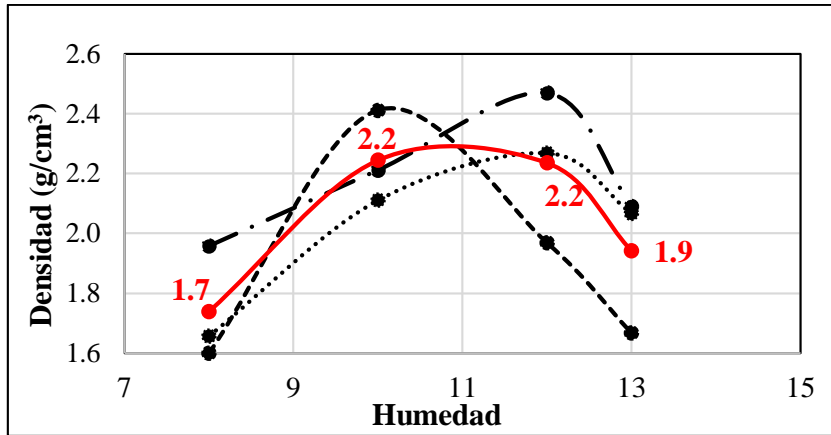
Se compactó el material en 3 capas de 25 golpes cada una en el molde de 944 cm<sup>3</sup> finalmente se halló la densidad seca con la siguiente formula.

$$Densidad\ seca = \frac{\frac{Peso\ del\ suelo\ compactado}{Volumen\ del\ molde}}{1 + Humedad} \left[ g/cm^3 \right]$$

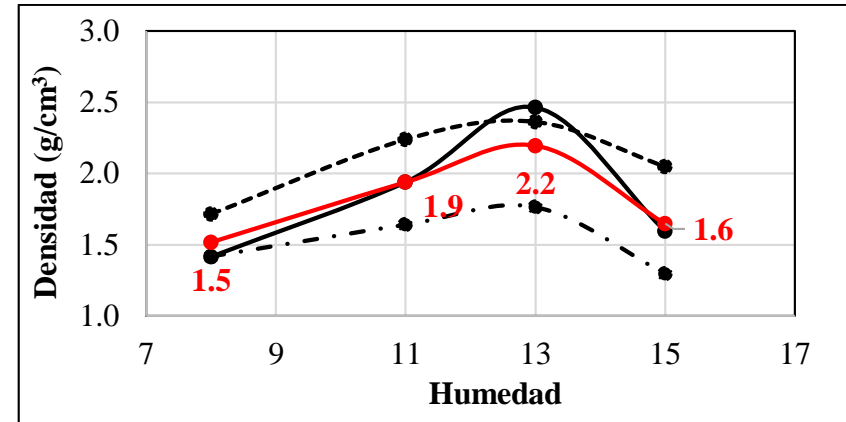


Figura 9. Mezcla del material suelo – cemento – VT 10% ensayo de compactación

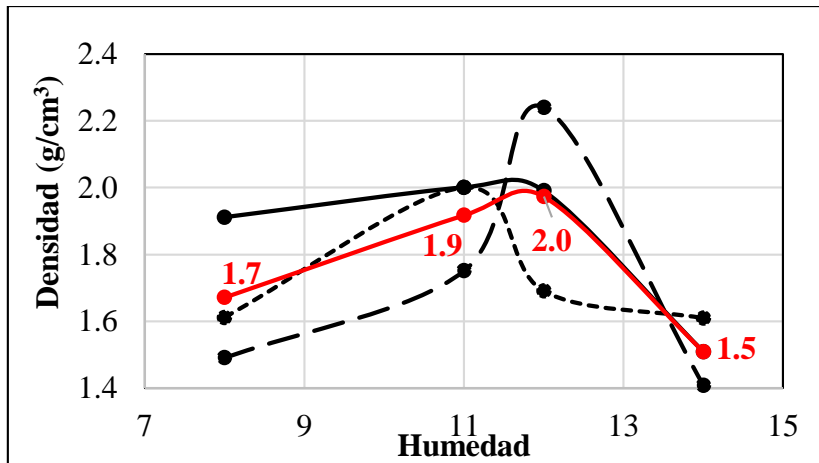
Fuente: Elaboración propia



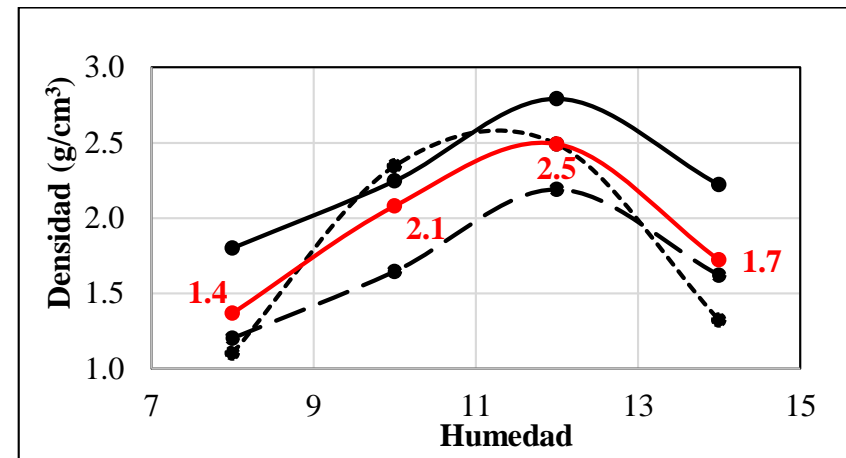
a) Mezcla de suelo-cemento VT 0%



b) Mezcla de suelo-cemento VT 10%



b) Mezcla de suelo-cemento VT 5%



d) Mezcla de suelo-cemento VT 15%

Figura 10. Graficas resistencia Vs Porcentaje de cemento  
Fuente: Elaboración propia

### ***3.2. Resistencia a La Compresión de Cilindros Preparados de Suelo Cemento I.N.V. E809 – 07***

Este ensayo permite determinar la resistencia de un material ante un esfuerzo a compresión, en este caso lo usaremos para encontrar la resistencia de la mezcla de suelo cemento y suelo cemento vidrio templado.

