

Romel Jesús Gallardo Amaya
Luis Eduardo Gómez Pérez
William Ferney Guillin Acosta

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE SUELOS DE ALTA PLASTICIDAD ESTABILIZADOS CON CEMENTANTES



GIGMA
Grupo de Investigación en Construcción
Geotecnia y Medio Ambiente



**Universidad Francisco
de Paula Santander**
Ocaña - Colombia
Vigilada Mineducación

**ANÁLISIS DEL
COMPORTAMIENTO
DE SUELOS DE
ALTA PLASTICIDAD
ESTABILIZADOS CON
CEMENTANTES**

ROMEL JESÚS GALLARDO AMAYA
LUÍS EDUARDO GOMEZ PÉREZ
WILLIAM FERNEY GUILLIN ACOSTA

*GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN
CONSTRUCCIÓN GEOTECNIA Y
MEDIO AMBIENTE (GIGMA)*

Gallardo Amaya, Romel Jesús

Análisis del comportamiento de suelos de alta plasticidad estabilizados con cementantes / Romel Jesús Gallardo Amaya, Luis Eduardo Gómez Pérez, William Ferney Guillin Acosta. -- 1a. ed. -- Bogotá : Ecoe Ediciones : Universidad Francisco de Paula Santander, 2019.

113 p. – (Ingeniería y salud en el trabajo. Ingeniería)

Incluye bibliografía.

ISBN 978-958-771-691-7

1. Estabilización de suelos 2. Mecánica de suelos I. Gomez Pérez, Luis Eduardo II. Guillin Acosta, William Ferney III. Título IV. Serie

CDD: 624.151363 ed. 23

CO-BoBN- a1039055



Colección: Ingeniería y salud en el trabajo

Área: Ingeniería

ECOE
EDICIONES


**Universidad Francisco
de Paula Santander**
Ocaña - Colombia
Vigilada Mineducación


GIGMA
Grupo de Investigación en Construcción
Geotecnia y Medio Ambiente

- ▶ Romel Jesús Gallardo Amaya
- ▶ Luis Eduardo Gómez Pérez
- ▶ William Ferney Guillin Acosta

© Ecoe Ediciones Limitada
Carrera 19 # 63C 32
Bogotá, Colombia

© Universidad Francisco
de Paula Santander
Vía Acosure, Sede el Algodonal
Ocaña Norte de Santander -
Colombia
Teléfono (057)(7) 5690088

Primera edición: Bogotá, diciembre de 2018

ISBN: 978-958-771-691-7

Coordinación editorial: Angélica García Reyes
Corrección de estilo: Camilo Moreno
Diagramación: Magda Barrero
Carátula: Wilson Marulanda Muñoz
Impresión: DGP Editores
Calle 63 # 70 D -34

*Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio
sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.*

Impreso y hecho en Colombia - Todos los derechos reservados

AGRADECIMIENTOS

Este libro fue posible gracias al esfuerzo del Grupo de Investigación en Construcción, Geotecnia y Medio Ambiente (GIGMA), al apoyo brindado por la Universidad Francisco de Paula Santander con su infraestructura de laboratorios, y a un grupo de profesionales que aportaron su tiempo y conocimientos, entre ellos: Diana Milena Valdés Solano, magister en Desarrollo Sostenible y Química; Agustín MacGregor Torrado, Angie Alejandra Muñoz, y Ciro Andrey Martínez, ingenieros civiles; y a Oliver Picón Vacca, laboratorista. Además, se agradece a la división de investigación y extensión por su apoyo y financiación en el proceso de publicación.

CONTENIDO

PREFACIO	XIX
RESUMEN	XXI
INTRODUCCIÓN	XXIII
CAPÍTULO 1: MEJORAMIENTO DE SUELOS	1
1.1. Plasticidad de los suelos.....	1
1.1.1. Límites de consistencia	3
1.2. Estabilización de suelos	4
1.2.1. Método mecánico	5
1.2.2. Método físico	5
1.2.3. Método químico	6
1.3. Estabilización con cementantes.....	7
1.3.1. Cal.....	7
1.3.2. Cemento.....	8
CAPÍTULO 2: METODOLOGÍA	11
2.1. Diseño experimental.....	12
2.1.1. Diseño de experimento con un solo factor	15
2.2. Tipo de investigación	18
2.3. Metodología para la recolección de la información	18
2.4. Programa de ensayos de laboratorio.....	19
2.4.1. Análisis en condición natural de propiedades físicas y mecánicas del suelo	20
2.4.1.1. Caracterización física.....	21
2.4.1.2. Caracterización mecánica	24

