Universidad de La Salle
Ciencia Unisalle

Ingeniería Civil | Facultad de Ingeniería

9-2018

Análisis de una mezcla suelo-cemento con adición de viruta de acero

Laura Nathalia Cardona Pico
Universidad de La Salle, Bogotá

Juan Sebastián Sánchez Gómez
Universidad de La Salle, Bogotá

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil

Part of the Civil Engineering Commons

Citación recomendada

Cardona Pico, L. N., & Sánchez Gómez, J. S. (2018). Análisis de una mezcla suelo-cemento con adición de viruta de acero. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/369

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.

ANÁLISIS DE UNA MEZCLA SUELO-CEMENTO CON ADICIÓN DE VIRUTA DE ACERO

LAURA NATHALIA CARDONA PICO

JUAN SEBASTIÁN SÁNCHEZ GÓMEZ

UNIVERSIDAD DE LA SALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ D.C

2018

Análisis de una mezcla suelo-cemento con adición de viruta de acero

Laura Nathalia Cardona Pico

Juan Sebastián Sánchez Gómez

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

Director temático

Ing. Fernando Alberto Nieto Castañeda

Universidad de La Salle

Facultad de Ingeniería

Programa de Ingeniería Civil

Bogotá D.C

2018

Nota de aceptación:

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

_____

Firma del presidente del jurado

_____

Firma del jurado

_____

Firma del jurado

Bogotá, Septiembre 2018

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a:

El ingeniero Fernando Alberto Nieto Castañeda por todo su apoyo, seguimiento y acompañamiento como director en la realización de este trabajo investigativo.

Los ingenieros Sandra Ospina y Martin Riascos, jurados de este trabajo de grado por su exigencia y colaboración en el desarrollo del mismo.

Todos los docentes de la Universidad de La Salle que hicieron parte de nuestra formación como Ingenieros civiles.

Luis Eduardo Borja, laboratorista de Ingeniería civil, por su ayuda teórica y práctica en el desarrollo de los ensayos de laboratorio realizados durante este trabajo de grado.

Dedicatoria

Dedico este trabajo de grado primeramente a Dios por darme vida y salud para estudiar y cumplir a cabalidad cada una de mis responsabilidades durante estos 5 años de carrera universitaria y darme fuerzas cuando sentía no tenerlas.

A mis padres Jorge Hernán Cardona Bueno y Alba Lucia Pico Ricaurte por cada esfuerzo hecho para darme lo mejor durante toda mi vida y para verme formada como profesional. A ellos gracias por cada palabra de aliento para seguir adelante en los momentos de desesperación y por su compresión en cada situación difícil que se me presentó.

A mi hermana Lina Paola Cardona Pico por verme como su ejemplo a seguir y así darme motivos para esforzarme por serlo y por cada noche de trasnocho que se quedó a mi lado acompañándome.

A mi novio Andrés Felipe Herrera Gil por ayudarme a confiar en mí, por compartir cada acierto y desacierto, y siempre recordarme que puedo con todo lo que me propongo.

A mi tía Diana Patricia Pico Ricaurte por siempre estar pendiente de mí en cada etapa de mi vida y estar presente en cada triunfo que he tenido.

A mi Hijo Emiliano Herrera Cardona por regalarme tanta felicidad, hacerme sentir orgullosa con cada nueva cosa que aprende y desarrolla, por convertirse en el motor de mi vida y ser la motivación más importante para ser mejor como persona y profesional.

Laura Nathalia Cardona Pico.

Dedicatoria

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por haberme dado la sabiduría, la humildad, el entendimiento y la fortaleza para poder llegar hasta donde estoy, y por el gran don de la perseverancia para alcanzar todos mis objetivos.

A mi madre Martha Patricia Gómez Pérez por su apoyo constante, por sus consejos, por cada palabra de motivación para seguir adelante, por ser el pilar fundamental en todo lo que soy.

A mi padre Tiberio Alfonso Sánchez Ramos que, con su demostración de un padre ejemplar, me ha enseñado a no desfallecer ni rendirme ante nada y siempre perseverar a través de sus sabios consejos y por estar siempre presente en mi vida y sé que está orgulloso de la persona de la cual me he convertido.

A mi hermana María Camila Sánchez por ser mi amiga incondicional, por ser un ejemplo del amor de Dios en mi vida.

A mis padrinos Fernando Sánchez y Olga Gómez por ser el motor que ha impulsado mi vida, por abrir sus brazos cuando más lo necesitaba.

Mis abuelos, por estar conmigo y apoyarme siempre, especialmente a mi abuela Aurita porque antes de partir me transmitió las enseñanzas necesarias para poder superar cualquier obstáculo que tuviera en la vida.

A mis maestros por impartir sus conocimientos y prepararme para un futuro competitivo no solo como el mejor profesional sino también como mejor persona.

Gracias a la vida por este nuevo triunfo, gracias a todas las personas que me apoyaron y creyeron en mí.

Juan Sebastián Sánchez Gómez

Tabla de contenido

Introducción 1
Descripción del problema 2
Formulación del problema 2
Justificación y delimitación del proyecto 3
Objetivos 4
Objetivo general 4
Objetivos específicos 4
Marco referencial 5
Antecedentes teóricos 5
Marco conceptual 6
Suelo 6
Cemento 6
Suelo-cemento 6
Acero 6
Estabilización del suelo 8
Estabilización suelo-cemento 8
Límite líquido 8
Límite Plástico 8
Durabilidad 8
Resistencia del suelo 9
Marco Normativo 9
Caracterización del material 10
Caracterización física de la viruta de acero 10
Caracterización física del suelo 10
Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición 10
INV E 122-13. Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado 11
INV E 123-13. Análisis granulométrico de suelos por tamizado 11
INV E 125-13. Determinación del límite líquido de los suelos 13
INV E 126-13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos 14
Clasificación del material 16
Diseño de mezclas de suelo-cemento-viruta de acero 18

INV E 611-13. Relaciones de humedad-masa unitaria de mezclas suelo-cemento..... 18
INV E 614-13. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento..... 22
INV E 612-13. Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento 33
Análisis de Resultados 43
Conclusiones y recomendaciones..... 51
Bibliografía 53
Anexos..... 54

Lista de tablas

Tabla 1. Datos obtenidos en el ensayo de pérdida por ignición 10
Tabla 2. Determinación del contenido de agua 11
Tabla 3. Datos obtenidos en el ensayo de granulometría 12
Tabla 4. Datos obtenidos en el ensayo de límite líquido 14
Tabla 5. Datos obtenidos en el ensayo de límite plástico 15
Tabla 6. Comparación entre requisitos INV E 350-13 y resultados 17
Tabla 7. Contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas suelo-cemento 18
Tabla 8. Porcentajes de agua usados para elaborar las mezclas 19
Tabla 9. Combinaciones viruta de acero-cemento 23
Tabla 10. Resistencias obtenidas para 4% de cemento con los diferentes porcentajes de viruta de acero 24
Tabla 11. Resistencias obtenidas para 6% de cemento con los diferentes porcentajes de viruta de acero 25
Tabla 12. Resistencias obtenidas para 8% de cemento con los diferentes porcentajes de viruta de acero 25
Tabla 13. Resistencias promedio obtenidas para 0% de viruta de acero 26
Tabla 14. Resistencias promedio obtenidas para 0% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento 27
Tabla 15. Resistencias promedio obtenidas para 2,5% de viruta de acero 28
Tabla 16. Resistencias promedio obtenidas para 2.5% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento 29
Tabla 17. Resistencias promedio obtenidas para 5% de viruta de acero 29
Tabla 18. Resistencias promedio obtenidas para 5% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento 30
Tabla 19. Resistencias promedio obtenidas para 7,5% de viruta de acero 31
Tabla 20. Resistencias promedio obtenidas para 10% de viruta de acero 32
Tabla 21. Porcentaje de pérdidas de las dosificaciones óptimas 39
Tabla 22. Máximo cambio de volumen y contenido máximo de humedad 40
Tabla 23. Comparación entre requisitos INV E 350-13 y resultados 42
Tabla 24. Resistencias obtenidas con 7,5% y 10% de viruta de acero para 4% y 6% de cemento ... 46

Lista de figuras

Figura 1. Tipos de Virutas 7
Figura 2. Ensayo de pérdida por ignición 11
Figura 3. Realización del ensayo de granulometría 12
Figura 4. Curva granulométrica 13
Figura 5. Muestras obtenidas durante el ensayo de límite líquido 13
Figura 6. Curva de fluidez 14
Figura 7. Rollos de suelo 15
Figura 8. Clasificación de suelos y agregados por metodología AASHTO 16
Figura 9. Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento 17
Figura 10. Curva de compactación para el suelo natural 19
Figura 11. Curva de compactación para suelo-cemento-0%Viruta de acero 20
Figura 12. Curva de compactación para suelo-cemento-2,5%Viruta de acero 20
Figura 13. Curva de compactación para suelo-cemento-5%Viruta de acero 21
Figura 14. Curva de compactación para suelo-cemento-7,5%Viruta de acero 21
Figura 15. Curva de compactación para suelo-cemento-10%Viruta de acero 22
Figura 16. Ensayo de resistencia a la compresión 24
Figura 17. Gráfica contenido óptimo de cemento para 0% de viruta de acero. 26
Figura 18. Gráfica contenido óptimo de cemento para 0% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento. 27
Figura 19. Gráfica contenido óptimo de cemento para 2,5% de viruta de acero. 28
Figura 20. Gráfica contenido óptimo de cemento para 2.5% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento. 29
Figura 21. Gráfica contenido óptimo de cemento para 5% de viruta de acero. 30
Figura 22. Gráfica contenido óptimo de cemento para 5% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento. 31
Figura 23. Contenido óptimo de cemento para 7,5% de viruta de acero. 32
Figura 24. Gráfica contenido óptimo de cemento para 10% de viruta de acero. 33
Figura 25. Ensayo de humedecimiento y secado. 34
Figura 26. Probetas ensayadas por humedecimiento y secado después de horno. 35
Figura 27. Probetas ensayadas por humedecimiento y secado después de sumergidos en agua. 35
Figura 28. Gráfica variación en el peso para dosificación de 0% Acero y 8.6% Cemento 36
Figura 29. Gráfica variación en el peso para dosificación de 2.5% Acero y 8.2% Cemento 37
Figura 30. Gráfica variación en el Peso para dosificación de 5% Acero y 8.2% Cemento 37

Figura 31. Gráfica variación en el peso para dosificación de 7.5% Acero y 8% Cemento 38
Figura 32. Gráfica variación en el peso para dosificación de 10% Acero y 7.4% Cemento 38
Figura 33. Gráfica variación en el peso para dosificación de 10% Acero y 7.4% Cemento (Segunda Muestra) 39
Figura 34. Porcentaje de pérdidas en cada dosificación 40
Figura 35. Gráfica máximo cambio de volumen (%) vs combinación de cemento y viruta de acero 41
Figura 36. Contenido máximo de humedad (%) vs combinación de cemento y viruta de acero..... 41
Figura 37. Gráfica Porcentaje de acero vs Humedad óptima (6% cemento) 44
Figura 38. Gráfica Porcentaje de acero vs Densidad seca para 6% de cemento..... 44
Figura 39. Gráfica resistencias obtenidas con el 4% de Cemento 45
Figura 40. Gráfica resistencias obtenidas con el 6% de Cemento 45
Figura 41. Gráfica resistencias obtenidas con el 8% de Cemento 47
Figura 42. Gráfica comparación de resistencias obtenidas vs % Viruta Acero 48
Figura 43. Gráfica %Óptimo de cemento vs %Viruta de acero..... 48
Figura 44. Criterios de diseño para la mezcla de suelo-cemento..... 50

Introducción

Desde que la humanidad se empezó a interesar en el cambio climático y la contaminación ambiental se han buscado distintas soluciones y estrategias que permitan preservar los recursos naturales y así frenar un poco este proceso.

Esta investigación consistió en la adición de viruta de acero a una mezcla suelo-cemento para evaluar las propiedades mecánicas resultantes por medio de ensayos de laboratorio y determinar si es recomendable su aplicación en la estabilidad de suelos para la construcción de obras civiles. Cabe recalcar que el material modificador usado es un material reciclado, por eso se quiso aplicarlo en esta investigación y así ser amigable con el medio ambiente.

Para realizar este trabajo experimental se diseñó una base estabilizada con cemento y se caracterizó físico-mecánicamente. Se prepararon las mezclas de suelo-cemento-viruta de acero con diferentes porcentajes de agua para hallar el contenido óptimo de humedad. Luego se hicieron 9 briquetas para cada combinación de suelo-cemento-viruta de acero, con porcentajes de 4, 6 y 8 para el cemento y 0, 2.5, 5, 7.5 y 10 para la viruta de acero y se fallaron a compresión para hallar la resistencia y así definir el porcentaje óptimo de cemento para cada porcentaje de viruta de acero. Por último se realizaron dos probetas con cada a una de las combinaciones optimas obtenidas en el ensayo de resistencia (10 en total) y dos adicionales para la combinación que mayor resistencia presento, las cuales se usaron para el ensayo de humedecimiento y secado.

Descripción del problema

Muchos de los materiales que se usan de forma cotidiana son tomados de la naturaleza y sometidos a procesos industriales para transformarlos en las distintas formas y productos que conocemos, utilizamos y consumimos a diario. Sin embargo, la mayoría de los recursos tomados de la naturaleza como los metales después de someterse a los diferentes procesos se vuelven materiales no biodegradables y que contribuyen a la contaminación ambiental. Además de esto los metales son recursos no renovables, los cuales se van haciendo más escasos a medida que se explotan para la obtención de los distintos productos e igualmente en la explotación de minas se pierden desmedidamente sin ningún aprovechamiento. Según el periódico Portafolio (2014) "El informe del EAC explica, a su vez, que el consumo actual de acero en Colombia es de 69 kilos por habitante, en promedio, cifra que ha aumentado significativamente durante los últimos años. En el 2011, la producción se estimó en 1'779.511 toneladas, mientras que el consumo aparente alcanzó las 3'217.888 toneladas. En el 2012, esos números fueron de 1'724.860 toneladas, para producción, y 3'505.814 toneladas para el consumo aparente."

Para poder amenorar esta problemática ambiental que deja la producción y manejo del acero es poder darle un uso de esos residuos en actividades de la ingeniería civil el cual, se ha optado por implementar distintos materiales reciclados producto de procesos industriales o de las mismas construcciones. Una solución que se plantea es la utilización de la viruta de acero en la implementación de este proyecto.

Formulación del problema

¿Cómo varían las propiedades mecánicas de una mezcla de suelo-cemento si se adiciona viruta de acero fluida continua de espiral en dosificaciones de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% y 10% con respecto al peso de este mismo?

Justificación y delimitación del proyecto

El acero es un material no biodegradable muy utilizado en la cotidianidad y sobre todo en procesos industriales, por ende, el residuo de los procesos al que este material es sometido es contaminante. Actualmente en la ingeniería y en especial en la ingeniería civil se busca implementar materiales reciclados en la construcción de las obras como una solución para disminuir el impacto ambiental, disminuir costos y mejorar las condiciones constructivas en cuanto a propiedades y vida útil.

En este trabajo busco aprovechar esos residuos, en este caso viruta de acero, generalmente considerado como un desperdicio, para aportar a la sostenibilidad del medio ambiente implementándolos en la estabilización del suelo destinado a construcción de obras civiles y de igual manera se estudió los beneficios que pueda aportar a estos.

Para ello, el proyecto se enfocó en el comportamiento mecánico que tuvo el componente de suelo-cemento de acuerdo a los porcentajes de adición de la viruta de acero con el fin de obtener la dosificación óptima con el cual el comportamiento de este (suelo-cemento) fue superior.

En esta investigación se utilizó el tipo de viruta mostrado en el inciso C de la figura 1, la cual se denomina “Fluida Continua de Espiral” puesto que es el residuo no atractivo para reutilización ante las industrias y, por ende, es la que comúnmente se utiliza para investigaciones. Esta viruta fue una donación de la empresa Ingemet Ltda, con motivo de colaboración a la investigación. El suelo que se utilizo fue obtenido de una cantera de Bogotá (se realizaron los ensayos descritos en el marco normativo para verificar que este suelo cumplía con las características y requisitos mencionados en las norma INV E-121-13, INV E-123-13, INV E-125-13 e INV E-126-13). El plan de ensayos que se realizaron para la caracterización del suelo y la mezcla suelo-cemento-viruta de acero están señaladas en el marco normativo del documento.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el comportamiento mecánico de una mezcla de suelo-cemento con adición de viruta de acero en proporciones de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% y 10% con respecto al peso de este y definir si es apto para proponerlo como material estabilizante.