El artículo 341 – 07 del INVIAS especifica que el diseño de la mezcla suelo – cemento debe tener una resistencia a la compresión mínima de 2.1 MPa luego de 7 días de curado húmedo el cual será calculado con los parámetros de la norma INV E-809 Resistencia a la compresión de cilindros preparados de suelo cemento

Al material que se usó para este ensayo se le aplico la norma INV E-806 Relaciones humedad-masa unitaria de mezcla de suelo cemento y se le agregó tres porcentajes de cemento distintos como lo indica el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la muestra de suelo se compacto y se sacó del molde de compactación como lo muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para colocarlo en el cuarto húmedo. Los laboratorios de la universidad de la Salle no cuenta con cuarto húmedo, por tal motivo se usó una nevera y papel periódico mojado como lo muestra la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** para generar el efecto del cuarto húmedo.

Para realizar el ensayo se realizaron 3 muestras por cada porcentaje de cemento (5%, 7% y 9%) pero con el mismo porcentaje de vidrio templado (0%, 5%, 10% y 15%) pero con los porcentajes de humedad encontrados en el ensayo de relación de humedad-masa unitaria INV E-806, lo anterior con el fin de promediar los resultados para cada tipo de mezcla suelo cemento y suelo cemento vidrio templado lo que genera un total de 36 briquetas las cuales se colocaron en el cuarto húmedo durante siete (7) días como lo muestra la Figura 11. Al cumplir este tiempo, se sacaron de los moldes, se tomaron las medidas de altura y diámetro, para finalmente ser fallados a compresión en la máquina Versa Tester.



Figura 11. Extracción de la probeta y cuarto de curado de las probetas

*Fuente:* Elaboración propia

Los cilindros se fallaron de acuerdo a la norma I.N.V. E – 809 – 07. En la maquina Versa Tester (Figura 12), Esta nos dio el valor de la carga al aplicar una fuerza a velocidad constante. Los valores de la deformación y la carga se tomaron y se tabularon para realizar los cálculos correspondientes de resistencia.



Figura 12. Ensayo de resistencia a la compresión en la Maquina Versa Tester

*Fuente:* Elaboración propia

A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron una vez fueron fallados los cilindros para encontrar el porcentaje óptimo de cemento.

### 3.3. Mezcla suelo – cemento – VT 0%, VT 5%, VT 10% y VT 15%

Después de tener las briquetas por siete días en el cuarto húmedo se fallaron midiendo la deformación a la vez que se aplicaba una carga con velocidad constante como se muestra en la Figura 13.

Para el ensayo de resistencia se tomaron las humedades óptimas y porcentajes de cemento del 5%, 7% y 9%; estos últimos valores se presentan en las gráficas A, B, C, Y D de resistencia versus cantidad de cemento en la que se muestra a su vez la resistencia mínima a compresión (2.1 MPa.) requerida por el Artículo 341-07 INVIAS a compresión a la que los cilindros fallaron (Figura 14 y 15).



A) Falla a compresión mezcla VT0%



B) Falla a compresión mezcla VT 5%



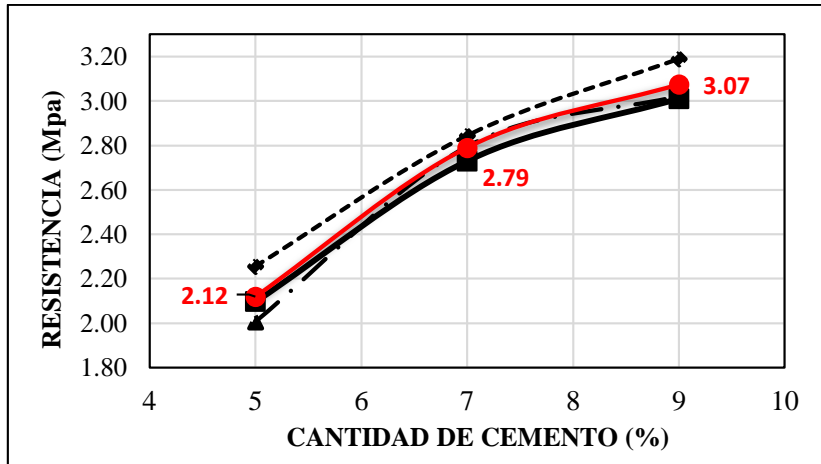
C) Falla a compresión mezcla VT 10%



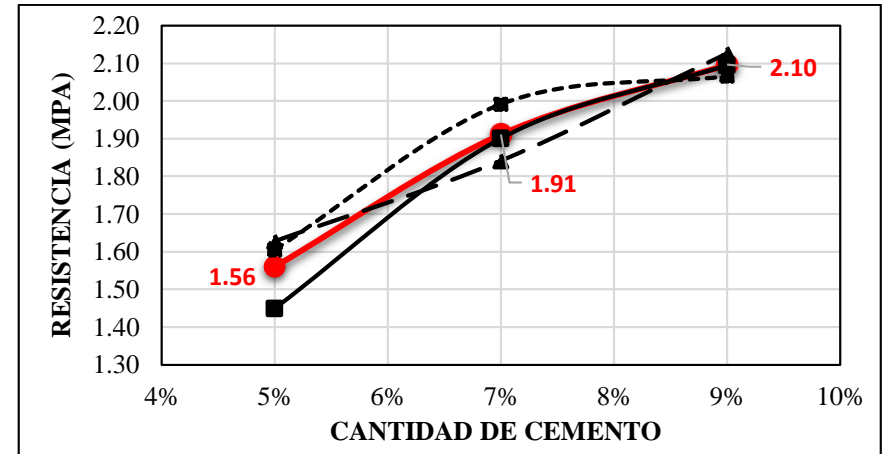
D) Falla a compresión mezcla VT 15%

Figura 13. Ensayo de resistencia a la compresión – Tipos de falla para las diferentes mezclas de Suelo-Cemento-Vidrio Templado