2.4.2. Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del suelo mezclado con cal	26
2.4.2.1. Determinación de pH	26
2.4.2.2. Caracterización física	28
2.4.2.3. Caracterización mecánica	29
2.4.3. Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del suelo mezclado con cemento	34
2.4.3.1. Determinación de PH	35
2.4.3.2. Caracterización física	35
2.4.3.3. Caracterización mecánica	37
2.4.4. Análisis de imagen microscópica electrónica de barrido.....	42
CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1. Análisis del comportamiento del suelo sin adición de cementantes (condición natural)	45
3.1.1. Resultados de la caracterización física del suelo en condición natural.....	45
3.1.2. Resultados de la caracterización mecánica del suelo en condición natural	48
3.1.3. Resultados del análisis químico del suelo: capacidad de intercambio catiónico	51
3.2. Análisis del comportamiento del suelo con adición de cal.....	51
3.2.1. Variación del límite líquido y plástico e índice de plasticidad	52
3.2.2. Variación de las relaciones humedad-densidad (ensayo Proctor normal).....	53
3.2.3. Variación del ángulo de fricción y la cohesión (ensayo de corte directo)	54
3.2.4. Compresión inconfnada	56
3.2.5. Variación de la capacidad de soporte (ensayo CBR de laboratorio).....	57
3.2.6. Variación del porcentaje de pH en la muestras de cal	58
3.3. Análisis del comportamiento del suelo con la adición de cemento.....	60
3.3.1. Variación del límite líquido y plástico e índice de plasticidad	60
3.3.2. Variación de las relaciones humedad-densidad (ensayo Proctor normal).....	61
3.3.3. Variación del ángulo de fricción y la cohesión (ensayo de corte directo)	63
3.3.4. Resistencia a la compresión inconfnada.....	65
3.3.5. Variación de la capacidad de soporte (ensayo CBR de laboratorio).....	67
3.3.6. Variación del porcentaje de pH en la muestras de Cemento.....	68

3.4. Análisis de microscopia electrónica de barrido	69
3.5. Análisis estadístico	75
3.5.1. Análisis para mezclas de suelo-cemento	75
3.5.2. Análisis para mezclas de suelo-cal	87
3.6. Correlaciones	101
CONCLUSIONES	105
BIBLIOGRAFÍA	109

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	Imagen microscópica de un suelo arcilloso (Montmorillonita)....	2
FIGURA 2.	Metodología implementada	12
FIGURA 3.	Localización de la zona y toma de muestras para el estudio.....	14
FIGURA 4.	Muestras para ensayo de capacidad de intercambio catiónico, obtenidas a lo largo del sector para muestreo.....	20
FIGURA 5.	Toma de muestras para contenido de agua (humedad)	21
FIGURA 6.	Obtención y preparación de muestras para ensayo	22
FIGURA 7.	Ensayos para clasificación del tipo de suelo.....	22
FIGURA 8.	Picnómetros con muestras para ensayo de gravedad específica ...	23
FIGURA 9.	Toma de muestras inalteradas y determinación del volumen de la muestra en ensayo de peso unitario.....	23
FIGURA 10.	Realización del ensayo normal de compactación.....	24
FIGURA 11.	Preparación de muestra para ensayo en el dispositivo de corte y equipo de corte directo	25
FIGURA 12.	Máquina de compresión simple.....	25
FIGURA 13.	Lecturas de datos de expansión y muestra sumergida lista para aplicación de cargas.....	26
FIGURA 14.	Realización del ensayo de pH	27
FIGURA 15.	Proceso de mezclado suelo y el material cementante: cal	28
FIGURA 16.	Proceso de mezclado y compactación	29
FIGURA 17.	Extracción de espécimen compactado y listo para iniciar proceso de curado.....	32
FIGURA 18.	Tallado de Muestra a partir de espécimen compactado y muestra lista para ensayo.....	32
FIGURA 19.	Tallado de muestras para ensayar.....	33
FIGURA 20.	Preparación de mezcla suelo-cal y de muestras para ensayo.....	34
FIGURA 21.	Muestras sumergidas para lectura de expansión y muestra lista para ensayo.....	34
FIGURA 22.	Proceso de mezclado del suelo y el material cementante: cemento portland para ensayo de límites de plasticidad.....	36
FIGURA 23.	Proceso de mezclado y compactación	37
FIGURA 24.	Preparación de mezcla y espécimen listo para proceso de curado	40
FIGURA 25.	Protección de espécimen para proceso de curado y posterior tallado de muestra para ensayo.....	40
FIGURA 26.	Tallado de muestra a partir del espécimen y posterior ensayo de esta.....	41
FIGURA 27.	Toma de lecturas y aplicación de carga durante el ensayo CBR....	42
FIGURA 28.	Preparación de muestras para el ensayo electrónico de barrido ...	43

FIGURA 29. Distribución de tamaños de grano del suelo.....	46
FIGURA 30. Curva de compactación del suelo en estado natural.....	47
FIGURA 31. Curva de compactación del suelo en estado natural.....	48
FIGURA 32. Envoltentes de falla para los 3 ensayos de corte directo realizados	49
FIGURA 33. Tipología de falla en las probetas ensayadas bajo compresión inconfiada	50
FIGURA 34. Variación, en porcentaje, de la plasticidad al comparar las mezclas suelo-cal con la condición natural del suelo	52
FIGURA 35. Resultados para el ensayo normal de compactación en la mezcla suelo-cal en sus diferentes dosificaciones	53
FIGURA 36. Variación de la densidad seca máxima y el CHO al comparar las mezclas suelo-cal con la condición natural del suelo.....	54
FIGURA 37. Variación, en porcentaje, de la cohesión para las mezclas suelo-cal, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural	55
FIGURA 38. Variación, en porcentaje, del ángulo de fricción para las mezclas suelo-cal, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural	56
FIGURA 39. Variación, en porcentaje, de la RCU para las mezclas suelo-cal, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural	57
FIGURA 40. Variación, en porcentaje, de la capacidad de soporte (CBR) para las mezclas suelo-cal, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural.....	58
FIGURA 41. Variación, en el valor de pH en las mezclas de cal.....	59
FIGURA 42. Variación, en porcentaje, de la plasticidad al comparar las mezclas suelo-cal con la condición natural del suelo	61
FIGURA 43. Resultados para el ensayo normal de compactación en la mezcla suelo-cemento en sus diferentes dosificaciones, además se incluyen las curvas de los ensayos realizados al suelo en su condición natural	62
FIGURA 44. Variación de la densidad seca máxima y el CHO al comparar las mezclas suelo-cemento con la condición natural del suelo	63
FIGURA 45. Variación, en porcentaje, de la cohesión para las mezclas suelo-cemento, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural	64
FIGURA 46. Variación, en porcentaje, del ángulo de fricción para las mezclas suelo-cemento, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural.....	65
FIGURA 47. Variación, en porcentaje, de la RCU para las mezclas suelo-cemento, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural.....	66