Objetivos específicos

- Determinar si la viruta de acero mejora la resistencia del suelo.
- Determinar si la viruta de acero mejora la durabilidad del suelo.
- Definir la dosificación óptima (si la hay) de viruta de acero que mejore la resistencia y durabilidad del suelo. INV-E 350-13

Marco referencial

Antecedentes teóricos

- Según Infante, Andrés. (2015). “Evaluación de características físicas y mecánicas de una base estabilizada con cemento modificada con vidrio templado reciclado” (Tesis de pregrado). Universidad de La Salle. El proyecto consistió en conocer la resistencia del suelo-cemento con vidrio templado y la cantidad de cemento necesaria para tener los resultados aceptados según el Invías por el cual se realizaron cuatro tipos de mezclas con un porcentaje de 0%, 5%, 10% y 15% de vidrio templado que fueron representados al peso de la mezcla del suelo-cemento y no por volumen. Este tipo de proyecto investigativo fue realizado según las especificaciones del artículo del Invías 341-07.
- Según Meneses y Fuentes. (2015). “Base estabilizada con cemento, modificada con PET reciclado” (Tesis de pregrado). Universidad de La Salle. El proyecto investigativo consistió en conocer las propiedades mecánicas de la mezcla de suelo-cemento con PET reciclado, y con los resultados determinar si se puede proponer para uso con fines constructivos. Para la realización del proyecto se basó en 3 dosificaciones de los cuales fueron 5%, 10% y 15% de PET reciclado del cual fueron representados al peso de la mezcla de suelo-cemento. El proyecto fue elaborado bajo los parámetros y condiciones del Invías mediante el artículo 341-07.
- Según Ochoa y Valderrama. (2012). “Base estabilizada con cemento modificada con grano de caucho de llanta” (Tesis de pregrado). Universidad de La Salle. El proyecto investigativo, consistió en utilizar el grano de caucho en adición de una base estabilizada con cemento, en el cual el objetivo de este es poder analizar el comportamiento y así determinar si es viable la implementación de este tipo de adiciones en un proyecto de construcción de pavimentos. Para la elaboración de los ensayos, estos se basan en los diseños requeridos de acuerdo con el artículo 341 del Invías en el cual estos proponen tres tipos de porcentajes de dosificación de grano de caucho como lo son el 5%, 25% y 50% de los cuales esos son incluidos en peso y no en volumen.

Marco conceptual

Suelo: El suelo se trata de un conjunto con una organización definida con propiedades que varían de manera vectorial. El suelo posee diferentes tipos de definiciones dentro de los cuales se encuentran por parte de interpretación de un Geólogo como “el material intemperado con contenido de materia orgánica cerca de la superficie” pero en este se contradice según la Ingeniería ya que dentro de la definición no se considera los materiales que son transportados no intemperados. Pero haciendo énfasis teniendo en cuenta diferentes definiciones, se llega a una completa que es “representa todo tipo de material terroso, desde un relleno de desperdicio, hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas suaves.” Dentro de esta definición se debe tener en cuenta el agua que es contenida ya que juega un papel tan fundamental en el comportamiento mecánico de suelo. (Juárez & Rico, 2005, p. 34)

Cemento: El cemento es el ingrediente principal del concreto y la sustancia que le da su propiedad adhesiva. Es un polvo fino gris resultado de un proceso de transformación de calizas y arcillas sometidas a altas temperaturas. El tipo más usado es el cemento Portland, llamado así por su semejanza con una piedra de la isla de Portland ubicado en Gran Bretaña empleada en construcción. (Holcim, 2015)

Suelo-cemento: El suelo-cemento es una mezcla de suelo pulverizado, cantidades medidas de cemento portland y agua. El suelo cemento compactado contiene suficiente cemento como para conformar una estructura resistente y durable, y el grado de humedad óptimo con el fin de brindar la compactación e hidratación del cemento, pero este material tendrá un contenido mínimo de cemento donde la función será garantizar la resistencia requerida y con esto poder cumplir los ensayos de durabilidad entre otros. (Instituto del cemento Portland argentino, ICPA, 2015)

Acero: El acero es una aleación entre el hierro y el carbono en el que puede tener un porcentaje de 0.03% hasta 1.075% del peso en sentido de composición. Este se puede obtener de manera fácil debido a la gran abundancia que existe de los materiales que lo forman; la densidad de este es de 7850 kg/m^3.

Las propiedades que posee este material o este tipo de aleación son:

● El punto de fusión es de 1375°C.

● El punto de ebullición es de 3000°C.

● Posee corrosión debido a que el hierro como es vulnerable a la oxidación.

● Tiene una alta conductividad eléctrica.

● Posee buena resistencia al desgaste.

(Asociación Latinoamericana del Acero, Alacero, 2011)

Para la obtención de esta viruta es necesario realizar el maquinado; en el cual este se basa en la remoción por medio de una herramienta de corte de todo el exceso del material. Cuando el proceso del maquinado termina se presenta una deformación del material lo que forma finalmente la "viruta". La formación de la viruta es en realidad un poco compleja debido a que al cortar el material existen 2 tipos de formaciones de viruta: 1. Cortadas y fragmentadas para maquinado libre. 2. Continuas, rectas o helicoidales en el que se obtienen por el corte de materiales dúctiles y estos son utilizados en investigaciones.

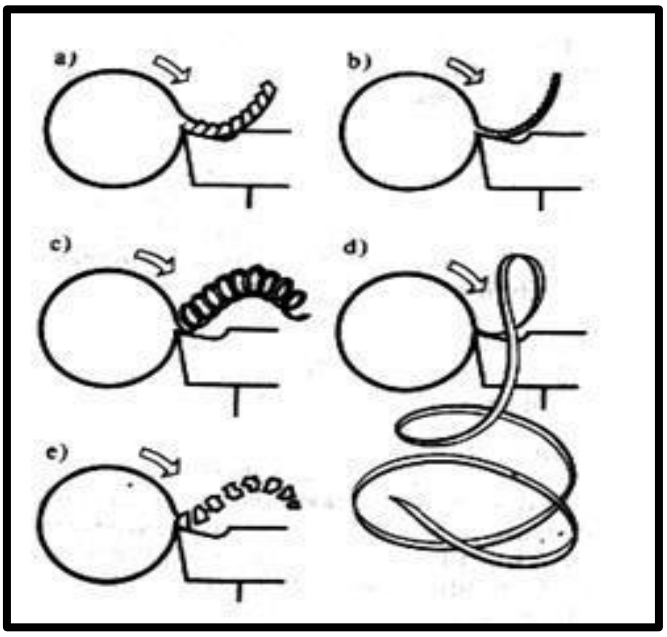

Figura 1. Tipos de Virutas.
Fuente: Monografías.

Estabilización del suelo: La estabilización de suelos son métodos que mejoran la resistencia del suelo. Incluyen procesos físicos y químicos de los cuales estos aumentan la cohesión y la fricción de la mezcla suelo-producto estabilizante, los métodos para mejorar la resistencia del suelo son: Inyecciones o uso de químicos, magmaficación, congelación, electro-osmosis, explosivos. (Geotecnología S.A.S, 2013)

Estabilización suelo-cemento: El cemento, mezclado íntimamente con el suelo desarrolla una red de enlaces durante las reacciones de hidratación que proporciona a la mezcla, una buena capacidad de soporte e incluso, con la dotación adecuada, una cierta resistencia mecánica a corto plazo, y mejora tanto su durabilidad, entendiendo por tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como su estabilidad dimensional. Aunque son los suelos granulares los que presentan una mejor y más rápida mejora de resultados ante un reducido aporte de cemento. (Instituto Nacional de vías, Invías, 2013)

Límite líquido: El límite líquido es el contenido de agua, expresado en porcentaje respecto al peso del suelo seco, que delimita la transición entre el estado líquido y plástico de un suelo remoldeado o amasado. (Invías, 2013)

Límite Plástico: El límite plástico es la humedad a partir de la cual un suelo deja de tener un comportamiento frágil para pasar a tenerlo plástico, es decir, la humedad límite entre el estado sólido y el plástico. A partir de esta humedad, el suelo puede sufrir cambios de forma irreversibles sin llegar a fracturar, y por debajo de esta el suelo no presenta plasticidad. (Invías, 2013)

Durabilidad: Existen algunos suelos los cuales, sometidos a temperaturas muy bajas, a congelamiento y descongelamiento repetitivos, pierden gran parte de su resistencia. Arcillas y limos, por lo general, sufren este tipo de daño. Durante la etapa de congelamiento es posible que estos suelos den lugar a la formación de lentes de suelo, llegando a crecer de una forma apreciable, hasta el punto en que pueden alcanzar deformaciones alarmantes en la superficie de carreteras. Tres elementos son necesarios para que este tipo se desarrolle, suelo susceptible, bajas temperaturas, fuente de agua subterránea que alimente los lentes del suelo. (ARQHYS, 2012)

Resistencia del suelo: La resistencia del terreno es de fundamental importancia en un estudio geotécnico, por ello, la capacidad mecánica del subsuelo se analiza en forma empírica o por formulación analítica. Frente al fenómeno de hundimiento contempla el análisis de la generación de superficies de rotura cuando la componente vertical de la tensión media entre cimiento y terreno es mayor a un valor crítico llamado carga de hundimiento. En líneas generales se trata del establecimiento de las condiciones límites de equilibrio entre las fuerzas exteriores aplicadas y la resistencia ejercida por el terreno frente a ellas. (CONSTRUMÁTICA)

Marco Normativo

Para el desarrollo de este trabajo de investigación se tuvo en cuenta la normativa presentada en las Especificaciones Generales de Construcción de carreteras 2013 del Invías.

- Artículo 350 “Suelo-cemento”.
- Artículo 501 “Suministro de cemento hidráulico”.
- Norma 121 “Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de perdida por ignición”.
- Norma 122 “Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado”.
- Norma 123 “Análisis granulométrico de suelos por tamizado”.
- Norma 125 “Determinación del límite liquido de los suelos”.
- Norma 126 “Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos”.
- Norma 611 “Relaciones humedad-densidad de mezclas de suelo-cemento”.
- Norma 612 “Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento”.
- Norma 613 “Preparación y curado de probetas de suelo-cemento para pruebas de compresión simple y flexión en el laboratorio”.
- Norma 614 “Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento”

Caracterización del material

Caracterización física de la viruta de acero

Para el desarrollo del proyecto no se realizaron ensayos a la viruta de acero ya que no se contempló en el alcance y a su vez la naturaleza del material no permite ser manejado fácilmente para realizar los ensayos descritos en las normas INV E-121-13, INV E-122-13, INV E-125-13, INV E-126-13.

Caracterización física del suelo

El material con el cual se trabajo es natural, proveniente de una cantera localizada en el sur de la ciudad de Bogotá, Cundinamarca. Este material fue sometido a modificaciones porcentuales con viruta de acero y permitió formar la mezcla de suelo-cemento-viruta de acero, la cual se sometió a los ensayos exigidos por el Artículo 350-13 del Invías sin tener en cuenta los ensayos de características químicas, para de esta manera evaluar la posibilidad de ser utilizado en la estabilización de suelos.

Se realizaron los ensayos de contenido de materia orgánica, contenido de humedad, análisis granulométrico, límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad para el suelo natural.

INV E 121-13. Determinación del contenido orgánico de un suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición.

Este ensayo se realiza para hallar el contenido de materia orgánica del suelo. Para realizar el ensayo se tomó una muestra de 50 gr de material pasa tamiz No. 10 y se obtuvo los siguientes datos:

Tabla 1. Datos obtenidos en el ensayo de pérdida por ignición.

DATOS	
Peso muestra seca + tazón (g)	129,55
Peso muestra incinerada + tazón (g)	129,06
Peso tazón (g)	79,57
Contenido de materia orgánica (%)	0,990

Fuente: Autores.

Figura 2. Ensayo de pérdida por ignición.

Fuente: Autores.

INV E 122-13. Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado

Este ensayo se realiza para hallar el contenido de agua por masa de suelo.

Tabla 2. Determinación del contenido de agua

DATOS PARA HUMEDAD	
Peso platón (g)	200
Peso muestra (g)	3000
Peso platón + muestra húmeda(g)	3200
Peso platón + muestra seca (g)	3062.88
Humedad (%)	5

Fuente: Autores.

INV E 123-13. Análisis granulométrico de suelos por tamizado

En este ensayo se determina de forma cuantitativa la distribución de los tamaños de las partículas del suelo.

Figura 3. Realización del ensayo de granulometría al suelo natural.

Fuente: Autores.

Los datos del ensayo son los siguientes:

Tabla 3. Datos obtenidos en el ensayo de granulometría.

GRANULOMETRÍA				
Tamiz	Tamiz (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Pasa
1 1/2 "	37,5	37,3	0,694	99,306
1"	25	328	6,101	93,205
3/4"	19	310	5,766	87,439
3/8"	9,5	858	15,959	71,480
N° 4	4,75	594,59	11,060	60,421
N°10	2	495,05	9,208	51,213
N°40	0,425	646,76	12,03	39,138
N°200	0,075	2298,5	42,753	2,233
Fondo		120,06	2,233	0,000
Total		5376,26	100,000	-

Fuente: Autores.

A partir de los datos anteriores se realizó la curva granulométrica.

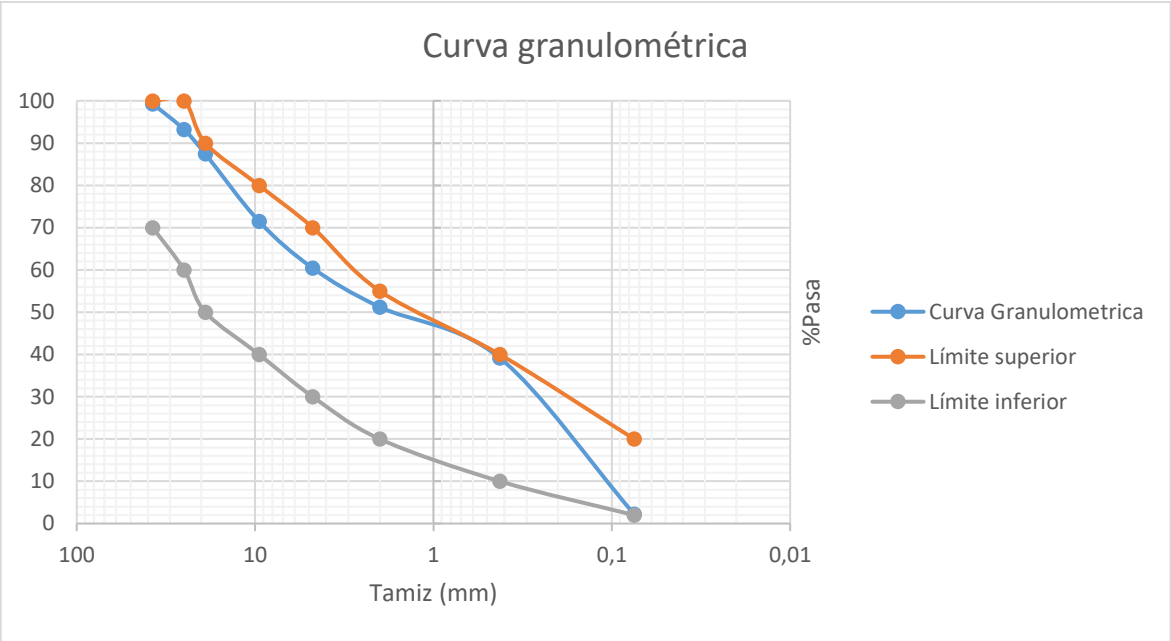

Figura 4. Curva granulométrica Tipo de gradación A-50 (Invías).

Fuente: Autores.

INV E 125-13. Determinación del límite líquido de los suelos

El límite líquido es el contenido de agua en el suelo cuando este se encuentra en el límite entre estado líquido y plástico, y se expresa en porcentaje.

El ensayo se realizó por el método A, en donde se tomaron 3 puntos diferentes.

Figura 5. Muestras obtenidas durante el ensayo de límite líquido.

Fuente: Autores.

Los resultados del ensayo son los siguientes:

Tabla 4. Datos obtenidos en el ensayo de límite líquido.

LÍMITE LÍQUIDO			
N de golpes	34	25	14
N de molde	123	145	102
Peso de molde + muestra húmeda (g)	38,87	36,56	36,12
Peso de molde + muestra seca (g)	32,67	30,34	29,13
Peso molde (g)	8,91	9,14	8,45
Contenido de humedad (%)	26,09	29,34	33,80
Límite líquido (%)		30	

Fuente: Autores.