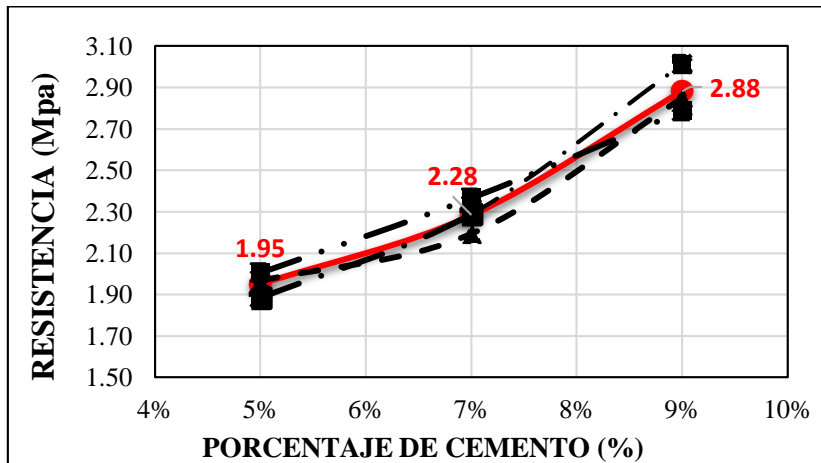
*Fuente:* Elaboración propia



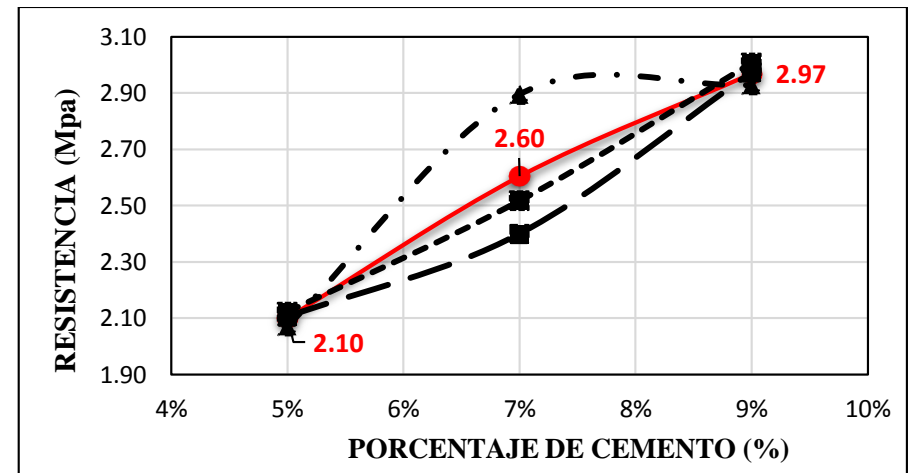
A) Mezcla de suelo-cemento VT 0%



B) Mezcla de suelo-cemento-VT5%.

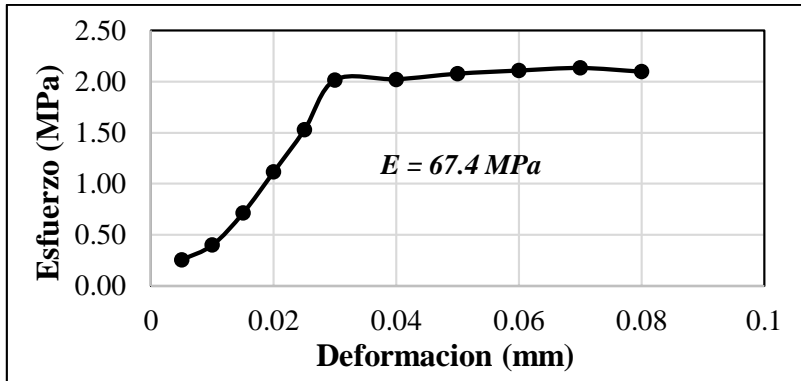


C) Mezcla de suelo-cemento-VT10%

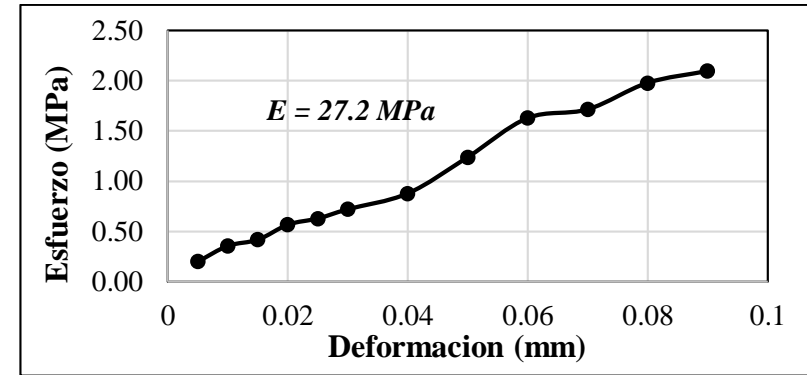


D) Mezcla de suelo-cemento-VT15%

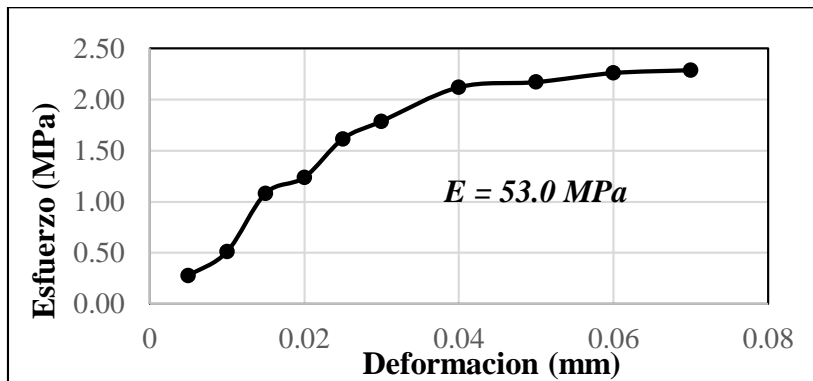
Figura 14. Graficas resistencia Vs Porcentaje de cemento  
Fuente: Elaboración propia