FIGURA 48. Variación, en porcentaje, de la capacidad de soporte (CBR), para las mezclas suelo-cemento, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural.....	68
FIGURA 49. Variación, en el valor de pH en las mezclas de cal	68
FIGURA 50. Micrografías SEM del suelo en condición natural a escala de 400 μm	69
FIGURA 51. Micrografías SEM del suelo en condición natural a escala de 50 μm	70
FIGURA 52. Micrografías SEM de la mezcla suelo-cemento al 6% a escala de 400 μm	71
FIGURA 53. Micrografías SEM de la mezcla suelo-cemento al 6% a escala de 50 μm	71
FIGURA 54. Micrografías SEM de la mezcla suelo-cal al 6% a escala de 400 μm	72
FIGURA 55. Micrografías SEM de la mezcla suelo-cal al 6% a escala de 50 μm . (a) superficie porosa (b) superficie pulida	73
FIGURA 56. Micrografías SEM del suelo con 6% de cal adicionada a escala de 20 μm	73
FIGURA 57. Parches nebulosos producto de la reacción de la cal	74
FIGURA 58. Análisis EDS de las muestras (a) estado natural, (b) suelo-cal 6%, (c) Suelo-cemento 6%.....	74
FIGURA 59. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cemento.....	76
FIGURA 60. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cemento.....	77
FIGURA 61. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: CBR vs. Porcentaje de cemento.....	78
FIGURA 62. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: CBR vs. porcentaje de cemento	79
FIGURA 63. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: cohesión vs. porcentaje de cemento	81
FIGURA 64. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: cohesión vs. porcentaje de cemento	81
FIGURA 65. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: densidad máxima vs. porcentaje de cemento.....	83
FIGURA 66. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: densidad máxima vs. porcentaje de cemento.....	83
FIGURA 67. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: RCU vs. porcentaje de cemento	85
FIGURA 68. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: RCU vs. porcentaje de cemento	86

FIGURA 69. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal	88
FIGURA 70. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal	88
FIGURA 71. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal	89
FIGURA 72. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal	90
FIGURA 73. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal	91
FIGURA 74. Gráfica de dispersión de residuos vs. Ajuste del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal	91
FIGURA 75. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: CBR vs. porcentaje de cal.....	93
FIGURA 76. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: CBR vs. porcentaje de cal.....	93
FIGURA 77. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: cohesión vs. porcentaje de cal	95
FIGURA 78. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: cohesión vs. porcentaje de cal	95
FIGURA 79. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: densidad máxima vs. porcentaje de cemento.....	97
FIGURA 80. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: densidad máxima vs. porcentaje de cemento.....	97
FIGURA 81. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: RCU vs. porcentaje de cemento	99
FIGURA 82. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: RCU vs. porcentaje de cemento	100
FIGURA 83. Correlación entre la Cohesión y el contenido de cal	101
FIGURA 84. Correlación entre el ángulo de fricción y el contenido de cal.	102
FIGURA 85. Correlación entre RCU y el contenido de cal	102
FIGURA 86. Correlación entre la cohesión y el contenido de cemento	103
FIGURA 87. Correlación entre el ángulo de fricción y el contenido de cemento.....	103
FIGURA 88. Correlación entre RCU y el contenido de cemento	104

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.	Tipos de estabilización.....	5
TABLA 2.	Estabilidad volumétrica según el tipos de estabilización.....	6
TABLA 3.	Dosificaciones empleadas de suelo-cal.....	15
TABLA 4.	Dosificaciones empleadas de suelo-cemento.....	15
TABLA 5.	Secuencia de ensayos del experimento suelo-cemento y suelo-cal.....	17
TABLA 6.	Relación de normas de ensayo utilizadas en el programa de laboratorio.....	19
TABLA 7.	Capacidad de intercambio catiónico.....	20
TABLA 8.	Relación de peso de suelo en diferentes dosificaciones de suelo-cal, para la realización del ensayo de pH según norma ASTM 6276-99a.....	27
TABLA 9.	Relación de peso suelo-cementante: cal, para ensayos de límites de Atterberg.....	28
TABLA 10.	Relación de peso suelo-material cementante: cal, para ensayo normal de compactación.....	29
TABLA 11.	Relación de peso suelo-material cementante: cal, para montaje de especímenes compactados para tallado de muestras	30
TABLA 12.	Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 7 días.....	31
TABLA 13.	Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 14 días.....	31
TABLA 14.	Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 28 días.....	31
TABLA 15.	Relación de peso suelo-material cementante: cal, para ensayo de CBR.....	33
TABLA 16.	Relación de peso de suelo en diferentes dosificaciones de suelo-cemento, para la realización del ensayo de pH según norma ASTM 6276-99a.....	35
TABLA 17.	Relación de peso suelo-material cementante: cemento, para los ensayos de Límites de Atterberg.....	36
TABLA 18.	Relación de peso suelo-material cementante: cemento, para ensayo normal de compactación.....	37
TABLA 19.	Relación de peso suelo-material cementante: cemento, para montaje de especímenes compactados para tallado de muestras.....	38
TABLA 20.	Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 7 días.....	38
TABLA 21.	Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 14 días.....	39