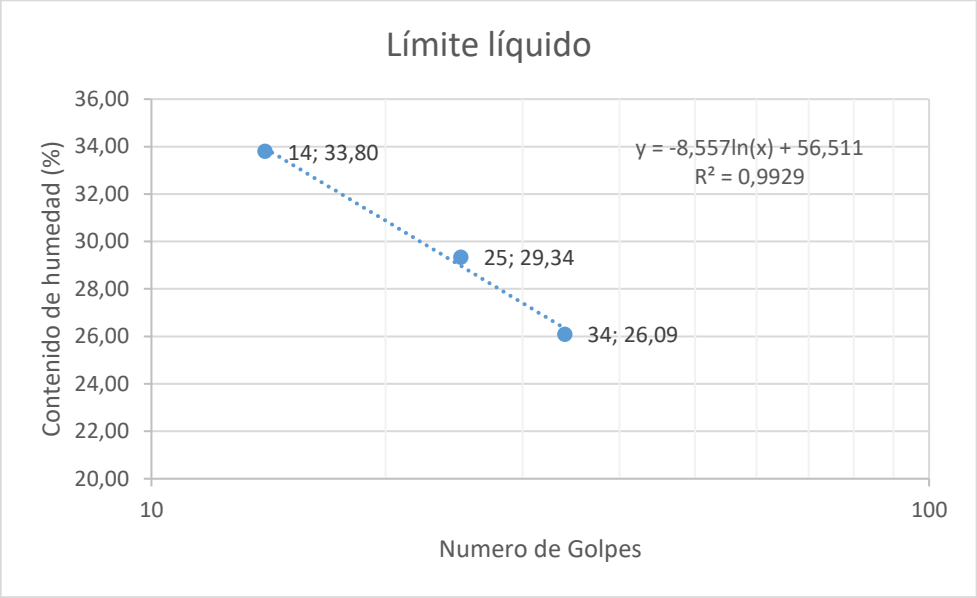

Figura 6. Curva de fluidez.

Fuente: Autores.

En la figura 6 se muestra la curva de fluidez, donde se tiene en el eje vertical el contenido de humedad (%) y en el eje horizontal con escala logarítmica, el número de golpes necesarios para cerrar la ranura aproximadamente 13 mm en la cazuela.

INV E 126-13. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

El límite plástico es el contenido de agua en el suelo cuando este se encuentra en el límite entre estado plástico y semisólido, y se expresa en porcentaje.

El índice de plasticidad corresponde al contenido de agua en el suelo con el cual este se comporta plásticamente y se calcula restando el límite líquido y el límite plástico.

Figura 7. Rollos de suelo.

Fuente: Autores.

Los resultados obtenidos en el ensayo son los siguientes:

Tabla 5. Datos obtenidos en el ensayo de límite plástico.

LÍMITE PLÁSTICO		
N de molde	126	8
Peso de molde + muestra húmeda (g)	26,17	19,25
Peso de molde + muestra seca (g)	23,13	17,61
Peso molde (g)	10,02	10,95
Contenido de humedad (%)	23,19	24,62
Límite plástico (%)	24	

Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos de límite líquido (LL) y límite plástico (LP), se calcula el índice de plasticidad.

$$\text{Índice de plásticidad } (\%) = LL - LP$$

$$\text{Índice de plásticidad } (\%) = 30{,}0 - 24{,}0$$

$$\text{Índice de plásticidad } (\%) = 6$$

Clasificación del material

A partir de los resultados obtenidos (Tabla 3) y con base en la Figura 2 se clasificó el suelo por medio del método AASHTO para encontrar el porcentaje óptimo de cemento según la metodología PCA, teniendo como resultado un suelo A-1-b.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3[A]	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...		...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.[B]
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

Figura 8. Clasificación de suelos y agregados por metodología AASHTO.
Fuente: AASHTO.

Respecto de la granulometría obtenida en el ensayo se clasificó el material por medio de la Tabla 350-3 del Artículo 350-13 del Invías, teniendo como resultado un Tipo de gradación A-50. Así mismo, se tiene que el material si es apto para la construcción de suelo-cemento bajo este criterio.

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 ½"	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 %

Figura 9. Requisitos granulométricos del material para la construcción de suelo-cemento.

Fuente: Invías.

A partir de la clasificación anterior se compara los resultados obtenidos con los requisitos exigidos en el Artículo INV E 350-13 para definir si cumplen o no.

Tabla 6. Comparación entre requisitos INV E 350-13 y resultados.

Característica	Artículo INV E 350-13	Resultado de ensayos	Cumple o no cumple
Límite líquido, % máximo	30	30,0	Cumple
Índice de plasticidad, % máximo	12	6,0	Cumple
Contenido de materia orgánica, % máximo	1	0,99	Cumple

Fuente: Autores.

Diseño de mezclas de suelo-cemento-viruta de acero

Para el diseño de las mezclas de suelo-cemento fue necesario determinar los porcentajes óptimos de cemento según la clasificación de suelo de acuerdo a la metodología PCA.

Tabla 7. Contenido de cemento aproximado para proyectar las mezclas suelo-cemento.

GRUPO DE SUELO SEGÚN LA AASHTO	% DE CEMENTO REQUERIDO EN PESO	CONTENIDO DE CEMENTO ESTIMADO PARA LA PRUEBA DE COMPACTACIÓN EN PESO	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
A2	5 a 9	7	5 - 7 - 9
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

Fuente: PCA (Portland Cement Association).

El agua utilizada para hacer las probetas fue agua potable.

El cemento fue cemento Portland Tipo I, Holcim.

Luego de definir la cantidad de cemento necesaria para realizar el ensayo de Relaciones de humedad-masa unitaria de mezclas suelo-cemento (INV E 611-13) se procedió a realizarla.

INV E 611-13. Relaciones de humedad-masa unitaria de mezclas suelo-cemento

Este ensayo permite determinar la relación entre la humedad y masa unitaria de la mezcla de suelo-cemento y a partir de esta, la humedad óptima y la densidad máxima.

El ensayo se realizó por medio del método A descrito en esta norma.

Se realizó el ensayo para el suelo natural, suelo-cemento y suelo-cemento con adición de viruta de acero en porcentajes de 2,5%, 5%, 7,5% y 10%. Todas las mezclas se elaboraron con 6% de cemento de acuerdo a la Tabla 7.

Los porcentajes de agua para realizar el ensayo fueron los siguientes:

Tabla 8. Porcentajes de agua usados para elaborar las mezclas.

Mezcla	Porcentaje (%) de agua
Suelo	3, 6, 9, 12, 15, 18
Suelo – cemento – 0% Acero	3, 6, 9, 12, 15, 18
Suelo – cemento – 2,5% Acero	9, 12, 15, 18
Suelo – cemento – 5% Acero	9, 12, 15, 18
Suelo – cemento – 7,5% Acero	9, 12, 15, 18
Suelo – cemento – 10% Acero	9, 12, 15, 18

Fuente: Autores.

Los resultados se muestran a continuación en donde la densidad seca se ubica en las ordenadas y la humedad en la abscisa.

El punto máximo de la curva es la densidad seca máxima y la humedad óptima es la que le corresponde a ese punto máximo.

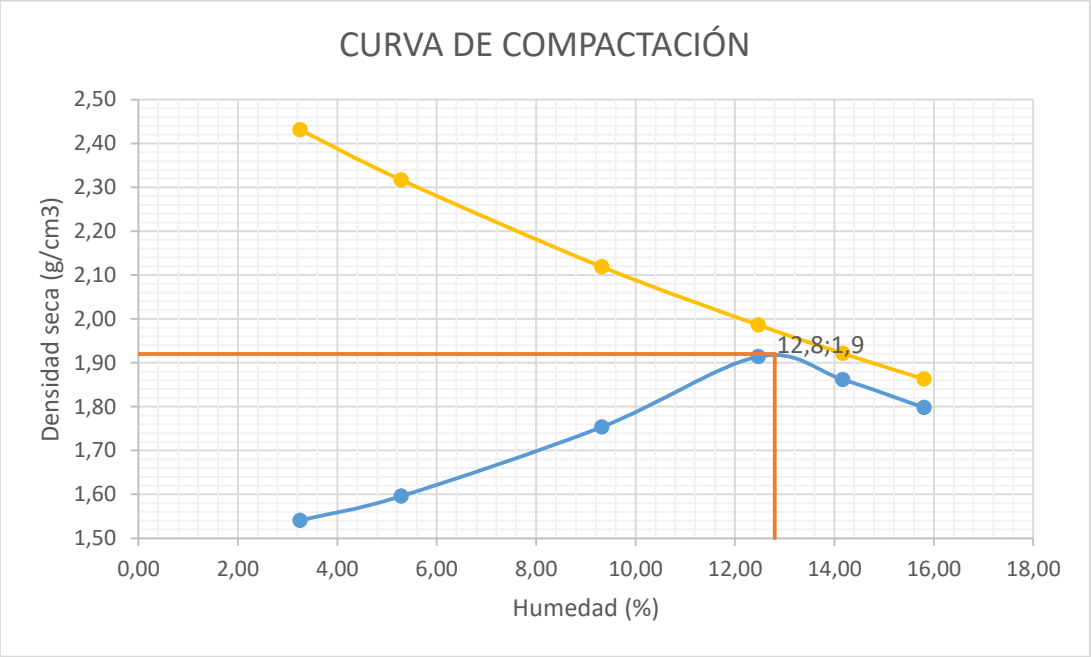

Figura 10. Curva de compactación para el suelo natural.

Fuente: Autores.

Para el suelo natural, la humedad óptima fue de 12,8% y la densidad máxima de 1,91 g/cm^3.

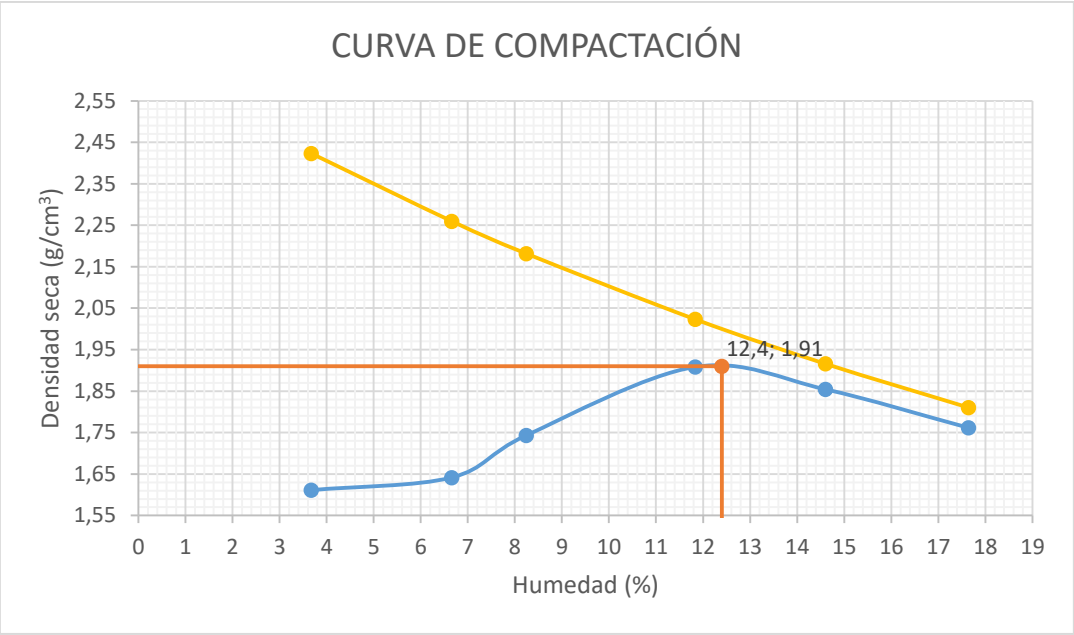

Figura 11. Curva de compactación para suelo-6%cemento-0%Viruta de acero.

Fuente: Autores.

Para el suelo-cemento-0%Viruta de acero, la humedad óptima fue de 12,4% y la densidad máxima de 1,91 g/cm^3.

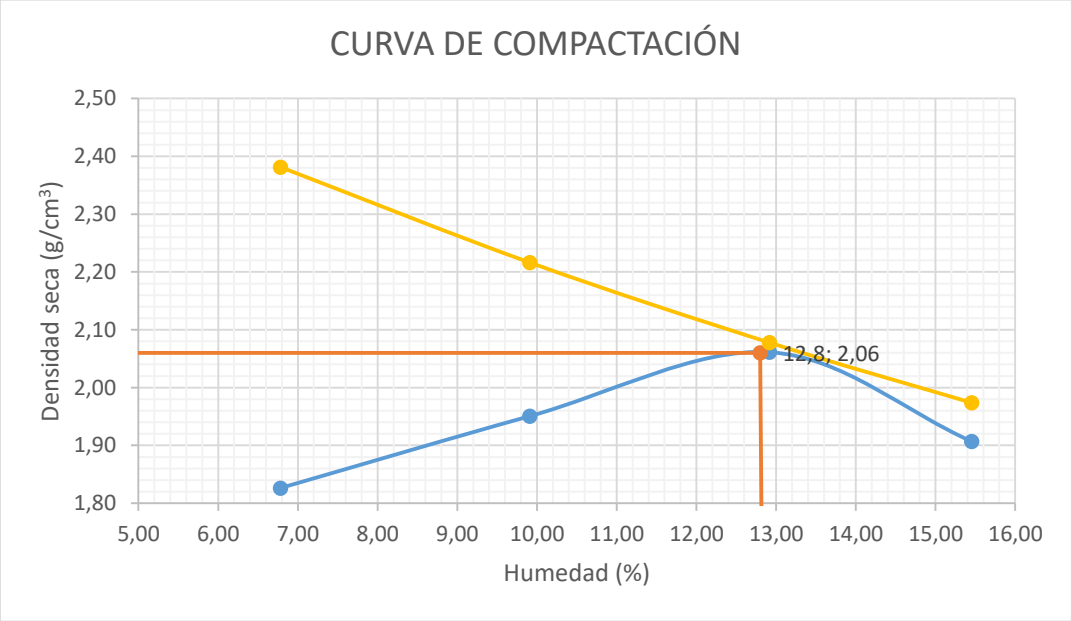

Figura 12. Curva de compactación para suelo-6%cemento-2,5%Viruta de acero.

Fuente: Autores.

Para el suelo-cemento-2,5%Viruta de acero, la humedad óptima fue de 12,8% y la densidad máxima de 2,06 g/cm^3.

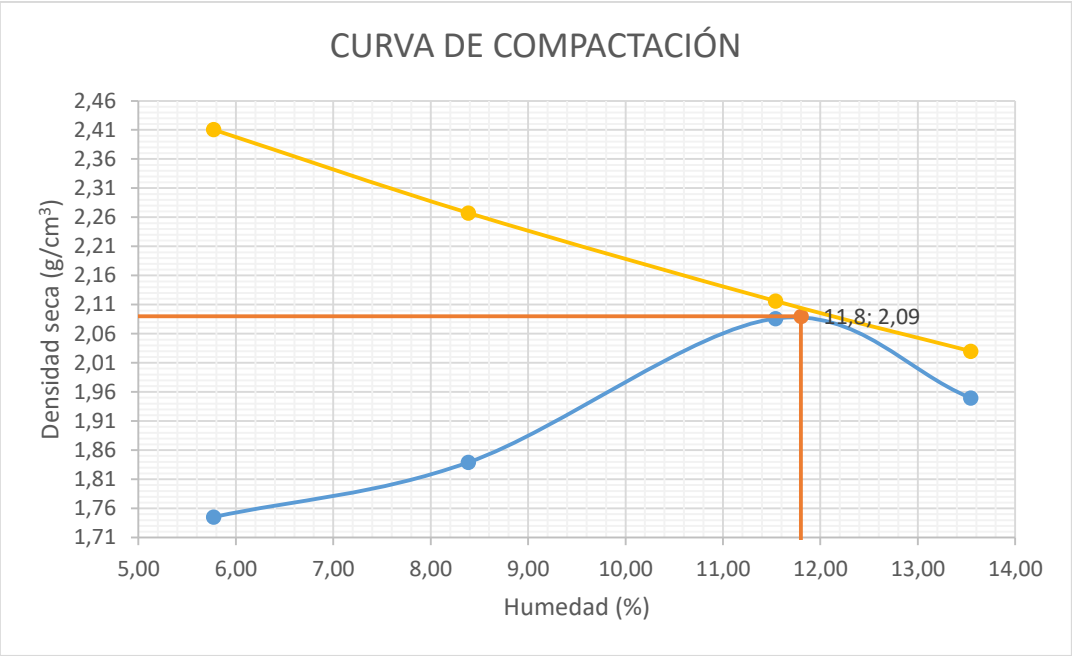

Figura 13. Curva de compactación para suelo-6%cemento-5%Viruta de acero.

Fuente: Autores.

Para el suelo-cemento-5%Viruta de acero, la humedad óptima fue de 11,8% y la densidad máxima de 2,09 g/cm^3.