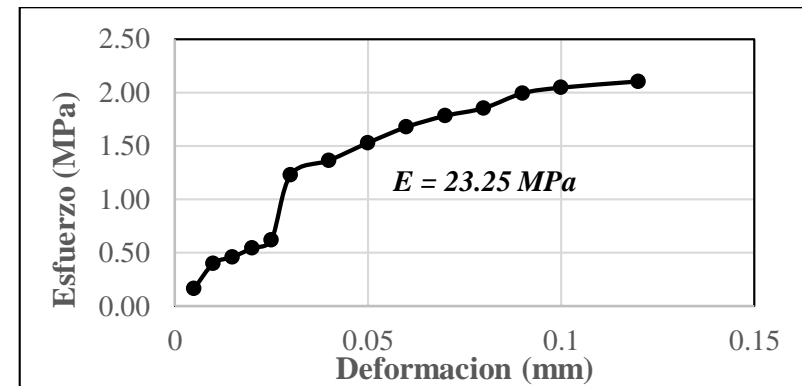
A) Mezcla de suelo-cemento VT0%



B) Mezcla de suelo-cemento VT5%



C) Mezcla de suelo-cemento VT10%



D) Mezcla de suelo-cemento VT15%

Figura 15. Diagramas Esfuerzo Vs Deformación  
Fuente: Elaboración propia

**Resumen de la Caracterización mecánica del Material**

En la Tabla 11 se observa el resumen de los resultados obtenidos en esta etapa del proyecto.

<i>Ensayo</i>	<i>Requisito Artículo 341- 07</i>	<i>Cumple</i>	<i>Resultado</i>
<b><u>Relaciones Humedad – Masa Unitaria de Mezclas de Suelo Cemento I.N.V. E – 806 – 07</u></b> <b><u>(Humedad Óptima-Densidad seca)</u></b>			
Mezcla suelo-cemento VT 0%			11,3 % - 2,2 g/cm <sup>3</sup>
Mezcla suelo - cemento VT 5%	N.A.	N.A	12% - 1,99 g/cm <sup>3</sup>
Mezcla suelo - cemento VT 10%			13 % - 2,20 g/cm <sup>3</sup>
Mezcla suelo - cemento VT 15%			12% - 2,5 g/cm <sup>3</sup>
<b><u>Resistencia a La Compresión de Cilindros Preparados de Suelo Cemento I.N.V. E 809 – 07</u></b> <b><u>(Porcentaje Óptimo de cemento)</u></b>			
Mezcla suelo-cemento VT 0%		Cumple	5%
Mezcla suelo-cemento VT 5%	Mínimo 2,1Mpa	Cumple	9%
Mezcla suelo-cemento VT 10%		Cumple	7%
Mezcla suelo-cemento VT 15%		Cumple	5%
<b><u>Resistencia a La Compresión de Cilindros Preparados de Suelo Cemento I.N.V. E 809 – 07</u></b> <b><u>(Ecuación lineal y R<sup>2</sup>)</u></b>			
Mezcla suelo-cemento VT 0%			Y = 23.954+0.9831 R <sup>2</sup> =0.9479
Mezcla suelo-cemento VT 5%	N.A	N.A	Y = 13.375+0.92 R <sup>2</sup> =0.969
Mezcla suelo-cemento VT 10%			Y = 23.264+0.7441 R <sup>2</sup> =0.9732
Mezcla suelo-cemento VT 15%			Y = 21.722+1.037 R <sup>2</sup> =0.9916

Tabla 10. Resultados - Ensayo de Compactación y Resistencia a la Compresión

Fuente: Elaboración propia

## CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la investigación presentada se realizaron ensayos con el fin de analizar las propiedades físicas y el comportamiento mecánico para las mezclas suelo - cemento y suelo – cemento – vidrio templado. Para el material usado como aditivo (vidrio templado) no se realizaron los ensayos INV E – 218, 125 y 126 como lo pide el Artículo 341-07 debido a la naturaleza del material. Durante la investigación también se observó que el vidrio templado genera afectación en las propiedades; limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad; del material granular mezclado ya que es un material que presenta poca manejabilidad.

En la Figura 16 se observa la incidencia que tiene el vidrio templado frente a la resistencia máxima de cada una de las mezclas, en la mezcla con VT 5% con el 9% de cemento (figura 14) se observa una disminución de la resistencia frente a las demás muestras, de la misma manera el aumento de la resistencia en la mezcla con VT 15% es evidente ya que alcanza una resistencia máxima de 3.0 MPa con un 9% de cemento y con un 5% de cemento cumple con la resistencia de 2.1 MPa (figura 14), con lo anterior se concluye que el 15% de vidrio templado puede ser usado con porcentajes entre el 5 y 9 por ciento de cemento.