TABLA 22. Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 28 días.....	39
TABLA 23. Relación de peso suelo-material cementante: cemento, para ensayo de CBR.....	41
TABLA 24. Datos obtenidos de los ensayos de clasificación.....	46
TABLA 25. Resultados del ensayo de corte directo.....	49
TABLA 26. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión no confinada..	49
TABLA 27. Resultados de los ensayos CBR realizados.....	50
TABLA 28. Resumen de las propiedades de resistencia y deformación del suelo en condición natural.....	50
TABLA 29. Resultados de los ensayos de límites de plasticidad para la mezcla suelo-cal en sus diferentes dosificaciones	52
TABLA 30. Valores obtenidos de la curva de compactación normal para la mezcla suelo-cal en sus diferentes dosificaciones	53
TABLA 31. Valores de cohesión, en kPa, obtenidos para las mezclas suelo-cal con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días	54
TABLA 32. Valores de ángulo de fricción obtenidos para las mezclas suelo-cal con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días	55
TABLA 33. Valores de RCU, en kPa, obtenidos para las mezclas suelo-cal con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días	56
TABLA 34. Valores de capacidad de soporte (CBR) obtenidos para la mezcla suelo-cal en las diferentes dosificaciones analizadas.....	58
TABLA 35. Resultados de los ensayos de límites de plasticidad para la mezcla suelo-cemento en sus diferentes dosificaciones	60
TABLA 36. Valores de la curva de compactación normal para la mezclas suelo-cemento.....	62
TABLA 37. Valores de cohesión, en kPa, obtenidos para las mezclas suelo-cal con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días	63
TABLA 38. Valores de ángulo de fricción obtenidos para las mezclas suelo-cemento con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días.....	64
TABLA 39. Valores de RCU, en kPa, obtenidos para las mezclas suelo-cemento con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días.....	66
TABLA 40. Valores de capacidad de soporte (CBR) obtenidos para la mezcla suelo-cemento en las diferentes dosificaciones analizadas.....	67
TABLA 41. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD.....	77
TABLA 42. Pruebas de múltiple rangos para CBR -1 por porcentaje de cemento	79
TABLA 43. Análisis de varianza para cohesión – suma de cuadrados tipo III ..	80
TABLA 44. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por tiempo de curado. Método: 95,0 porcentaje LSD.....	82
TABLA 45. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por porcentaje de cemento. Método: 95,0 porcentaje LSD	82

TABLA 46. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por tiempo de curado. Método: 95,0 porcentaje LSD.....	84
TABLA 47. Análisis de varianza para RCU – suma de cuadrados tipo III	85
TABLA 48. Pruebas de múltiple rangos para RCU por tiempo de curado. Método: 95,0 porcentaje LSD.....	86
TABLA 49. Pruebas de múltiple rangos para RCU por porcentaje de cemento. Método: 95,0 porcentaje LSD.....	87
TABLA 50. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD.....	89
TABLA 51. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD.....	90
TABLA 52. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD.....	92
TABLA 53. Análisis de varianza para cohesión – suma de cuadrados tipo III.....	94
TABLA 54. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por tiempo de curado. Método: 95,0 porcentaje LSD.....	96
TABLA 55. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por porcentaje de cal. Método: 95,0 porcentaje LSD.....	96
TABLA 56. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD.....	98
TABLA 57. Análisis de varianza para RCU – suma de cuadrados tipo III	99
TABLA 58. Pruebas de múltiple rangos para RCU por tiempo de curado. Método: 95,0 porcentaje LSD.....	100
TABLA 59. Pruebas de múltiple rangos para RCU por porcentaje de cal. Método: 95,0 porcentaje LSD.....	100

TABLA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

Sigla o Abreviatura	Significado
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials.
ASTM	American Society of Testing Materials.
CBR	California Bearing Ratio (Relación de Soporte).
CHO	Contenido de Humedad Óptima, en porcentaje.
CIC	Capacidad de intercambio catiónico.
DOE	Design of Experiment.
DPN	Departamento Nacional de Planeación.
EDS	Energy-Dispersive Spectroscopy.
INVIAS	Instituto Nacional de Vías.
IP	Índice de Plasticidad de un suelo.
K	Módulo de reacción del suelo.
LC	Límite de Contracción de un suelo.
LL	Límite Líquido de un suelo.
LP	Límite Plástico de un suelo.
MH	Limo de alta plasticidad, según nomenclatura del sistema unificado de clasificación de suelo.
MR	Módulo resiliente del suelo.
NTC	Norma Técnica Colombiana.
RCU	Resistencia a la Compresión Inconfinada.
SUSC	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
SEM	Scanning Electron Microscopy.
S _s	Gravedad específica o peso específico relativo de los sólidos del suelo.
ϕ	Ángulo de fricción interna del suelo.
c	Cohesión del suelo.



PREFACIO

La investigación que se describe en este documento se derivó del proyecto de investigación “Mejoramiento de Suelos de Baja Capacidad Portante Utilizando Cementantes”, este contó con el financiamiento de la División de Investigación y Extensión de la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS) seccional Ocaña. Dicho proyecto permitió proyectar una nueva fase de trabajo que analizará el comportamiento de los suelos no solo para pruebas de compresión de probetas de suelo-cementante, sino también el comportamiento físico y las características de esfuerzo-deformación de un suelo mezclado con cementantes.