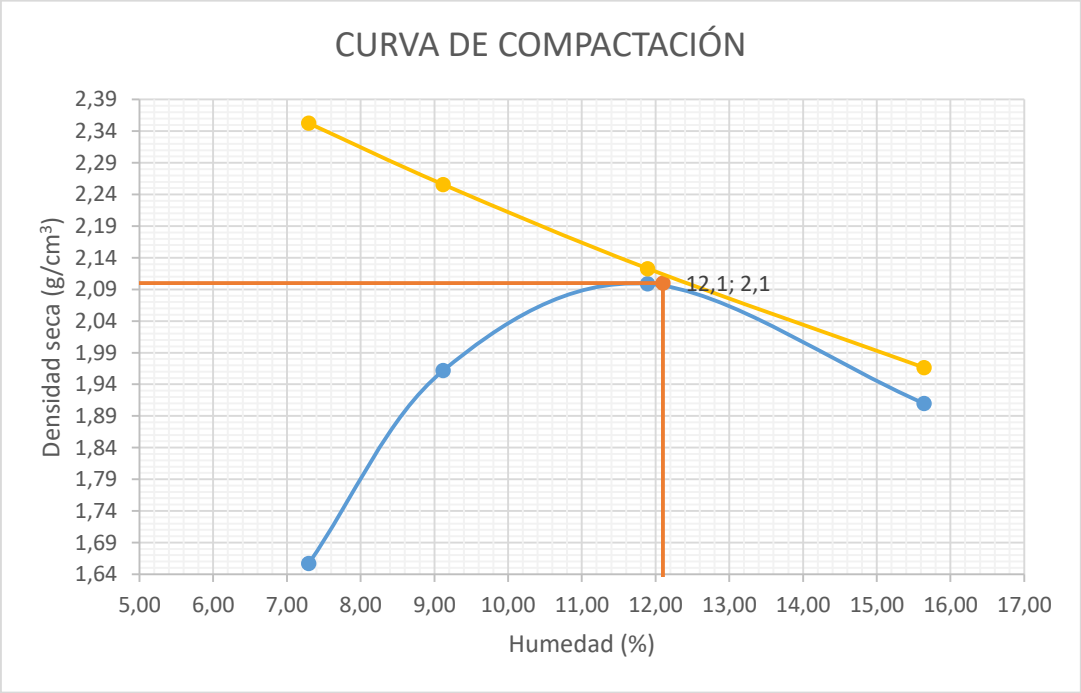

Figura 14. Curva de compactación para suelo-6%cemento-7,5%Viruta de acero.

Fuente: Autores.

Para el suelo-cemento-7,5%Viruta de acero, la humedad óptima fue de 12,1% y la densidad máxima de 2,1.

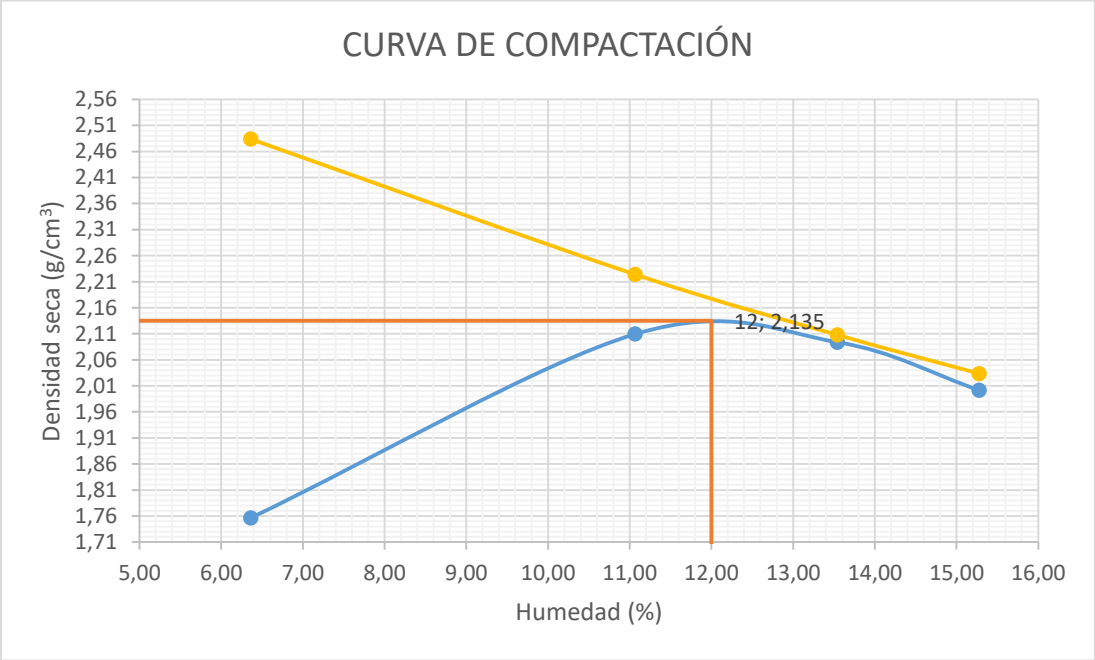

Figura 15. Curva de compactación para suelo-cemento-10%Viruta de acero. Fuente: Autores.

Para el suelo-cemento-10%Viruta de acero, la humedad óptima fue de 12% y la densidad máxima de 2,13.

INV E 614-13. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento

En este ensayo se determina la resistencia a la compresión del suelo-cemento la cual debe ser mínimo de 2.1 Mpa. El método empleado para ejecutar el ensayo fue el método A.

Se realizaron 135 cilindros, combinando los porcentajes de cementos definidos en la metodología PCA (Tabla 7) y los 5 porcentajes de viruta de acero, donde a cada combinación se le realizaron 9 cilindros. A continuación, se muestra las combinaciones realizadas para este ensayo.

Tabla 9. Combinaciones viruta de acero-cemento.

% Viruta de acero	% Cemento	Número de cilindros
0	4	9
	6	9
	8	9
2,5	4	9
	6	9
	8	9
5	4	9
	6	9
	8	9
7,5	4	9
	6	9
	8	9
10	4	9
	6	9
	8	9

Fuente. Autores.

Los cilindros se sometieron a curado durante 7 días y antes de fallarlos se dejaron sumergidos en agua durante 4 horas, después se tomaron medidas a cada uno (altura y diámetro) y posterior a ello se fallaron. En el ensayo se obtuvo el valor de la fuerza necesaria para fallarlos y luego se calculó la resistencia.

Figura 16. Ensayo de resistencia a la compresión.

Fuente: Autores.

A continuación, se muestra el contenido óptimo de cemento para cada porcentaje de acero que se obtuvo al finalizar el ensayo de resistencia a la compresión.

Cabe aclarar que se realizó un promedio de las 9 resistencias obtenidas en cada porcentaje de cemento (4%, 6%, 8%) para poder realizar las gráficas. En anexos (3, 4 y 5) se encuentran los cálculos y resultados de los 9 ensayos por cada porcentaje.

Tabla 10. Resistencias obtenidas para 4% de cemento con los diferentes porcentajes de viruta de acero.

4% de cemento					
Probeta	Resistencia				
	0%VA	2,5%VA	5%VA	7,5%VA	10%VA
1	0,74	0,89	0,93	0,91	0,93
2	0,73	0,89	0,92	1	0,98
3	0,69	0,9	0,89	0,94	0,87
4	0,71	0,92	0,9	0,91	0,93
5	0,78	0,92	0,94	0,96	0,92
6	0,73	0,91	0,92	0,95	0,94
7	0,75	0,91	0,93	0,93	0,92
8	0,74	0,92	0,92	0,92	0,93
9	0,77	0,91	0,91	0,95	0,94

Fuente: Autores.

Tabla 11. Resistencias obtenidas para 6% de cemento con los diferentes porcentajes de viruta de acero.

6% de cemento					
Probeta	Resistencia				
	0%VA	2,5%VA	5%VA	7,5%VA	10%VA
1	1,16	1,56	1,48	1,62	1,41
2	1,22	1,32	1,33	1,57	1,37
3	1,17	1,52	1,56	1,64	1,53
4	1,17	1,56	1,3	1,66	1,7
5	1,2	1,45	1,59	1,43	1,45
6	1,16	1,55	1,41	1,56	1,56
7	1,17	1,48	1,58	1,45	1,48
8	1,24	1,46	1,56	1,59	1,56
9	1,22	1,36	1,4	1,62	1,53

Fuente: Autores.

Tabla 12. Resistencias obtenidas para 8% de cemento con los diferentes porcentajes de viruta de acero.

8% de cemento					
Probeta	Resistencia				
	0%VA	2,5%VA	5%VA	7,5%VA	10%VA
1	1,96	1,94	2,34	2,07	2,41
2	2,14	1,86	1,75	2,18	2,43
3	1,93	2,23	1,89	1,98	2,27
4	1,73	2,2	1,83	2,13	2,37
5	1,93	1,97	2,27	2,01	2,31
6	2,07	2,02	2,03	2,2	2,28
7	1,88	2,07	2,17	2,13	2,21
8	2,04	2,1	2,08	2,09	2,39
9	2,14	2,14	2,16	2,1	2,32

Fuente: Autores.

Tabla 13. Resistencias promedio obtenidas para 0% de viruta de acero.

% Cemento	Resistencia (Mpa)
4	0,74
6	1,19
8	1,98

Fuente: Autores.

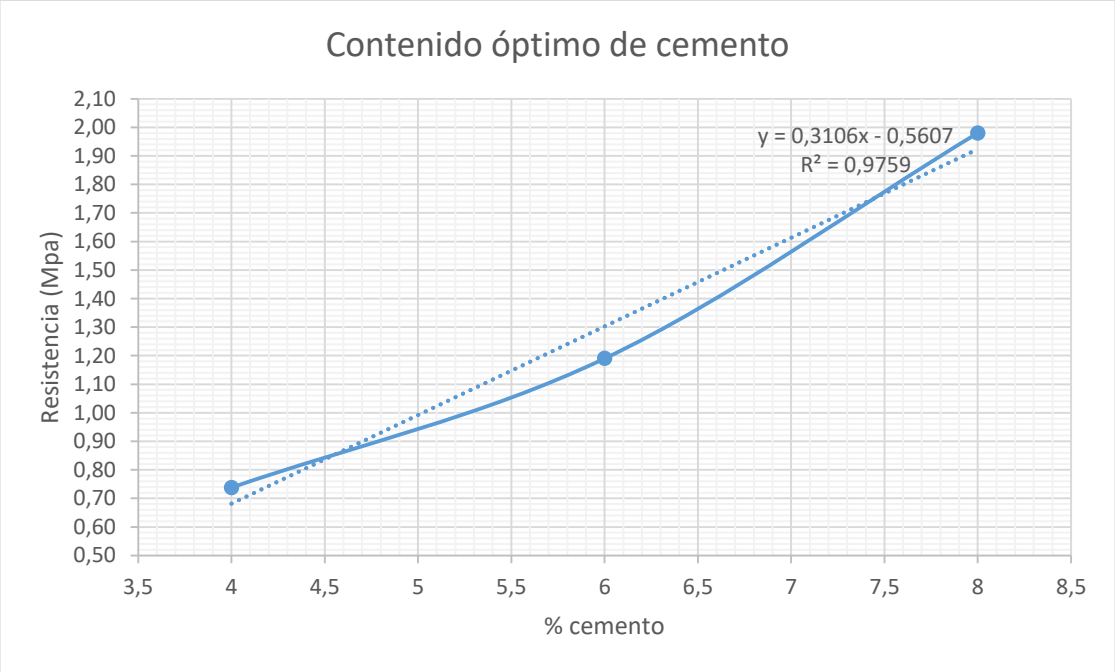

Figura 17. Gráfica contenido óptimo de cemento para 0% de viruta de acero.

Fuente: Autores.

Para hallar el contenido óptimo de cemento que cumpliera con la resistencia mínima de 2,1 MPa fue necesario realizar una línea de tendencia y hallarlo por medio de la regresión lineal. El contenido óptimo de cemento para 0% de viruta de acero fue de 8,6%.

De acuerdo con lo anterior, se observa que el material no logra alcanzar la resistencia mínima de 2.1MPa por lo cual se agregó un porcentaje de 10% de cemento para corroborar si la resistencia mínima se alcanza con este valor. A continuación se muestra el valor promedio obtenido de las resistencias.

Tabla 14. Resistencias promedio obtenidas para 0% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento.

% Cemento	Resistencia (Mpa)
4	0.74
6	1.19
8	1.98
10	2.69

Fuente: Autores.

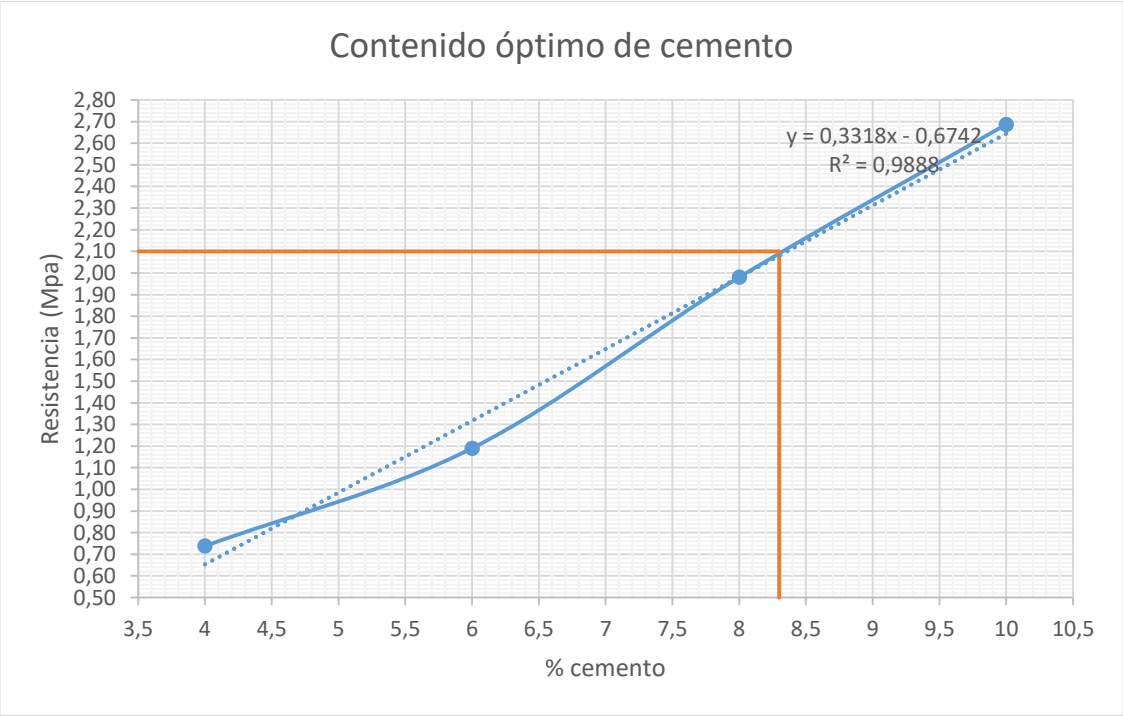

Figura 18. Gráfica contenido óptimo de cemento para 0% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento.

Fuente: Autores.

De acuerdo con la figura 18, se observa que el contenido óptimo de cemento es 8.3%.

Tabla 15. Resistencias promedio obtenidas para 2,5% de viruta de acero.

% Cemento	Resistencia (Mpa)
4	0,91
6	1,47
8	2,06

Fuente: Autores.

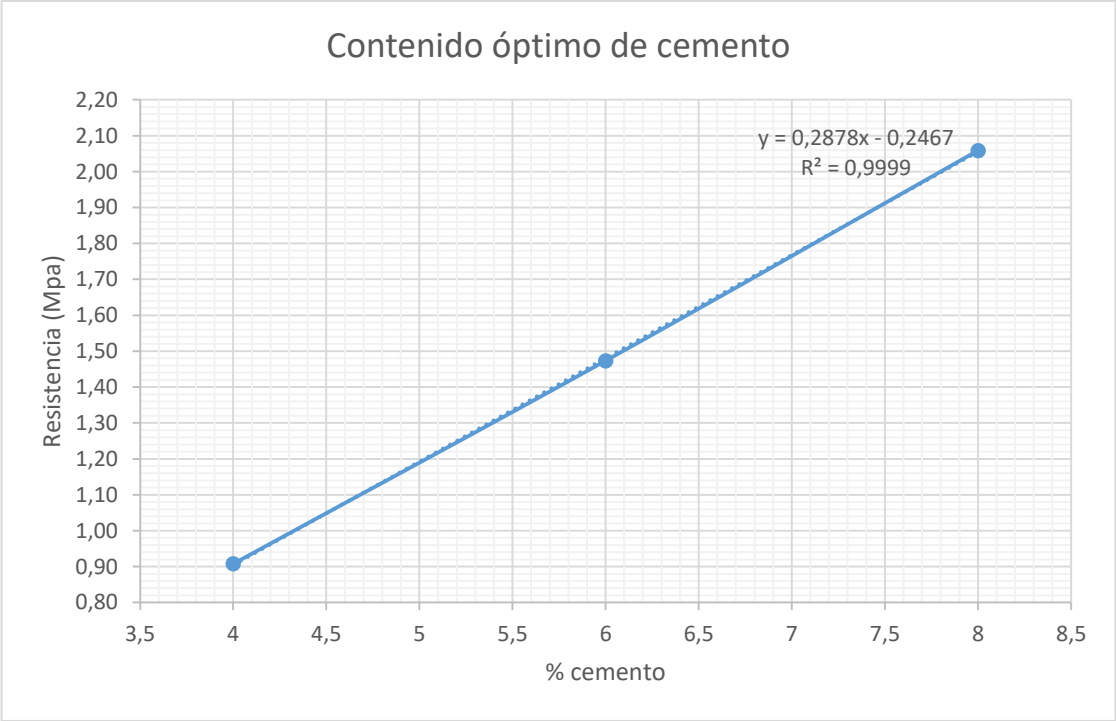

Figura 19. Gráfica contenido óptimo de cemento para 2,5% de viruta de acero.