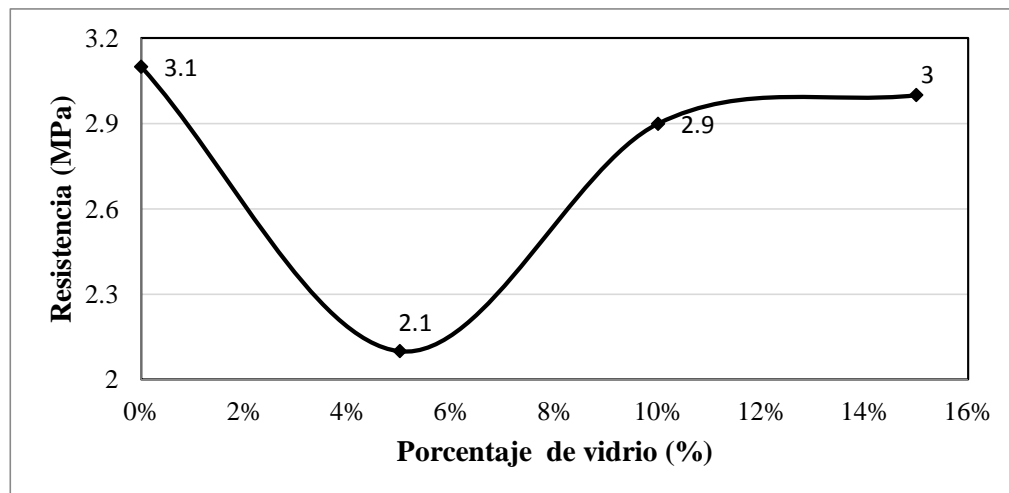


Figura 16. Grafica de resistencia Vs porcentaje de vidrio

*Fuente:* Elaboración propia

Al observar el comportamiento de la gráfica en la Figura 16 se decide tomar los datos de las mezclas que contienen vidrio con el fin de ver la incidencia del vidrio en la mezcla de forma clara. Con esto se observa un aumento proporcional de la resistencia con el aumento de vidrio templado en la mezcla como se ve en la Figura 17.

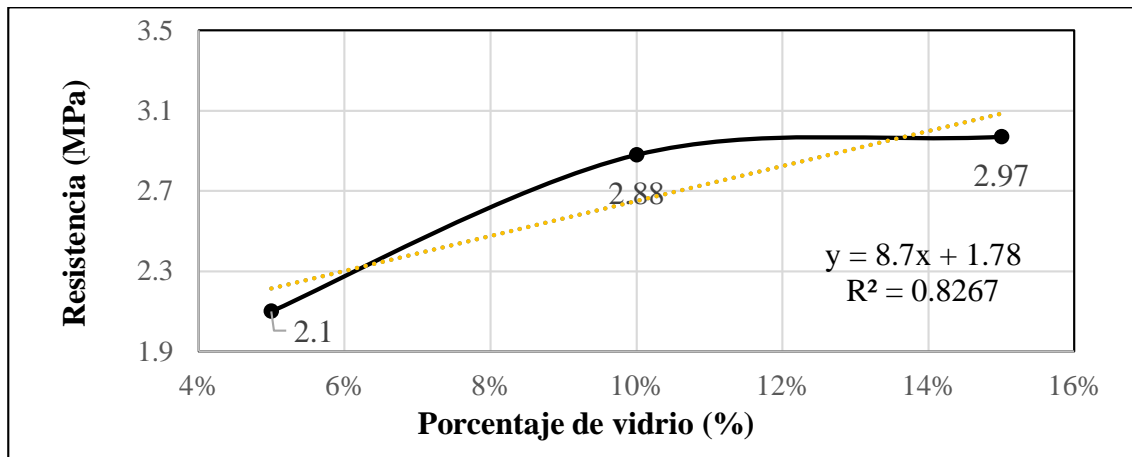


Figura 17. Grafica de Resistencia Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0%  
*Fuente:* Elaboración propia

En la Figura 18 se observa la relación entre el contenido de vidrio templado de las mezclas y la densidad seca, la cual genera una variación indicando que su incidencia en la mezcla es importante sobre la densidad de la muestra, al observar la gráfica se concluye que la eficiencia del vidrio es mayor cuando la densidad del suelo está entre el 2.0 y el 2.4  $\text{gr/cm}^3$ , esto debido a que si el suelo tiene una densidad superior al 2.5  $\text{gr/cm}^3$  no se obtendrá una ganancia importante de resistencia ni dé la densidad.

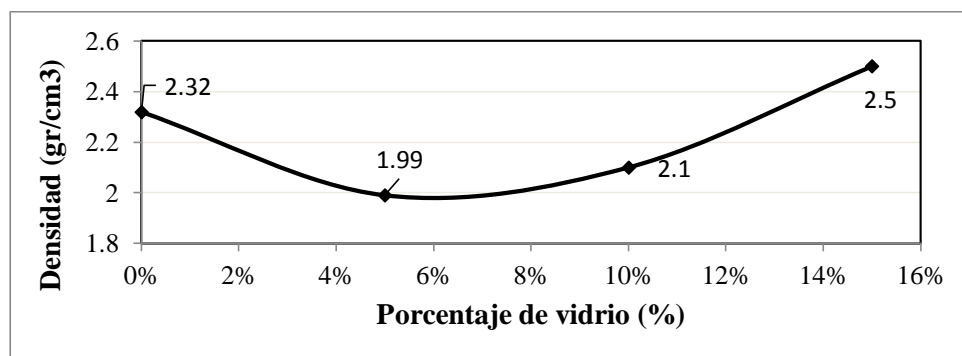


Figura 18. Grafica Porcentaje de vidrio Vs Densidad Seca  
*Fuente:* Elaboración propia

Al suprimir la muestra VT 0% se logra ver la incidencia del vidrio templado con respecto a la densidad seca dentro de la mezcla como se observa en la Figura 19.

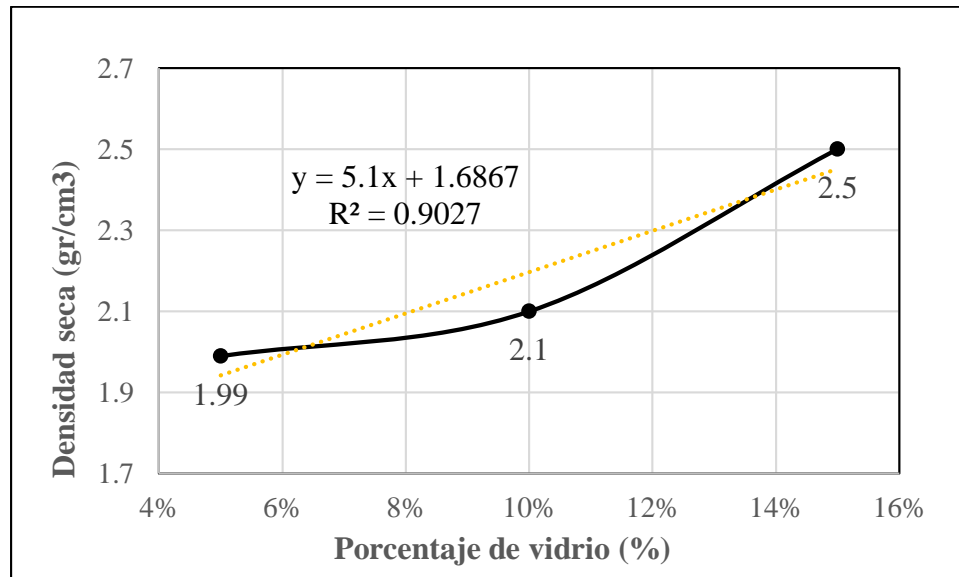


Figura 19. Grafica de Densidad seca Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0%