Los autores acumularon las experiencias obtenidas desde el año 2012 en los diferentes proyectos de mejoramiento de suelos que ha realizado el Grupo de Investigación en Construcción, Geotecnia y Medio Ambiente (GIGMA) de la UFPS Ocaña. A partir de ellas plantearon esta investigación para realizar un análisis más amplio del comportamiento de un suelo de alta plasticidad, suelo típico que está presente en las subrasantes de varias vías terciarias del municipio de Ocaña (Norte de Santander) que en época de lluvias presentan problemas para el tránsito de vehículos.

Pese a que en la actualidad existen diversas soluciones para mejorar los subrasantes con problemas de plasticidad y baja capacidad portante, el uso de cementantes sigue siendo una opción muy útil. Esto es así porque es una solución fácil de

implementar y, a la luz de los resultados que se muestran en este libro, ofrece una mejora sustancial del comportamiento de este tipo de suelos.

El libro presenta una *primera parte* en la que mediante un diagrama de flujo explica la metodología de trabajo empleada y el correspondiente diseño experimental para el desarrollo de la investigación. Lo anterior permitió que los resultados obtenidos tuvieran el grado de confiabilidad requerido.

Una *segunda etapa* del libro contiene los trabajos de campo y laboratorio necesarios para caracterizar, desde el punto de vista físico y mecánico, el suelo utilizado como base para la investigación. Posteriormente se muestran los procedimientos de preparación de las diferentes dosificaciones para las mezclas suelo-cal y suelo-cemento, y cómo se prepararon las probetas para los ensayos que se realizaron con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días. Además, se aplicó posteriormente el mismo programa de ensayos que para el suelo en su condición natural.

Finalmente se tabulan todos los resultados de los ensayos físicos y de comportamiento esfuerzo-deformación, para las mezclas suelo-cal y suelo-cemento y se realiza un análisis comparativo y estadístico entre valores determinados de estas propiedades para suelo-cementante y suelo natural, esto permite establecer la incidencia en el comportamiento del suelo.

RESUMEN

El comportamiento de los suelos con alto contenido de material arcilloso y alta plasticidad posee un conjunto de características que lo hace de interés para la geotecnia. Por ello, con esta investigación se pretende determinar algunos parámetros físicos y mecánicos de un suelo limo arcilloso de alta plasticidad (MH) en condición inalterada y compararlos con el suelo cuando es estabilizado gracias a cementantes hidráulicos como la cal y el cemento portland. Para este propósito se realizaron ensayos que permitieron evaluar parámetros como: límite líquido, límite plástico, índice de plasticidad, ángulo de fricción interna, cohesión y resistencia a la compresión inconfiada, sobre diferentes probetas preparadas en dosificaciones de 2%, 3%, 4%, 5% y 6% usando la cal como agente estabilizante y probetas con dosificaciones de 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14% y 16% para el cemento. Para la medida de algunos de los parámetros anteriores las probetas fueron sometidas a procesos de curado durante 7 días, 14 días y 28 días.

La investigación incluyó también el análisis del comportamiento del suelo y de las mezclas suelo-cal y suelo-cemento cuando son sometidos a procesos de mejoramiento mecánico mediante compactación. Para esto se verificaron resultados del ensayo normal de compactación (Proctor) y de capacidad de soporte (CBR).

A partir de los resultados obtenidos se determinó la variación de los diferentes parámetros físicos y mecánicos del suelo, además, se encontró que en todos los casos la adición de cal y cemento influye en la disminución del índice de

plasticidad, en el incremento del ángulo de fricción y en la cohesión en la medida que se aumenta el porcentaje de cementante en la mezcla. Sin embargo, en el caso de la cal hay una disminución con relación al tiempo de curado del aumento en el valor de la cohesión y, finalmente, la resistencia a la compresión inconfina del suelo mejora apreciablemente con adición de cementantes hidráulicos.

Los resultados obtenidos en la investigación mostraron que la capacidad de soporte, evaluada con el ensayo CBR de laboratorio, mejora significativamente con la adición de cementantes. Esto muestra la importancia de la cal cuando se compara el aumento en el CBR con el porcentaje adicionado de esta en relación con el porcentaje adicionado de cemento.

INTRODUCCIÓN

Alrededor del 80% de las vías en el mundo están sin pavimentar y en su mayoría manejan bajos volúmenes de tránsito. De acuerdo con la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) aproximadamente el 20% de los pavimentos fallan debido a la insuficiencia en la resistencia estructural (Duarte y Sierra, 2011). Colombia, de acuerdo con el Ministerio de Transporte (2017), cuenta con 205.937 km de carreteras: 142.284 km son de la red terciaria, de la cual solo el 6% se encuentra pavimentado (Acosta y Alarcón, 2017). En cuanto a la red vial primaria esta tiene 7019.56 km y esta pavimentada el 84.87% (INVIAS, 2018). Esta situación nos muestra que la red terciaria se encuentra en estado crítico, pues de forma gradual se ha venido deteriorando principalmente por la carencia de mantenimiento y los bajos recursos con los que disponen los departamentos para inversión en infraestructura vial (Zamora y Barrera, 2013).