Fuente: Autores.

Para hallar el contenido óptimo de cemento que cumpliera con la resistencia mínima de 2,1 MPa fue necesario realizar una línea de tendencia y hallarlo por medio de la regresión lineal. El contenido óptimo de cemento para 2,5% de viruta de acero fue de 8,2%.

De acuerdo con lo anterior, se observa que el material no logra alcanzar la resistencia mínima de 2.1MPa por lo cual se agregó un porcentaje de 10% de cemento para corroborar si la resistencia mínima se alcanza con este valor. A continuación se muestra el valor promedio obtenido de las resistencias.

Tabla 16. Resistencias promedio obtenidas para 2.5% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento

% Cemento	Resistencia (Mpa)
4	0.91
6	1.47
8	2.06
10	2.65

Fuente: Autores.

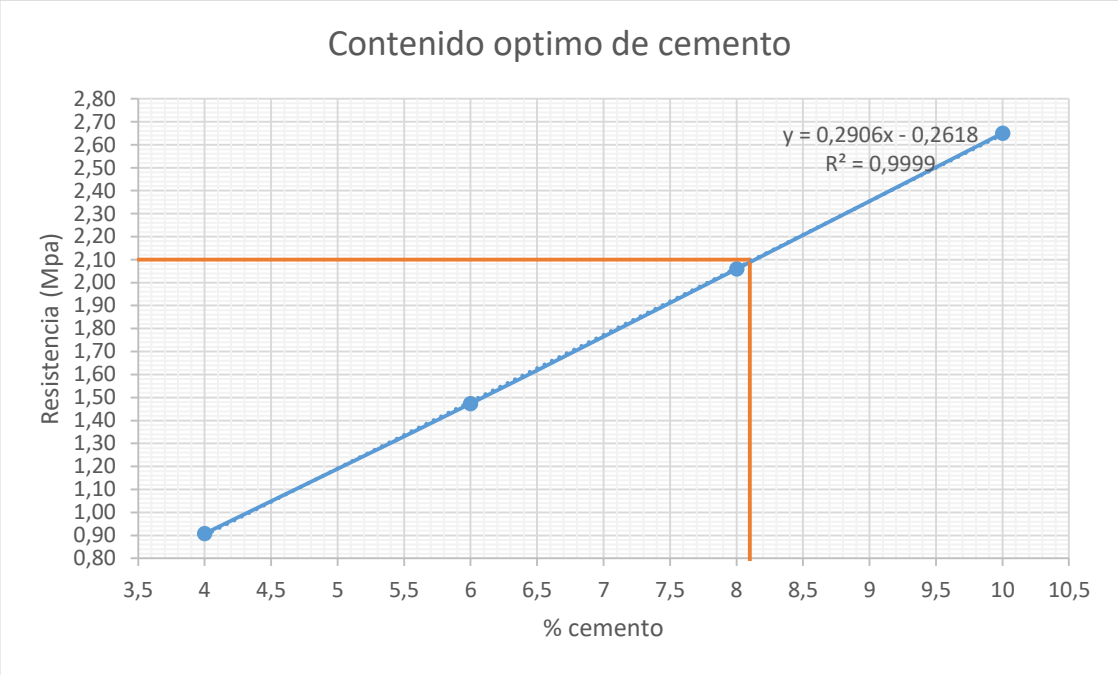

Figura 20. Gráfica contenido óptimo de cemento para 2.5% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento.

Fuente: Autores.

De acuerdo con la figura 20, se observa que el contenido óptimo de cemento es 8.1%.

Tabla 17. Resistencias promedio obtenidas para 5% de viruta de acero.

% Cemento	Resistencia (Mpa)
4	0,92
6	1,47
8	2,06

Fuente: Autores.

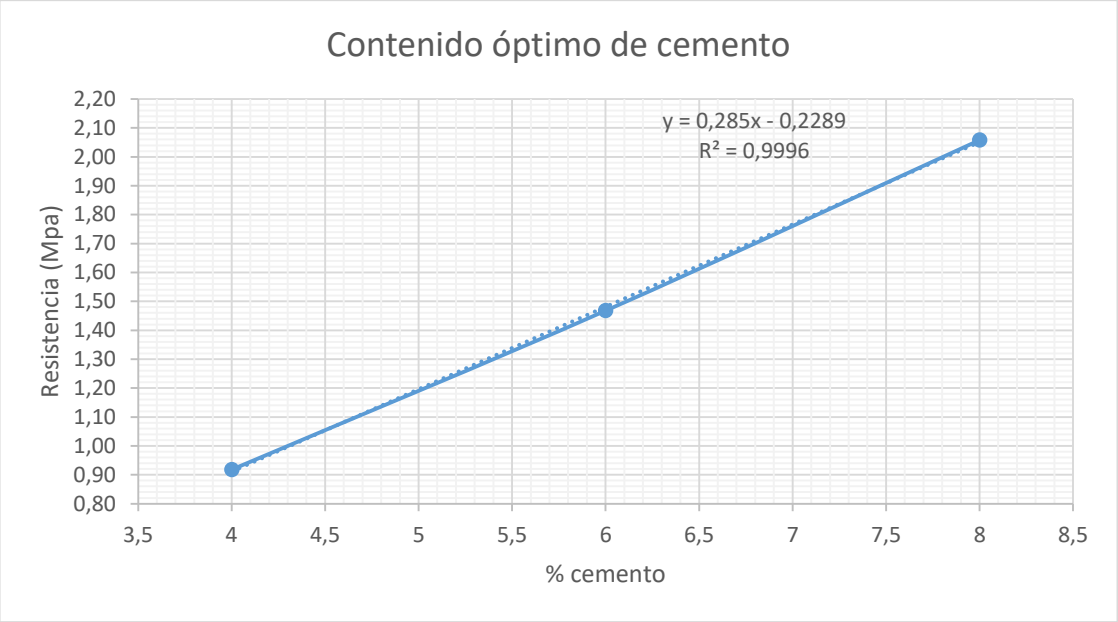

Figura 21. Gráfica contenido óptimo de cemento para 5% de viruta de acero.

Fuente: Autores.

Para hallar el contenido óptimo de cemento que cumpliera con la resistencia mínima de 2,1 MPa fue necesario realizar una línea de tendencia y hallarlo por medio de la regresión lineal. El contenido óptimo de cemento para 5% de viruta de acero fue de 8,2%.

De acuerdo con lo anterior, se observa que el material no logra alcanzar la resistencia mínima de 2.1MPa por lo cual se agregó un porcentaje de 10% de cemento para corroborar si la resistencia mínima se alcanza con este valor. A continuación se muestra el valor promedio obtenido de las resistencias.

Tabla 18. Resistencias promedio obtenidas para 5% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento

% Cemento	Resistencia (Mpa)
4	0.92
6	1.47
8	2.06
10	2.55

Fuente: Autores.

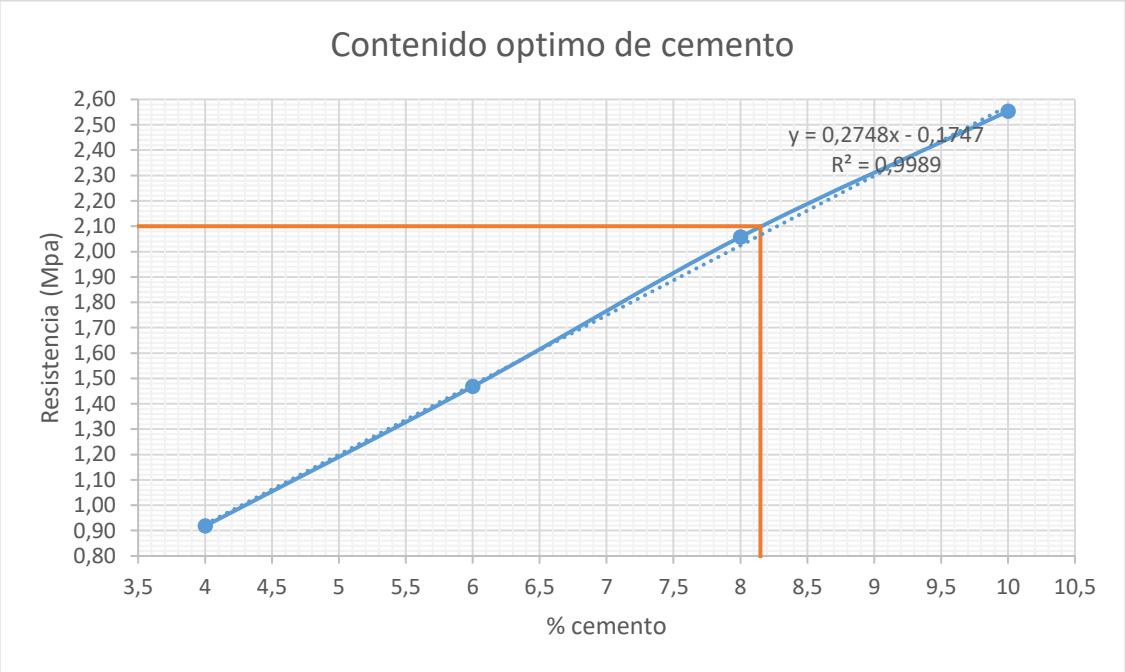

Figura 22. Gráfica contenido óptimo de cemento para 5% de viruta de acero incluyendo 10% de cemento.

Fuente: Autores.

De acuerdo con la figura 22, se observa que el contenido óptimo de cemento es 8.2%.

Tabla 19. Resistencias promedio obtenidas para 7,5% de viruta de acero.

% Cemento	Resistencia (Mpa)
4	0,94
6	1,57
8	2,10

Fuente: Autores.

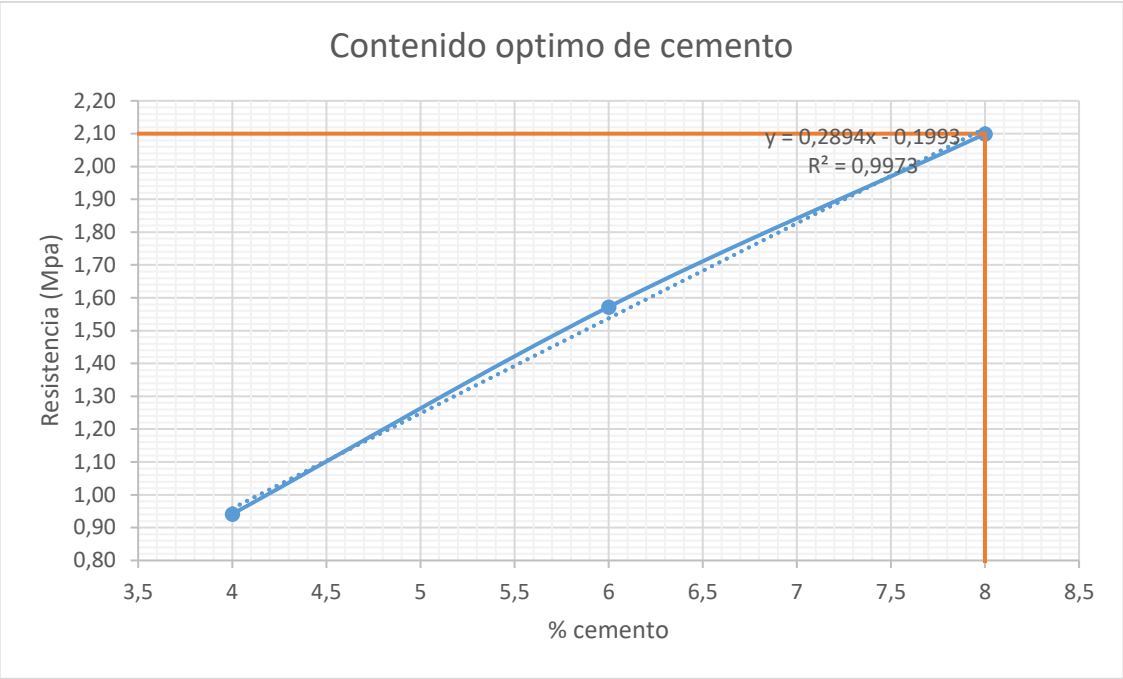

Figura 23. Contenido óptimo de cemento para 7,5% de viruta de acero.

Fuente: Autores.

El contenido óptimo de cemento para 7,5% de viruta de acero fue de 8%.

Tabla 20. Resistencias promedio obtenidas para 10% de viruta de acero.

% Cemento	Resistencia (Mpa)
4	0,93
6	1,51
8	2,33

Fuente: Autores.

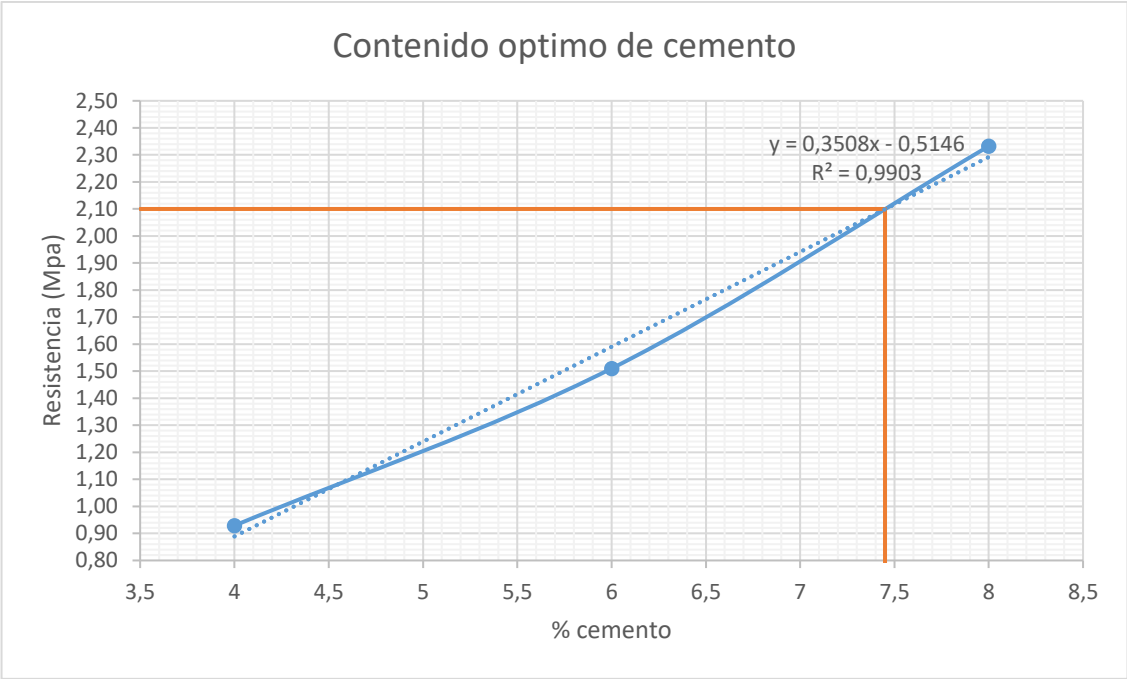

Figura 24. Gráfica contenido óptimo de cemento para 10% de viruta de acero.

Fuente: Autores.

El contenido óptimo de cemento para 10% de viruta de acero fue de 7,4%.

INV E 612-13. Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento

Este ensayo permite determinar las pérdidas, cambios de humedad y los cambios volumétricos (expansión y contracción) los cuales, se producen por el humedecimiento y el secado repetido de los cilindros.

El método utilizado en el ensayo de durabilidad fue el Método A establecido en la ASTM D559.

Para el desarrollo de este ensayo se elaboraron 12 cilindros, dos por cada porcentaje de viruta de acero (0%, 2.5%, 5%, 7.5%, 10%) con el correspondiente porcentaje óptimo de cemento, obtenido en el ensayo de resistencia a la compresión, mostrados a continuación.

Tabla 21. Combinaciones óptimas de cemento y viruta de acero.

Combinaciones óptimas de cemento y viruta de acero
0% VA – 8,6% C
2,5% VA – 8,2% C
5% VA – 8,2% C
7,5% VA – 8% C
10% VA – 7,4% C
10% VA – 7,4% C (Segunda muestra)

Fuente: Autores.

Cabe resaltar, que para el último porcentaje de viruta se elaboraron 4 cilindros de prueba ya que este presentó la mayor resistencia con el menor porcentaje de cemento.

Para la elaboracion de las muestras, los porcentajes de cemento con los que se trabajo no fueron los establecidos en la tabla 7 sino los porcentajes optimos con los cuales se alcanzaron los 2.1 MPa para cada dosificacion de acero de acuerdo a las figuras 17, figura 19, figura 21, figura 23 y figura 24.

Figura 25. Ensayo de humedecimiento y secado.

Fuente: Autores.

Figura 26. Probetas ensayadas por humedecimiento y secado después de horno.

Fuente: Autores.

Figura 27. Probetas ensayadas por humedecimiento y secado después de sumergidos en agua.

Fuente: Autores.

Para el desarrollo del ensayo, los doce cilindros anteriormente mencionados se dejan en el cuarto húmedo durante siete días antes de dar inicio a los 12 ciclos correspondientes.