*Fuente:* Elaboración propia

En la Figura 20 se observa que para la mezcla VT 5% de vidrio templado el porcentaje de cemento se incrementa en un 80%, pero se reduce a un 40% en la mezcla VT 10% y culmina con un porcentaje de 5% de cemento al igual que la mezcla VT 0% con lo cual se recomienda usar porcentajes de vidrio templado entre el 10% y el 15% de vidrio templado ya que se presentan mayores resistencias con menores porcentajes de cemento.

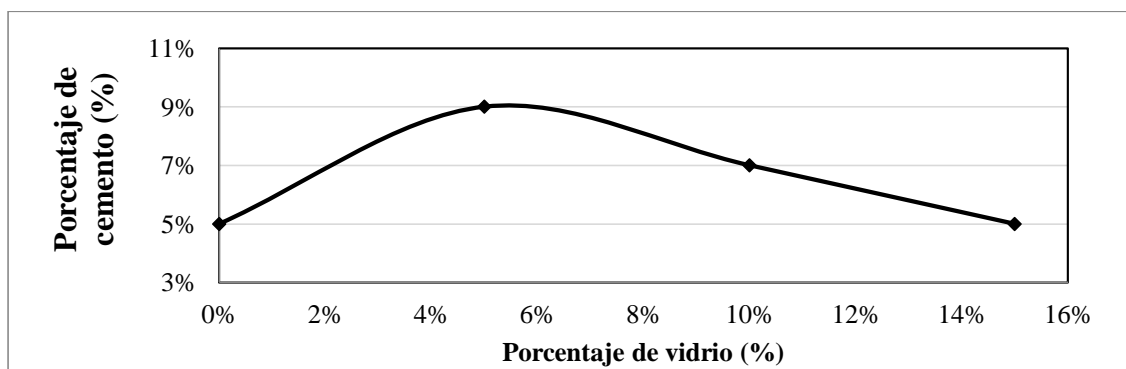


Figura 20. Porcentaje de vidrio Vs Porcentaje de cemento

*Fuente:* Elaboración propia

Debido a que en la gráfica de la figura 20 se observa un aumento de cemento del 80% entre las mezclas VT 0% y VT 5% se realiza una nueva grafica en la que se observan únicamente las mezclas que contienen vidrio templado con el fin de observar el comportamiento del porcentaje de cemento respecto a la cantidad de vidrio templado reciclado adicionado (Figura 21)

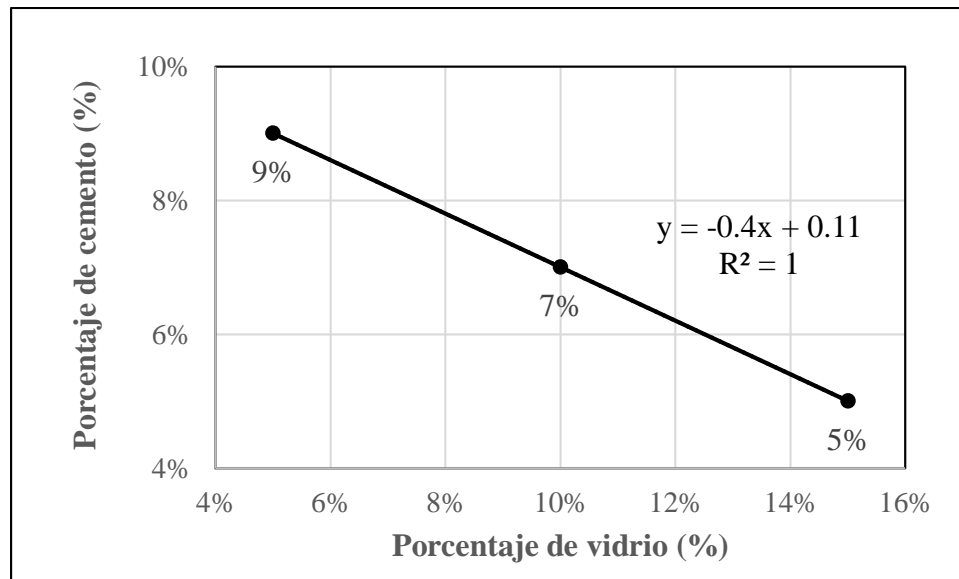


Figura 21. Grafica de Porcentaje de cemento Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0%

*Fuente:* Elaboración propia

En la Figura 22 se observa la incidencia que genera el vidrio templado en relación a la humedad óptima ya que se genera una variación entre el 40% y el 80% en las mezclas con bajos porcentajes de vidrio templado, mientras en la mezcla que contiene 15% de vidrio templado se obtiene un porcentaje de humedad bajo.

Con el fin de observar el comportamiento de las mezclas con vidrio templado reciclado se realiza la gráfica excluyendo la mezcla que no contiene vidrio templado (Figura 23).