Las vías terciarias son las carreteras que articulan las cabeceras municipales con la red primaria y, es decir, aquellas que comunican los municipios e integran veredas y corregimientos entre sí (Zamora et al., 2013). Las obras de reparación y mantenimiento que se dan sobre estas vías es limitada por la poca disponibilidad de recursos para ese propósito (Duarte et al., 2011), además, los materiales que componen la subrasante de estas vías en general suelen tener problemas durante la época invernal limitando el tránsito y el acceso. Por tal razón, es necesaria la implementación de técnicas de estabilización como alternativa para mejorar las

propiedades físicas y mecánicas de los suelos y, así mismo, la estabilidad global del pavimento, esto reduce costos y minimiza los requisitos de mantenimiento.

El funcionamiento de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos subyacentes porque los suelos inestables pueden crear problemas significativos (Díaz, 2010). Es común encontrar suelos susceptibles a la variación en su contenido de humedad, como los limos y las arcillas, en las subrasantes de la gran mayoría de proyectos de construcción de estructuras de pavimentos que requieren ser intervenidos (Sandoval, Cristancho, Naranjo, 2013). Este tipo de suelos, que tienden a ser cohesivos, no poseen un verdadero esqueleto granular, por ello predomina la fracción fina. Por otra parte, los suelos finos tienen la tendencia a rodear cada partícula de películas de agua “gruesas” que actúan como lubricante, esto destruye su capacidad para servir como medio ligante y determina marcados cambios de volumen y pérdida de la resistencia bajo cargas (Higuera et al., 2012).

La subrasante puede estar constituida por un suelo en estado natural o puede estar intervenido con algún proceso de mejoramiento. La mejora consiste en la implementación de soluciones ingenieriles que tienen como objetivo incrementar la funcionalidad de la superficie existente y adecuar previamente la capacidad estructural del pavimento (CAF, 2010). Por otra parte, aproximadamente una quinta parte de las fallas del pavimento ocurren debido a una baja resistencia estructural, ya que los caminos no pavimentados consisten en materiales no amarrados que son susceptibles a la erosión y esta depende de las condiciones del carga del tráfico y las condiciones climáticas (Kuttah, 2013). Entonces, es importante aplicar a estos materiales un método de estabilización que, dependiendo de las condiciones existentes, logre mejorar la composición del suelo que servirá de apoyo a las capas del pavimento (Higuera et al., 2012).

La estabilización del suelo es el proceso de mejorar sus propiedades físicas y mecánicas para obtener un mejor comportamiento ante la acción de cargas (Eisazadeh, 2010). Los diferentes métodos de estabilización del suelo, como la estabilización mecánica, física y química, buscan aumentar los parámetros de resistencia del suelo, la capacidad de carga y disminuir el asentamiento (Martó, Latifi y Sohaei, 2013). Las mejoras más comunes logradas a través de la estabilización incluyen una mejor gradación del suelo, reducción del índice de plasticidad o potencial de hinchamiento y un aumento de la durabilidad y la resistencia (Ramaji, 2012).

Kezdi (2016) menciona en su libro *Stabilized Earth Roads* una amplia descripción sobre los diferentes métodos de estabilización. Allí señala que los métodos mecánicos aseguran la estabilidad del suelo sin la adición de ningún material extraño, por otra parte, las propiedades del suelo se logran mejorar al reducir

el volumen *in situ* mediante la compactación. Es importante destacar que este método suele combinarse con otras técnicas pues en casi todos los casos se requiere de compactación. Además, los métodos físicos incluyen cambios de temperatura, hidratación, evaporación y adsorción. Finalmente los métodos químicos se basan en las diferentes reacciones químicas como el intercambio iónico, la precipitación (que se logra al mezclar dos soluciones que producen un nuevo compuesto capaz de ejercer un efecto de estabilización) y, adicionalmente, otros procesos como la polimerización y la oxidación.

El objetivo que llevo al desarrollo de esta investigación fue *establecer la variación que se puede presentar en las características físicas básicas y propiedades mecánicas de un suelo que presenta altos valores del límite líquido y un porcentaje considerable de finos cuando se mezcla con cementantes hidráulicos como la cal y el cemento*. En el capítulo 1 se presenta una revisión bibliográfica sucinta sobre el mejoramiento de suelos. En el capítulo 2 se establece la metodología de trabajo y el correspondiente diseño experimental. En el capítulo 3 se muestran los resultados y su discusión, incluyendo el análisis estadístico. Finalmente, en el capítulo 4 se presentan las conclusiones relevantes de la investigación desarrollada.

CAPÍTULO 1

MEJORAMIENTO DE SUELOS

El mejoramiento de suelos es un procedimiento que se aplica en circunstancias en las que el suelo encontrado en la implementación de un determinado proyecto, en particular proyectos viales, presenta un comportamiento no adecuado a sus necesidades. Este comportamiento puede ser: baja capacidad de carga, susceptibilidad a cambios en el contenido de humedad y altas deformaciones. La plasticidad del suelo es un factor influyente en estos aspectos y, por ello, es necesario implementar metodologías que permitan controlar este comportamiento inadecuado.