Posterior a esto se sacan del cuarto y se realizan las mediciones de diámetro, peso y altura de cada cilindro y después de ello se dejan todos en agua durante las próximas 5 horas.

Pasado este lapso de tiempo se sacan del agua y se realiza las mediciones a los cilindros que tienen el número 1 de cada dosificación y después se llevan todos los cilindros al horno durante 48 horas.

Luego de dos días se sacan los cilindros y se realiza las mediciones anteriormente mencionadas, posterior a ello se pasa a los cilindros que tienen el numero 2 un cepillo con cerdas metálicas por todas las áreas y después se dejan de nuevo en agua durante 5 horas.

El anterior procedimiento se realizó durante 12 ciclos el cual, arrojo los siguientes resultados:

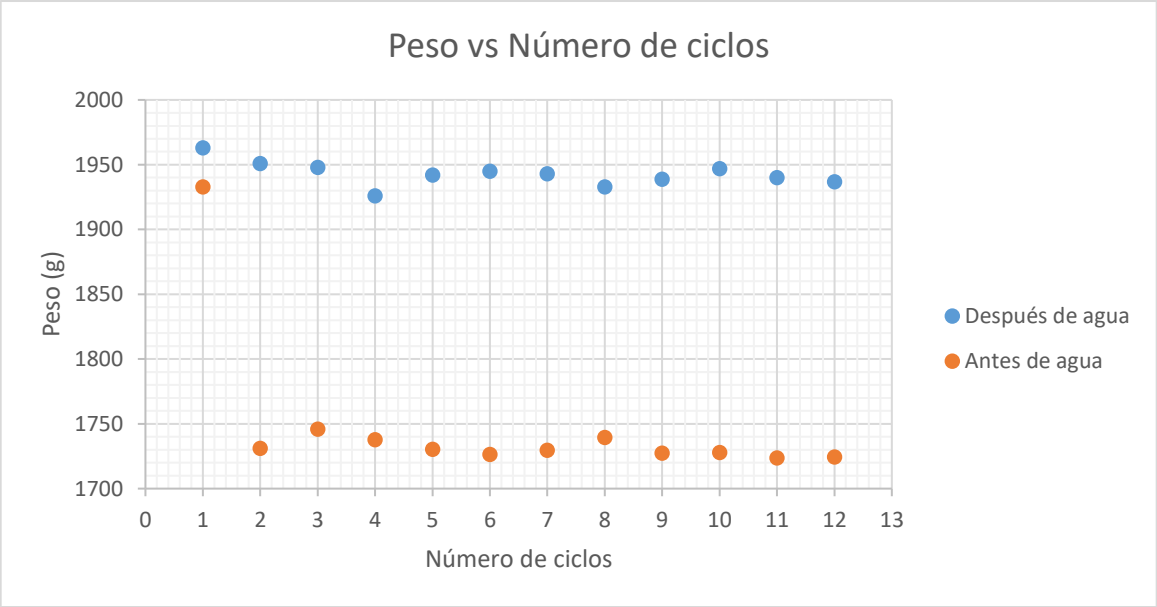

Figura 28. Gráfica variación en el peso para dosificación de 0% Acero y 8.6% Cemento.

Fuente: Autores.

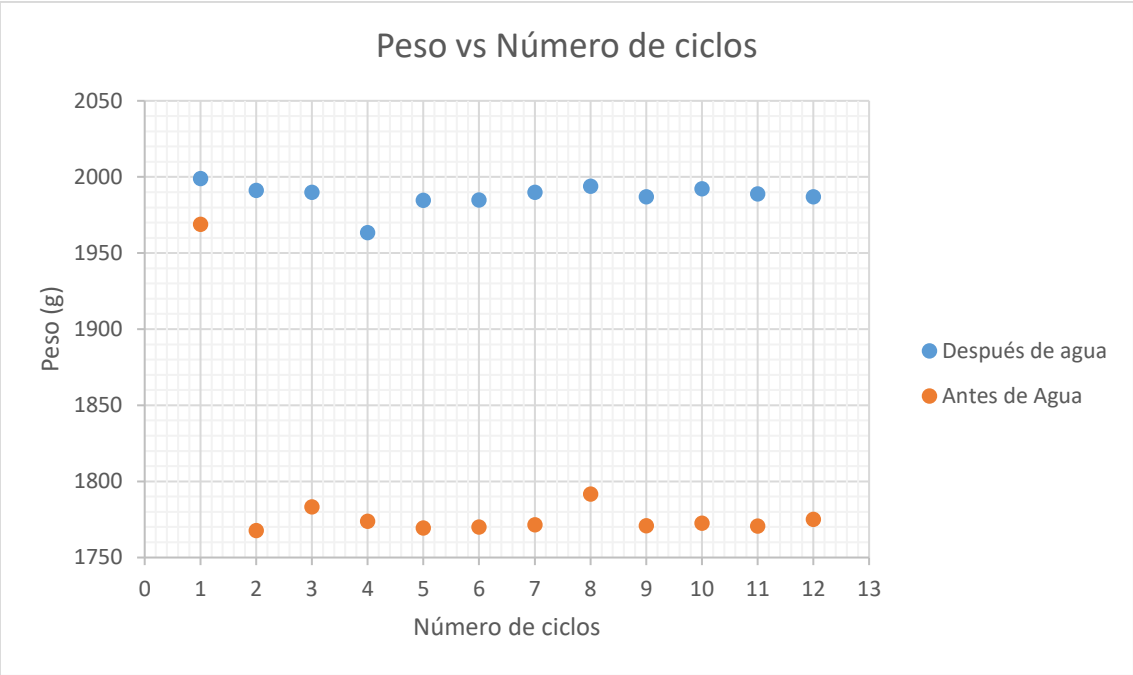

Figura 29. Gráfica variación en el peso para dosificación de 2.5% Acero y 8.2% Cemento.

Fuente: Autores.

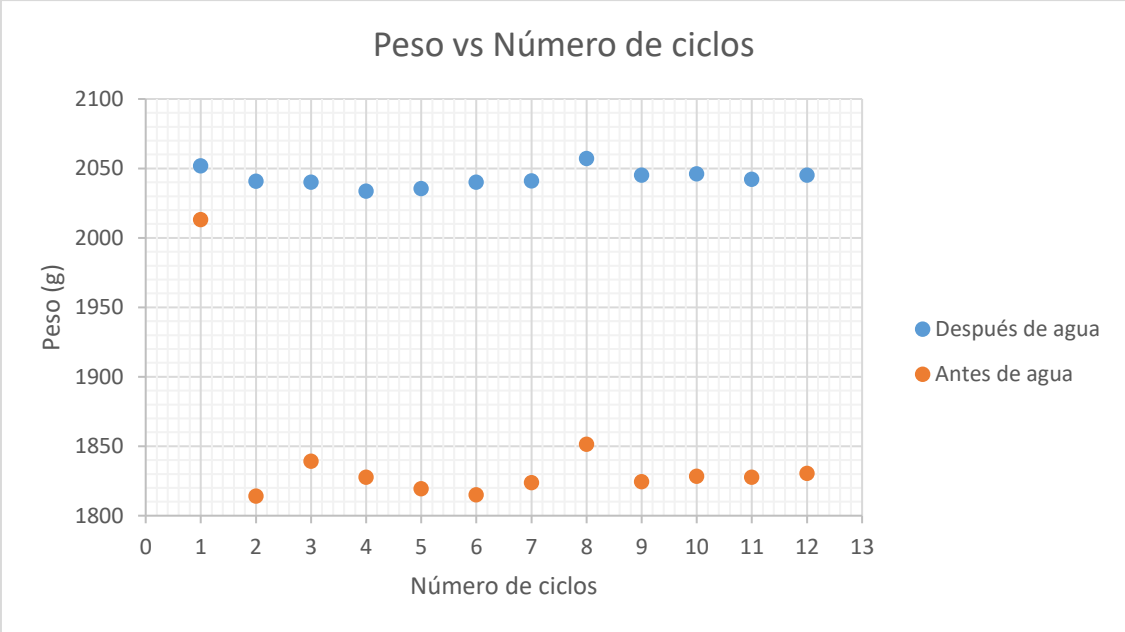

Figura 30. Gráfica variación en el Peso para dosificación de 5% Acero y 8.2% Cemento.

Fuente: Autores.

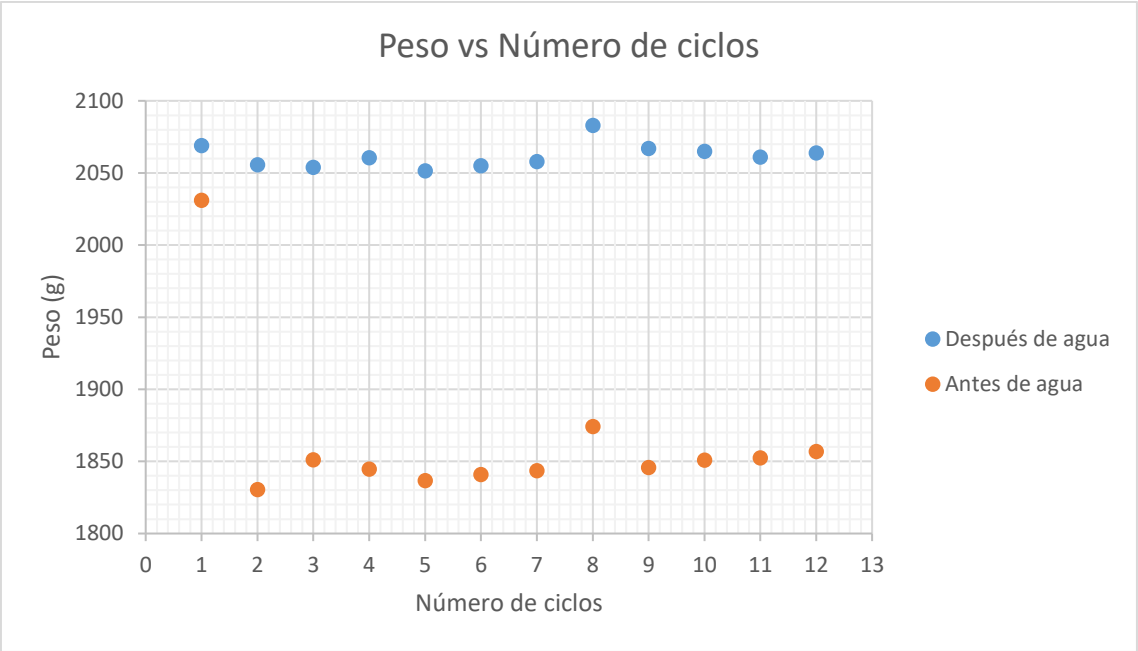

Figura 31. Gráfica variación en el peso para dosificación de 7.5% Acero y 8% Cemento.

Fuente: Autores.

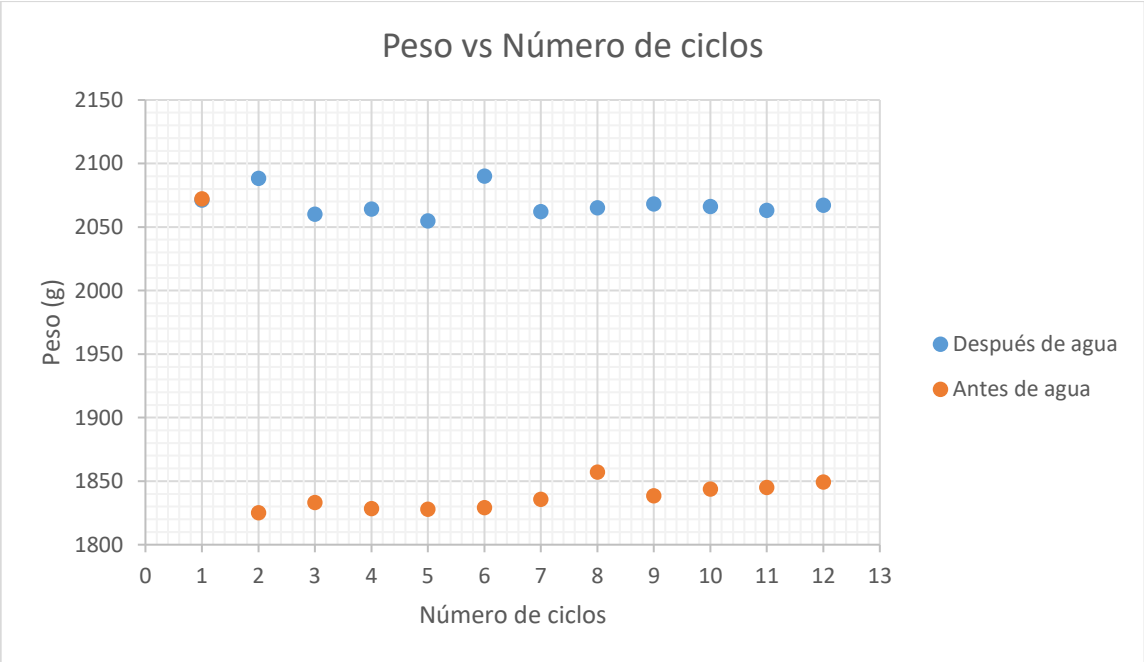

Figura 32. Gráfica variación en el peso para dosificación de 10% Acero y 7.4% Cemento.

Fuente: Autores.

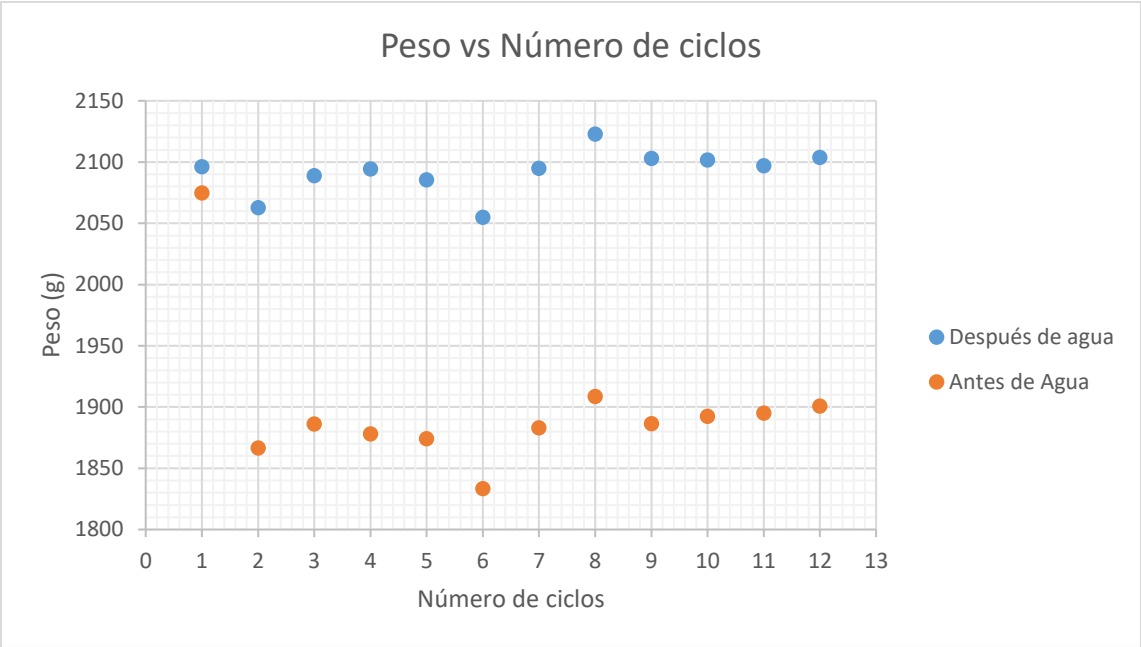

Figura 33. Gráfica variación en el peso para dosificación de 10% Acero y 7.4% Cemento. (Segunda Muestra)

Fuente: Autores.

Tabla 22. Porcentaje de pérdidas de las dosificaciones óptimas.

Porcentajes de cemento y viruta de acero (%)	Porcentaje de perdidas (%)
0% VA - 8,6% C	13,24
2,5% VA - 8,2% C	12,85
5% VA - 8,2% C	13,82
7,5% VA – 8% C	12,88
10% VA - 7,4% C	13,96
10% VA - 7,4% C	13,39

Fuente: Autores.

Tabla 23. Máximo cambio de volumen y contenido máximo de humedad.

Combinación de cemento y viruta de acero	Máximo cambio de volumen (%)	Contenido máximo de humedad (%)
0% VA - 8,6% C	1.21	12.7
2,5% VA - 8,2% C	1.57	12.64
5% VA - 8,2% C	1.48	12.5
7,5% VA - 8% C	1.82	12.3
10% VA - 7,4% C	1.47	14.41
10% VA - 7,4% C	1.31	12.08

Fuente: Autores.