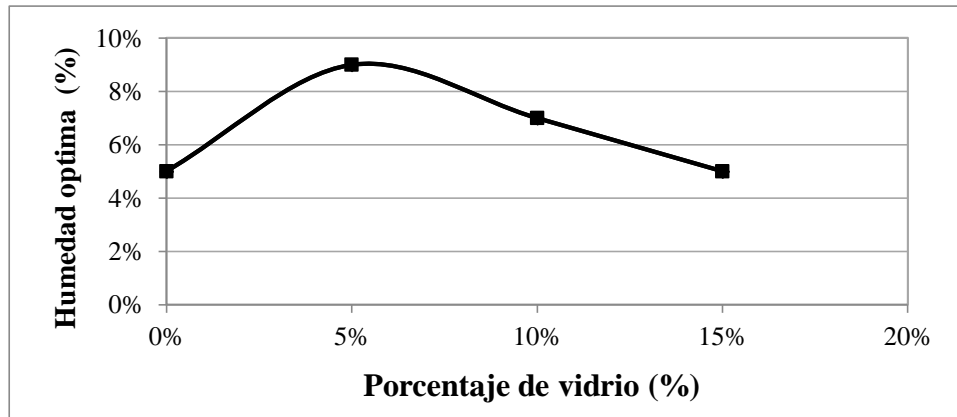


Figura 22. Grafica de Porcentaje de vidrio Vs Humedad optima

*Fuente:* Elaboración propia

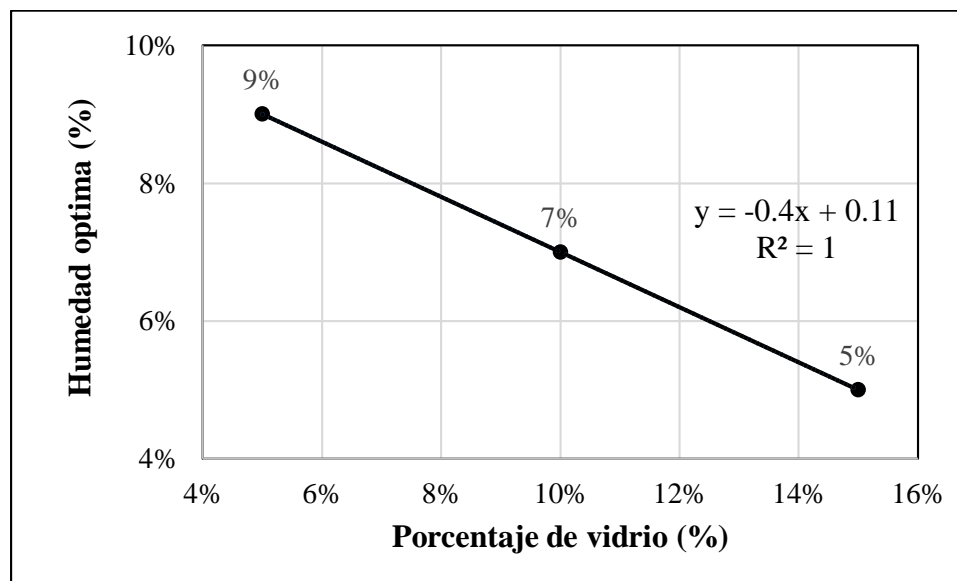


Figura 23. Grafica de Porcentaje de cemento Vs Humedad optima excluyendo la mezcla VT 0%

*Fuente:* Elaboración propia

En el siguiente cuadro se observa que aun con la nueva normatividad Artículo Invias 350 – 13 se cumple con los requisitos exigidos.

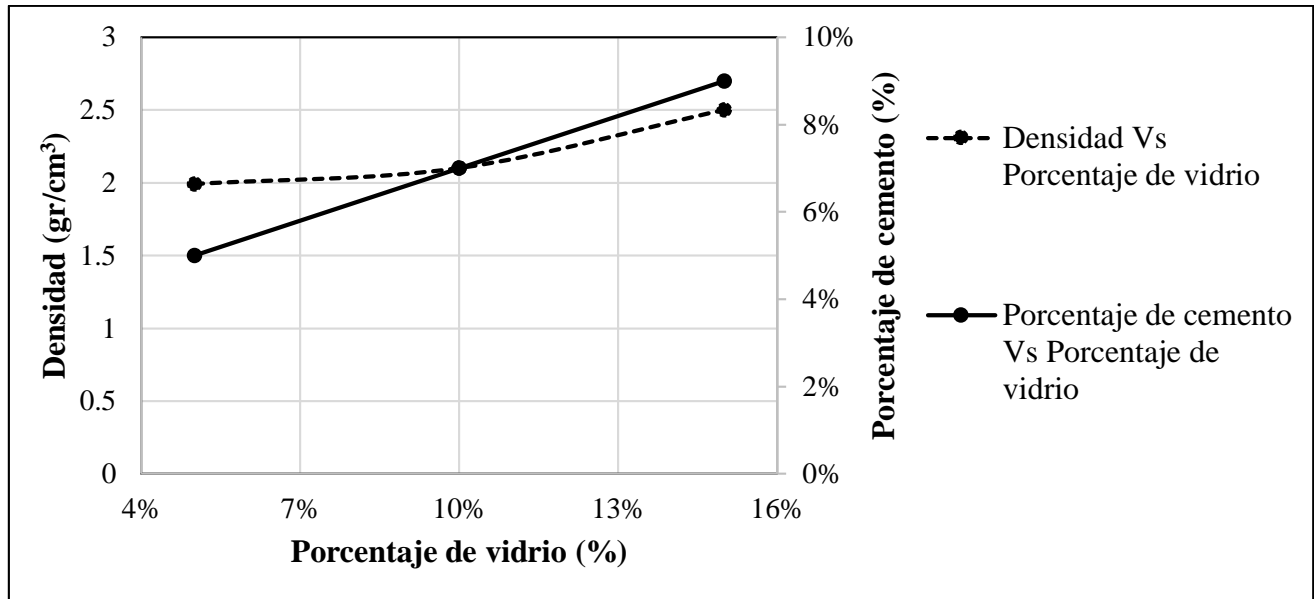


Figura 24. Grafica Porcentaje de cemento Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0% y Densidad Vs Porcentaje de vidrio excluyendo la mezcla VT 0%

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se observa que el porcentaje de cemento óptimo es del 7% para una densidad óptima del 2.1 gr/cm<sup>3</sup> con un porcentaje del 10% de vidrio templado reciclado con lo cual obtenemos el diseño de la mezcla.