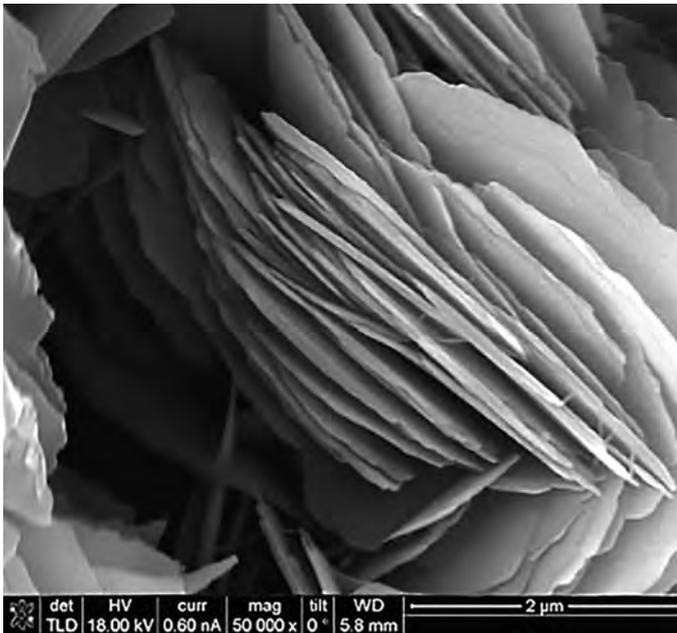
1.1. Plasticidad de los suelos

Expresado por Badillo (2005) en el libro *Mecánica de suelos*, la plasticidad puede definirse como “la propiedad de un material por la cual es capaz de soportar deformaciones rápidas, sin rebote elástico, sin variación volumétrica apreciable y sin desmoronarse ni agrietarse”. En la práctica, este aspecto dista un poco de la realidad, ya que materiales como la arena también pueden deformarse sin agrietarse ni desmoronarse siempre que se le aplique una carga lenta, sin embargo, la diferencia es que el volumen de la arena permanece constante. Sin embargo, no hay duda de que la plasticidad es una propiedad exclusiva de los suelos que contienen partículas de arcillas y limos, es decir, los suelos finos. Por otra parte, a partir de investigaciones realizadas por Atterberg, Terzaghi y Goldsmidt se ha podido establecer que la plasticidad es producto de la carga eléctrica de partículas

laminares que generan campos que actúan como condensadores que interactúan con las moléculas bipolares de agua.

La plasticidad de un suelo se atribuye a la deformación de la capa de agua adsorbida alrededor de los minerales, esta se desplaza a los largo de una superficie mineral como una sustancia viscosa controlada por la atracción iónica (Duque y Escobar, 2002). La forma laminar y aplanada de las arcillas y su pequeño tamaño (figura 1) hace que sean muy plásticas, por ello, la plasticidad del suelo depende de su presencia en la masa de suelo. Skempton (1953) planteó una relación matemática que relaciona la actividad de la arcilla:

Figura 1. Imagen microscópica de un suelo arcilloso (Montmorillonita)



Fuente: Zapata, 2018.

Ecuación 1.

$$A = \frac{IP}{\% \text{ de arcilla}}$$

Dónde:

A: actividad.

IP: índice de plasticidad.

‰: porcentaje en peso de solidos de partícula menores a 2μ.

La actividad de la caolinita es baja ($A = 0,38$), la de la illita es media ($A = 0,90$) y la de la montmorillonita es un mucho mayor ($A = 7,20$).

1.1.1. Límites de consistencia

Los límites de consistencia se refieren a los cuatro estados en que puede encontrarse un suelo en función del contenido de humedad: sólido, semisólido, plástico o líquido (Craig, 2013). En el caso de una arcilla en estado seco su consistencia es suelta o terrones; con la adición gradual de agua, adquiere una consistencia pastosa; y, con una cantidad mayor de agua, pasa a tener una consistencia fluida. Entonces, los umbrales de humedad que separan cada estado son denominados límites de consistencia o límites de Atterberg¹.

En general, dependiendo del contenido de agua (la relación de la masa de agua con respecto a la masa de los sólidos) es posible encontrar un suelo en cualquiera de los estados mencionados y, si el contenido de agua en un suelo líquido se reduce gradualmente, el estado cambiara progresivamente pasando de líquido a plástico y semisólido hasta alcanzar el estado sólido. Este cambio está acompañado de una reducción del volumen.

En la naturaleza, la mayoría de los suelos finos existen en un estado plástico, dicha plasticidad se debe a la presencia de un contenido significativo de partículas de minerales de arcilla (o material orgánico). El espacio vacío entre dichas partículas generalmente es de tamaño muy pequeño, lo que produce una presión negativa por la tensión capilar. Esto genera un grado de cohesión entre las partículas, lo que da al suelo la facultad de ser deformado y moldeado. Además, la absorción de agua a causa de las fuerzas superficiales sobre las partículas minerales de arcilla puede contribuir al comportamiento plástico y cualquier disminución en el contenido de agua da como resultado una disminución en el espesor de la capa de cationes y un aumento de las fuerzas atractivas netas entre las partículas.

Los límites superior e inferior en el rango del contenido de agua en el que el suelo posee un comportamiento plástico se define como el límite líquido (W_L) y el límite plástico (W_p) respectivamente. El rango del contenido de agua que corresponde a la diferencia entre estos dos límites (ecuación 2) se conoce como el índice de plasticidad (Chamba, 2018).

1 En honor a Albert Mauritz Atterberg quien definió estos estados y demostró que la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial, y que depende del contenido de agua.

Ecuación 2.

$$I_p = W_L - W_p$$

La aplicación de los conceptos de Atterberg en el campo de la ingeniería se desarrolló con los trabajos de Arthur Casagrande, quien normalizó una metodología de laboratorio a partir de la que es posible el cálculo de la humedad que separa un estado plástico de un estado líquido del suelo. Sin embargo, las transiciones entre los diferentes estados son graduales y pueden definirse arbitrariamente.