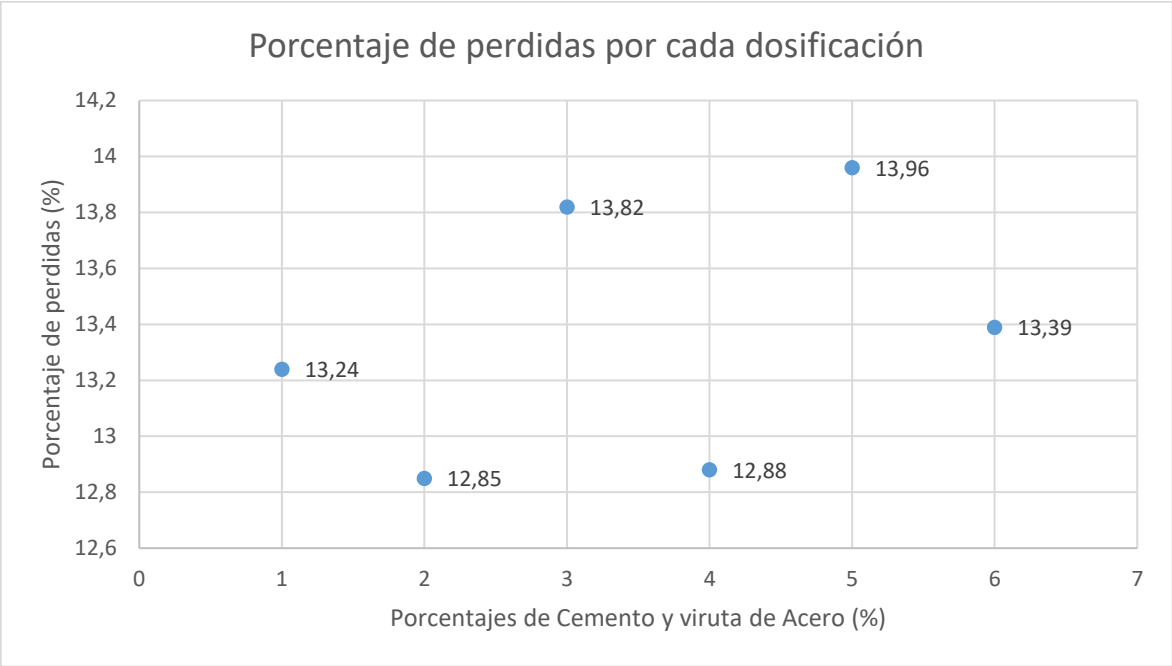

Figura 34. Porcentaje de pérdidas en cada dosificación.

Fuente: Autores.

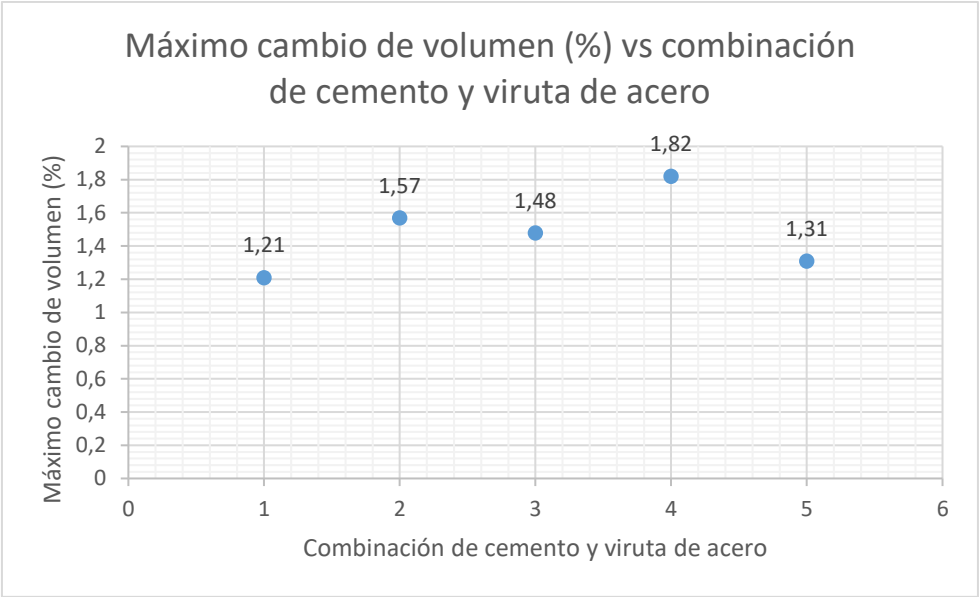

Figura 35. Gráfica máximo cambio de volumen (%) vs combinación de cemento y viruta de acero.

Fuente: Autores.

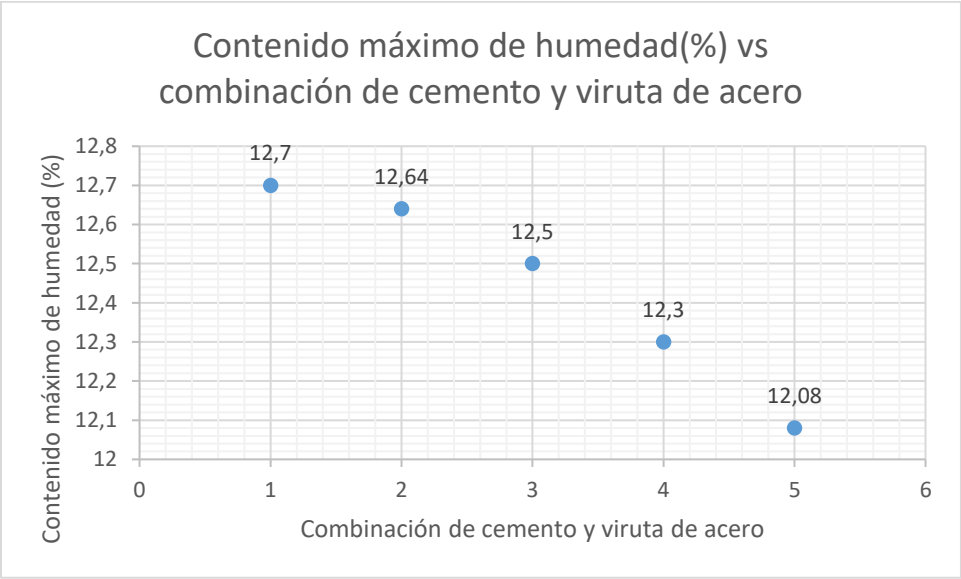

Figura 36. Contenido máximo de humedad (%) vs combinación de cemento y viruta de acero.

Fuente: Autores.

Tabla 24. Comparación entre requisitos INV E 350-13 y resultados.

Característica	% de viruta de acero - % de cemento	Artículo INV E 350-13	Resultado de ensayos (MPa)	Cumple
Resistencia mínima a la compresión a 7 días, Mpa	0% VA - 4% C	2,1	0,74	No
	0% VA - 6% C		1,19	No
	0% VA - 8% C		1,98	No
	0% VA - 10% C		2,69	Si
	2,5% VA - 4% C		0,91	No
	2,5% VA - 6% C		1,47	No
	2,5% VA - 8% C		2,06	No
	2,5% VA - 10% C		2,65	Si
	5% VA - 4% C		0,92	No
	5% VA - 6% C		1,47	No
	5% VA - 8% C		2,06	No
	5% VA - 10% C		2,55	Si
	7,5% VA - 4% C		0,94	No
	7,5% VA - 6% C		1,57	No
	7,5% VA - 8% C		2,1	Si
Característica	% de viruta de acero - % de cemento	Artículo INV E 350-13	Resultado de ensayos (%)	Cumple
Durabilidad	0% VA - 8,6% C	14%	13,24	Si
	2,5% VA - 8,2% C		12,85	Si
	5% VA - 8,2% C		13,82	Si
	7,5% VA - 8% C		12,88	Si
	10% VA - 7,4% C		13,96	Si
	10% VA - 7,4% C		13,39	Si

Fuente: Autores.

Análisis de Resultados

De acuerdo con las figuras 17, 19 y 21 se observa que no se pudo definir el porcentaje de cemento óptimo debido a que los datos que se recogieron no logran realizar la proyección a la resistencia requerida (2,1 MPa) por lo cual se procedió a calcularlo por medio de la ecuación de regresión lineal.

Cabe resaltar que se realizó un punto adicional (10% de cemento) a los porcentajes que tenían 0%, 2.5% y 5% de viruta de acero con el fin de corroborar si cumple con el requisito mínimo de resistencia. Adicional a esto es importante mencionar que los porcentajes de cemento utilizados fueron los obtenidos por medio de las ecuaciones lineales en las mencionadas figuras (17,19 y 21).

Las dosificaciones de 2.5% y 5% de acero presentaron unas resistencias similares e iguales en los porcentajes del cemento dados por el PCA, pero no lograron alcanzar el lumbral de 2.1MPa ya que las resistencias que presentan con el porcentaje más alto de cemento (8%) dan 2.06 MPa en ambos casos

Por ende, se realizaron la regresión lo que generó un incremento de 0.2% de la máxima proporción de cemento para poder cumplir la resistencia de 2.1MPa lo cual queda descartado debido a que la metodología de la PCA acepta para la prueba de humedecimiento y secado porcentajes del 4 al 8% de cemento

Por otra parte, en las figuras 23 y 24 se logró definir el porcentaje de cemento óptimo de acuerdo a la curva generada por los datos registrados. De acuerdo con las mencionadas figuras, se observó que de acuerdo al aumento del porcentaje de viruta de acero fue necesario un menor porcentaje de cemento para lograr la resistencia requerida.

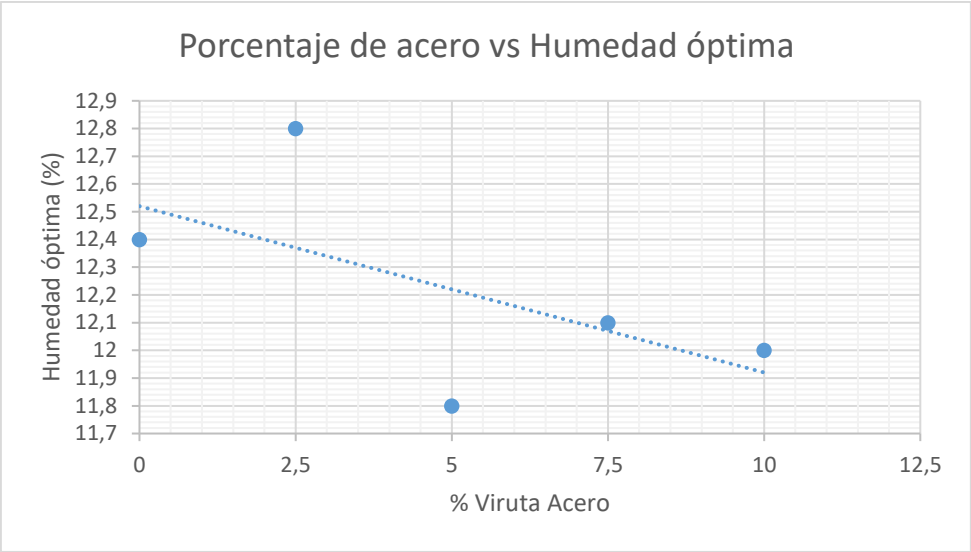

Figura 37. Gráfica Porcentaje de acero vs Humedad óptima (6% cemento).

Fuente: Autores.

En la figura 37 es posible ver que las humedades no varían mucho entre el suelo-cemento sin adición de viruta de acero y aquellas mezclas que tienen adición de esta. Los porcentajes de humedad óptima varían entre 11,8% y 12,8%.

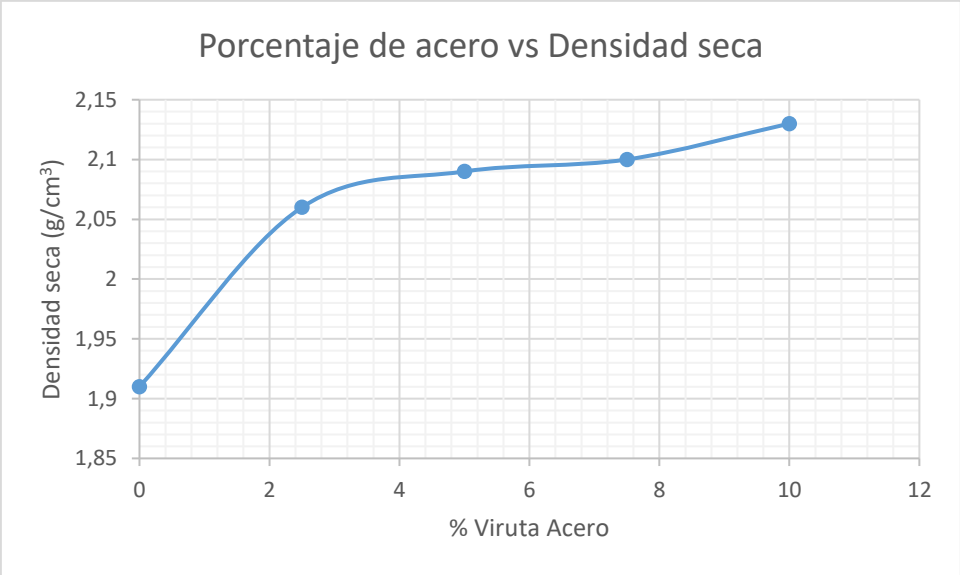

Figura 38. Gráfica Porcentaje de acero vs Densidad seca para 6% de cemento.

Fuente: Autores.

En la figura 38 se observa que a medida que va aumentando el porcentaje de acero, la densidad seca aumenta proporcionalmente. Esto pudo deberse a que el acero tiene una densidad mayor a la del cemento.

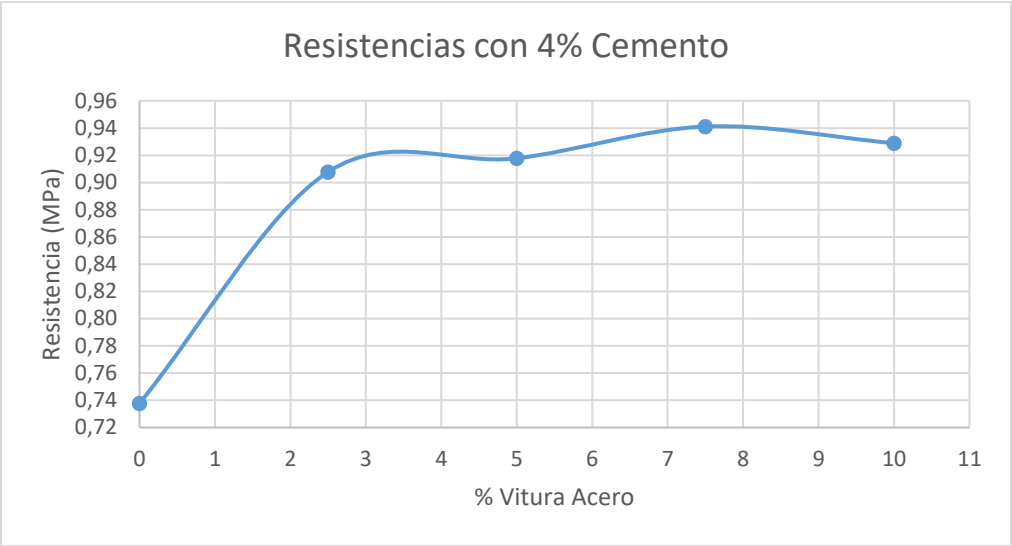

Figura 39. Gráfica resistencias obtenidas con el 4% de Cemento.

Fuente: Autores.

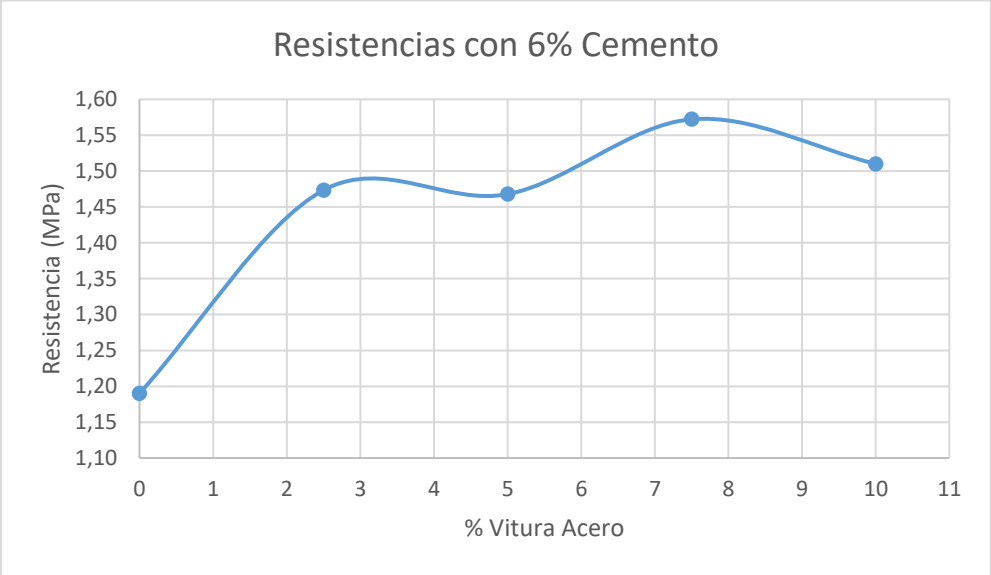

Figura 40. Gráfica resistencias obtenidas con el 6% de Cemento.