<i>Ensayo</i>	<i>Norma</i>	<i>Requisito Artículo 341-07</i>	<i>Requisito Artículo 350-13</i>	<i>Cumple</i>
Limite liquido % máximo	INV E 125	35%	30%	Si
Índice de plasticidad % máximo	INV E 126	15%	12%	Si
Resistencia a la compresión a 7 días	INV E 612	2.1 MPa	2.1 MPa	Si

Tabla 11. Cuadro comparativo artículo 341 Invias 07 Vs Artículo 350 Invias 13

Fuente: Artículo 341-07 y Artículo 350-13 Invias.

En la Tabla 12 se observa el cumplimiento de los requisitos tanto para el Artículo 341-07 INVIAS y a su vez para la nueva normatividad del Artículo 350-13 INVIAS con lo cual se validan los resultados para la actualización de la norma.

## **CAPITULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

- En el análisis se ve que la mezcla óptima es aquella que contiene 10% de vidrio templado y 7% de cemento con una densidad del  $2.1 \text{ gr/cm}^3$  y humedad óptima del 12.5% ya que ofrece la resistencia de 2.1 MPa dando cumplimiento a la norma y sus características físicas y mecánicas no tienen grandes cambios al compararla con la mezcla sin vidrio templado adicionado usando un consumo mínimo de cemento con el máximo consumo de vidrio templado
- La humedad óptima del material natural es del 11.3%, mientras las mezclas de suelo cemento vidrio templado tiene una variación promedio por encima de este resultado de 0.87% lo cual indica la baja incidencia del vidrio templado en la mezcla.
- Se planteó un método de trituración del vidrio para usar en el laboratorio con el fin de evitar la aleatoriedad de la muestra.
- La densidad seca de la mezcla con vidrio templado tiene una reducción del 15% entre las mezclas VT 5% Y VT 15% con lo cual no genera una incidencia considerable dentro de las mezclas aunque es importante aclarar que con el 5% de vidrio templado en la mezcla la densidad disminuye.
- La granulometría del vidrio templado muestra que el 70% del material queda retenido en el tamiz número 4, si analizamos la incidencia del tamaño del grano en los porcentajes de vidrio templado dentro de las mezclas, se concluye que el comportamiento de la resistencia con grano de vidrio con tamaños superiores a 4.75 mm mejora la eficiencia dentro de la mezcla.
- El comportamiento de la mezcla VT 15% tiene una resistencia mínima requerida de 2.1MPa con el 5% de cemento, cumpliendo con la solicitud del artículo 341 Invias de 2007, arrojando un símil frente a la mezcla sin vidrio templado y mejorando frente a las otras mezclas.

- Se recomienda que en investigaciones futuras se usen porcentajes entre el 10% y el 15% de vidrio templado adicionado en las mezclas de suelo cemento ya que las resistencias que se presentaron adicionando más del 10% superan en más del 30% el 2.1MPa de resistencia a la compresión exigidos por el articulo 341 Invias.
- Al observar los resultados obtenidos durante el proyecto se recomienda el uso de vidrio templado reciclado como material alternativo para la estabilización de bases con suelo-cemento ya que se cumple con el requisito de resistencia (2.1 MPa) solicitado por el Articulo 341-07 Invias.
- La implementación del vidrio templado en las mezclas de suelo cemento tendrá una buena acogida desde el punto de vista ecológico y constructivo debido a que se dará uso a un material que en este momento no se reutiliza y a su vez reducirá costos en los agregados para la estabilización de bases con suelo-cemento.

## BIBLIOGRAFÍA

- BERNAL, César A. Metodología de la investigación. Bogotá: Prentice Hall. 2000
- MÉNDEZ, Carlos A. Metodología. Bogotá: McGraw-Hill, 2005
- MONTEJO FONSECA. Alfonso. Ingeniería de Pavimentos: Fundamentos, estudios y diseño. 3ª edición. Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia, 2006. 75 – 116 p.
- MEJIA, WALTER. 2001. *Suelo-Cemento Base durable para las vias de hoy*. Bogota : ARGOS, 2001.
- TAMAYO Y T. MARIO. Serie aprender a investigar. Módulo 2 ICFES. Cali: Universidad ICESI, (s.d.)
- MONTEJO, ALFONZO. 2006. *Ingenieria de pavimentos*. Bogota : Universidad Catolica, 2006.
- INVIAS. 2007. *Base estabilizada con cemento*. Bogota : s.n., 2007. 2007. INV E-227. BOGOTA : s.n., 2007.
- BERNAL, CÉSAR A. Metodología de la investigación. Bogotá: Prentice Hall. 2000
- SIKA. *SIKA Informaciones tecnicas, concreto reforzado con fibras*. Bogota : s.n.
- Amevec 2013. [amevec.mx](http://amevec.mx). *amevec.mx*. [En línea] Amevec 2013. [Citado el: 25 de 03 de 2013.] <http://amevec.mx/publicaciones/AMEVEC-BoletinVidrioTemplado.pdf>.

- Amevec 2013. *amevec.mx*. *amevec.mx*. [En línea] Amevec 2013. [Citado el: 25 de 03 de 2013.] <http://amevec.mx/publicaciones/AMEVEC-BoletinVidrioTemplado.pdf>.
- Construcivil 2013. Constructor civil. *Constructor civil*. [En línea] Construcivil 2013. <http://www.elconstructorcivil.com/search?updated-max=2013-07-01T10:12:00-07:00&max-results=50&reverse-paginate=true>.
- Gonzalez, Teodoro. 2012. Construcción, concreto translucido, último invento mexicano. [En línea] 2012. [http://noticias.arq.com.mx/Detalles/9839.html#.VfHVOhEn\\_Gf](http://noticias.arq.com.mx/Detalles/9839.html#.VfHVOhEn_Gf).
- RAE 2014. Real Academia Española. [En línea] Diccionario de la lengua española, octubre de RAE 2014. [Citado el: 14 de Enero de 2015.] <http://lema.rae.es/drae/>.

## **ANEXOS**

**Anexo A.** Formatos de Laboratorio (Caracterización física del material natural)

**Anexo B.** Formatos de Laboratorio (Caracterización mecánica del material)