Fuente: Autores.

Se observa en las figuras 39 y 40 que la curva de resistencia tiende a crecer hasta el 7,5% de la viruta de acero, posterior a este porcentaje se observa la caída en 0,01MPa y 0,06 MPa respectivamente. Esto pudo deberse a. A continuación, se muestra la tabla con los valores de las resistencias de cada espécimen de 7,5% y 10% de viruta de acero.

Tabla 25. Resistencias obtenidas con 7,5% y 10% de viruta de acero para 4% y 6% de cemento.

4 % cemento		6 % Cemento	
Resistencia (Mpa)		Resistencia (Mpa)	
7,5% Acero	10% Acero	7,5% Acero	10% Acero
0,91	0,93	1,62	1,41
1	0,98	1,57	1,37
0,94	0,87	1,64	1,53
0,91	0,93	1,66	1,7
0,96	0,92	1,43	1,45
0,95	0,94	1,56	1,56
0,93	0,92	1,45	1,48
0,92	0,93	1,59	1,56
0,95	0,94	1,63	1,53

Fuente: Autores.

A partir de la tabla 25 se evidencia que para el porcentaje de 4% de cemento se obtuvo resistencias muy similares en los 9 cilindros de cada porcentaje de viruta de acero exceptuando las de 1MPa la cual es un resultado muy alto en comparación a las demás obtenidas en 7,5% de viruta de acero y por el contrario 0,87 MPa donde es muy bajo en comparación a la resistencia obtenida en los demás especímenes de 10% de viruta de acero. Lo cual explica el comportamiento de la figura 39.

Para el porcentaje de 6% se observa que los valores obtenidos de resistencia para el 10% de viruta de acero fueron más bajos que los obtenidos en el 7,5% de viruta de acero, ocasionando la caída de la curva en la figura 40.

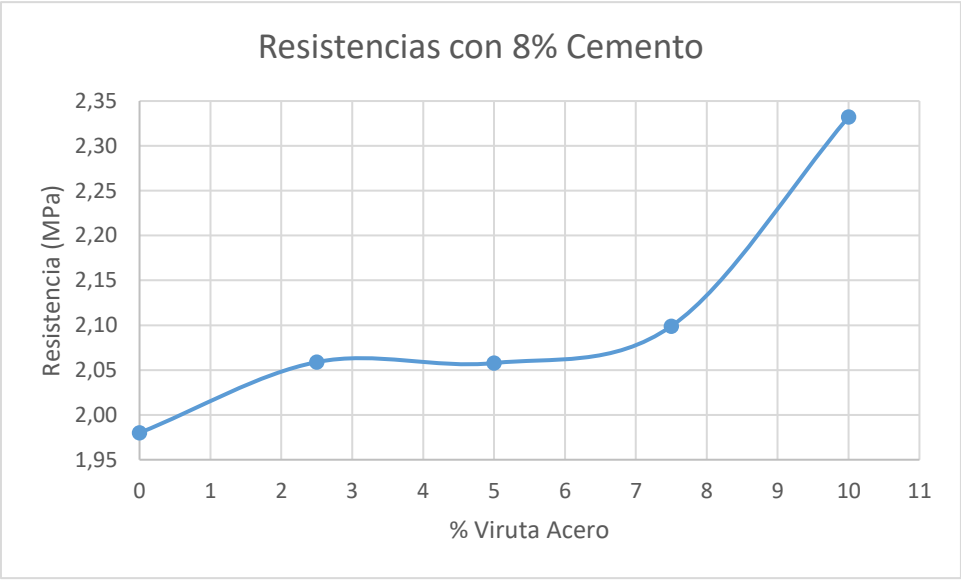

Figura 41. Gráfica resistencias obtenidas con el 8% de Cemento.

Fuente: Autores.

En la figura 41 se observa un crecimiento en la resistencia a medida que aumenta el porcentaje de viruta de acero, lo cual es el resultado esperado, esto puede deberse a que la distribución de los agregados al momento de mezclar fue la ideal.

De acuerdo con las figuras 39 a 41 se observa que el comportamiento de la resistencia en la dosificación con el 5% de acero es irregulares el cual, se demuestra debido a que posee una baja humedad óptima como se muestra en la figura 37.

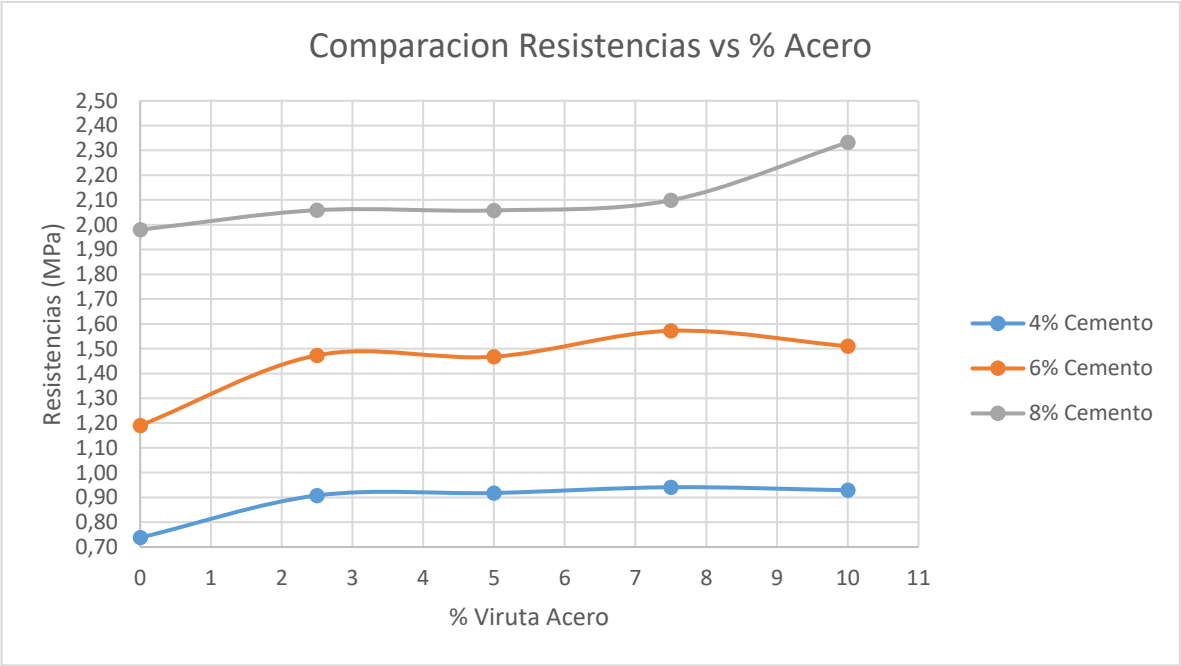

Figura 42. Gráfica comparación de resistencias obtenidas vs % Viruta Acero.

Fuente: Autores.

De acuerdo con la figura 42 se observa que las dosificaciones que tienen 4% y 6% de cemento, el punto más alto que posee en resistencia se presenta cuando se tiene 7.5% de viruta de acero y de ahí empieza a caer la resistencias, caso contrario sucede en las dosificaciones de 8% de cemento el cual, se presenta un incremento a medida que se incrementa el porcentaje de viruta de acero.

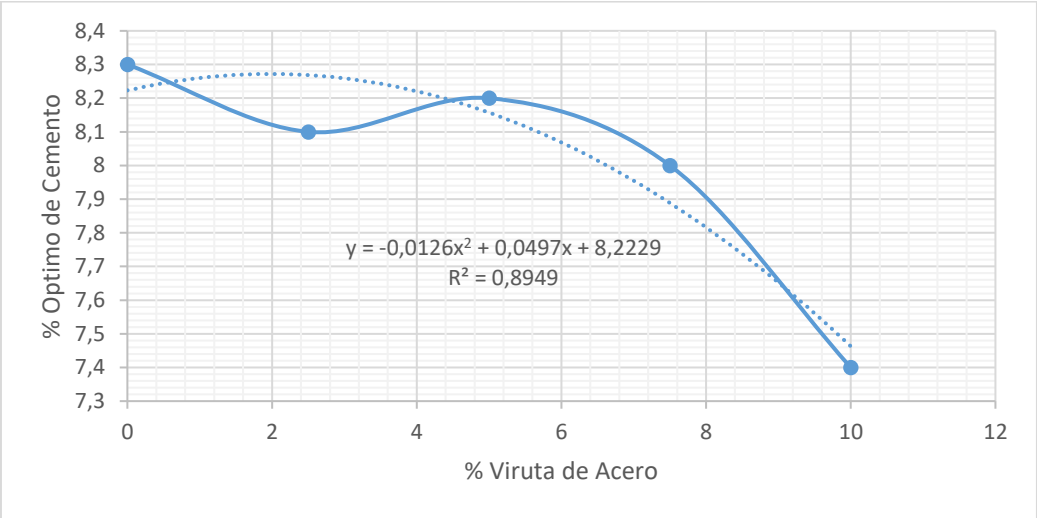

Figura 43. Gráfica %Óptimo de cemento vs %Viruta de acero.

Fuente: Autores.

En base a la figura 43, se evidencia que, al aumentar el porcentaje de viruta de acero, disminuye el porcentaje óptimo de cemento, demostrando un comportamiento inversamente proporcional, el cual era el esperado al iniciar este proyecto. A partir de la ecuación presentada en el grafico es posible calcular el % óptimo de cemento dependiendo del % de viruta de acero que se desee trabajar.

De acuerdo con la tabla 23 se puede evidenciar que el porcentaje de pérdidas se encuentra entre el rango del 12% al 14%.

Cabe resaltar que en las figuras 28 a 33 no se presenta un comportamiento único (expansión o contracción) a lo largo de los ciclos ya que el cambio de peso no tiende al crecimiento o disminución sino este es combinado.

En las figura 34, 35 y 36 los valores que toman el eje x son las dosificaciones mencionadas en la tabla 21 el cual, el valor que toma el número 1 es la dosificación 0%V-8,6%C, el número 2 es la dosificación 2,5%V-8,2%C, el número 3 es la dosificación 5%V-8,2%C, el número 4 es la dosificación 7,5%V-8%C, 5 y 6 es la dosificación 10%V-7,4%C.

En la figura 35, los máximos cambios de volumen estuvieron entre 1,21% y 1,82%, sin tener marcada una tendencia en específico. En esta gráfica y en la de la figura 36 se omitió el dato 5 porque la probeta presentó resultados atípicos tanto para cambio de volumen como para contenido de humedad.

En la figura 36, es posible observar que el máximo contenido de humedad va disminuyendo con el aumento de la viruta de acero y la disminución de cemento. Todas las humedades estuvieron en un rango de 12%.

De acuerdo con la figura 41 se evidencia que la dosificación que posee la mayor pérdida es la que posee 5% de viruta de acero, cabe aclarar que la dosificación de 10% de viruta de acero obtiene la segunda pérdida más alta con un valor promedio de 13,68% de pérdidas.

ENSAYO	NORMA DE ENSAYO INV	SC-D	SC-R
Durabilidad			
Máxima pérdida de masa de la mezcla compactada en prueba de humedecimiento y secado, %	E-612		
- Suelos A-1; A-2-4; A-2-5; A-3		14	
- Suelos A-2-6; A-2-7; A-4; A-5		10	
- Suelos A-6; A-7		7	
Resistencia			
Comportamiento de la resistencia con:	E-614		
- Incremento en el contenido de cemento		Crece	
- Incremento en la edad		Crece	
Resistencia a la compresión a 7 días, MPa	E-614		
- Mínima		(Nota 1)	2.1 (Nota 2)
- Máxima		4.5	4.5

Figura 44. Criterios de diseño para la mezcla de suelo-cemento.

Fuente: Autores.

Revisando los datos de la tabla 23 y los requisitos de la figura 44, se evidencia que las pérdidas que se presentan cumplen las restricciones del artículo 350-13 del Invías ya que según la tabla el máximo porcentaje de pérdidas debe ser igual o menor a 14%.

Conclusiones y recomendaciones

- De acuerdo con las resistencias presentadas en cada dosificación de aceros con porcentajes de 4%, 6% y 8% de cemento de acuerdo con la metodología PCA, se observó que las mezclas que lograron alcanzar el lumbral de 2.1 MPa para la aprobación de la norma fueron las dosificaciones que tenían 7.5% y 10% de acero el cual, se optó por realizar un porcentaje adicional de cemento para las dosificaciones que tenían 0%, 2.5% y 5% de viruta de acero para comprobar si con el 10% de cemento logra este material cumplir con la resistencia mínima requerida.
- Se recomienda el uso de la viruta de acero como material alternativo en porcentajes de 7,5% y 10% para la estabilización de bases con suelo-cemento ya que cumple con todos los requisitos exigidos en el artículo 350-13 del Invías en términos de resistencia y durabilidad.
- El comportamiento en la resistencia fue la esperada en cada dosificación excepto en la dosificación que tenía 5% de Acero el cual, en la gran mayoría de resultados obtenidos no concuerdan a con las respuestas de las otras mezclas.
- Teniendo en cuenta los desgastes presentados en los 12 cilindros seleccionados con las respectivas dosificaciones para alcanzar la resistencia de 2.1MPa, se observa que todos cumplen a cabalidad los requisitos dados por el artículo 350-13 del Invías sobre el tema de desgaste, pero en el sentido del cumplimiento con la metodología del PCA, entre las dosificaciones del 7.5% y 10% de acero el que menor porcentaje de desgaste tiene es la dosificación del 7.5% de acero.
- Con base en lo anterior, la dosificación óptima para el proyecto es la que posee 7.5% de acero y 8% de cemento ya que este tiene el porcentaje de desgaste más bajo y la resistencia cumple con los requisitos presentados de acuerdo a la tabla 23.
- Realizando un estudio económico para una cantidad de $1m^3$ de material con la dosificación de 7.5% de viruta de acero y 8% de Cemento, se observa que el valor que toma el suelo es aproximadamente $60.000 pesos, el valor para $0.075m^3$ de viruta de acero es aproximadamente $2.531.625 pesos, el valor del cemento es de $43.000 pesos lo que nos da un valor total aproximado de $2.629.465 pesos. Para un estudio con una dosificación de 10% de viruta de acero y 7.4% de cemento con

una cantidad de $1m^3$ de material, el valor aproximado que toma la viruta es de $3.375.500 pesos, el valor del cemento es de $43.000 pesos lo que nos da un valor total aproximado de $3.470.502 pesos incluyendo el valor del suelo. De acuerdo a lo anterior, se observa que la utilización de la viruta de acero no es económicamente viable.

- Se recomienda elaborar el ensayo de humedecimiento y secado con los porcentajes de cemento estimados en la metodología de la PCA de acuerdo a la clasificación del suelo dado en la tabla 7.

- Por último, se recomienda realizar ensayo de Relaciones de humedad-masa unitaria de mezclas suelo-cemento para los otros dos porcentajes de cemento que propone la metodología PCA de acuerdo a la clasificación del suelo dado en la tabla 7 para observar el comportamiento de la mezcla.

Bibliografía

- Acero, Andrés Leonardo. Mogollón, Francisco Antonio. Análisis de una mezcla suelo- cemento sustituyendo la fracción granulométrica (pasa no 8 – retiene no 16) por grano de caucho (Tesis de pregrado). Universidad de La Salle. Bogotá, Colombia.
- ANCADE, anter, IECA. 2008. Manual de estabilización de suelos con cemento o cal.
- Badillo, Eulalio. 2005. Mecánica de suelos, tomo 1, "Fundamentos de la mecánica de suelos". México D.F. México. Limusa S.A.
- Infante, Andrés. 2015. Evaluación de características físicas y mecánicas de una base estabilizada con cemento modificada con vidrio templado reciclado (Tesis de pregrado). Universidad De La Salle. Bogotá, Colombia.
- Instituto del cemento Portland argentino. 2015. Construcción de bases y sub-bases de suelo. cemento.
- Invías. 2013. Especificaciones Generales de construcción de carreteras. Colombia.
- Meneses, Liz Paola. Fuentes, Lizeth Michelle. 2015. Base estabilizada con cemento, modificada con PET reciclado (Tesis de pregrado). Universidad De La Salle. Bogotá, Colombia.
- Ochoa, Paula Fernanda. Christian Valderrama. 2013. Base estabilizada con cemento modificada con grano de caucho de llanta. Bogotá D.C, Colombia.
- Rodríguez Carmona, Esperanza. Disposición final de la viruta metálica generada en las instituciones de educación superior. Universidad Militar Nueva Granada.

Anexos

Anexo 1. Clasificación del material.

Anexo 2. Relaciones Humedad-Densidad de las mezclas de suelo cemento.

Anexo 3. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo con 4% de Cemento.

Anexo 4. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo con 6% de Cemento.

Anexo 5. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo con 8% de Cemento.

Anexo 6. Resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo con 10% de Cemento.

Anexo 7. Porcentaje de cemento óptimo.

Anexo 8. Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo cemento

Nota: Todos los anexos anteriormente mencionados se encuentran documentados en formato de CD.