A nivel conceptual, el límite líquido corresponde a la humedad por encima de la que la resistencia al corte de un suelo es nula. Su determinación se realiza mediante un ensayo que relaciona el umbral de humedad con un cierto número de golpes. Por otro lado, el límite plástico corresponde al umbral de humedad para el que un suelo muestra deformaciones plásticas en relación con las tensiones aplicadas y, a nivel práctico, se refiere a la humedad por debajo de la que es imposible moldear un cilindro de 3 mm de diámetro.

Así mismo, el límite de contracción se relaciona con la humedad por debajo de la que un suelo deja de presentar una disminución del volumen asociada a la disminución de la humedad, pues se entiende que los poros del suelo ya están ocupados de aire, por ello, se asume que el límite de retracción corresponde a la humedad de saturación de una arcilla.

1.2. Estabilización de suelos

Según los objetivos del tratamiento, suele distinguirse entre mejoramiento y estabilización de suelos. El mejoramiento se aplica generalmente a suelos de grano fino, plásticos y con altas humedades naturales, con problemas de compactación, expansividad y sensibilidad al agua. En cambio, la estabilización busca principalmente un aumento en la capacidad de soporte y una reducción en la sensibilidad al agua.

La estabilización del suelo se logra con una serie de procesos mecánicos, físicos, fisicoquímicos y químicos que transforman las propiedades ingenieriles de los suelos, obteniendo un material apto para su utilización, que busca mejorar propiedades tales como: resistencia, durabilidad, plasticidad, permeabilidad, estabilidad volumétrica, compresibilidad, trabajabilidad y permanencia de las propiedades adquiridas (Higuera, 2010). En la tabla 1 se muestran los principales tipos de estabilización que se emplean regularmente, y los fenómenos que producen en la masa de suelo.

Tabla 1. Tipos de estabilización

Tipo	Estabilización	Produce
Mecánica	Proceso de compactación	Densificación
Física	Granulometría Suelo Betún	Fricción y cohesión Cohesión e impermeabilización
Físicoquímica	Suelo-Cal	Intercambio iónico y cementación
Química	Suelo Cemento	Intercambio iónico y cementación

Fuente: Dorfman, B. Estabilización de suelos (1988) citado por Higuera (2010).

1.2.1 Método mecánico

La estabilización mecánica implica metodologías de mejoramiento de las propiedades del suelo sin la incorporación de nuevos agentes u otras energías de unión de partículas. Dentro de los principales métodos se encuentran los siguientes (Das, 2001):

- Compactación.
- Vibroflotación.
- Voladura o *blasting*.
- Compactación dinámica.
- Precarga.
- Drenes de arena.

En general, es muy frecuente el uso de la compactación del suelo para incrementar la densificación del suelo, aumentar su resistencia y la capacidad de carga, además de reducir la compresibilidad y la disposición a absorber agua (Higuera, 2010). Además de ser uno de los métodos más económicos y de fácil acceso, es usado ampliamente en terraplenes, canales, cimentaciones y rellenos debido a los beneficios reflejados en un incremento de la resistencia al corte, un incremento del potencial de expansión, una disminución de la contracción, también disminuye la relación de vacíos que conlleva a una reducción de la permeabilidad.

1.2.2. Método físico

Estos métodos mejoran el suelo mediante cambios físicos, generalmente recurriendo a la mezcla de suelos, geotextiles, vibroflotación o consolidación previa. Así, este tipo de estabilización busca aumentar en forma significativa propiedades físicas, ajustando la granulometría del suelo con la incorporación de un nuevo

material, generando un material resultante con mayor fricción entre partículas y cohesión de la masa del suelo.

Cuando se mezclan diferentes tipos de suelos (por ejemplo, arena y arcilla), se busca aprovechar principalmente las características de cada material, en este caso la alta fricción interna de la arena que la hace soportar grandes esfuerzos y la cohesión de la arcilla que mantiene unida las partículas del suelo (Zuluaga, 2005). Sin embargo, la sola mezcla de los materiales no es suficiente, por ello es necesaria la aplicación de energía de compactación.

1.2.3. Método químico

La estabilización con aditivos químicos alteran las propiedades fisicoquímicas del suelo mediante la generación de un incremento en el soporte del suelo y mejora su durabilidad. Para tal propósito suelen usarse materiales cementantes como el cemento, cal y asfalto bituminoso (Raj, 2015). Es importante conocer las características originales de los minerales arcillosos que contenga el suelo, ya que en el caso de la cal se puede estimar *a priori* las ventajas que se logran (Martínez, 2012).

La estabilización química se refiere al cambio de las propiedades del suelo mediante la incorporación de cementantes orgánicos, inorgánicos o sustancias químicas. Este último es el más común y es de uso comercial, y consta de la aplicación de un producto químico denominado *estabilizador*.

Estas mejoras son el resultado de una serie de procesos químicos que tienen lugar en presencia de un estabilizador. Si bien tanto el cemento portland como la cal son capaces de proporcionar calcio (el principal ingrediente para estabilizar un suelo arcilloso), ambos difieren en cuanto a su naturaleza química, la reacción en presencia de agua y los productos resultantes de la reacción (Bhattacharja y Bhatta, 2003). La tabla 2 muestra el nivel de estabilidad volumétrica alcanzada dependiendo del suelo y el tipo de estabilización seleccionada.

Tabla 2. Estabilidad volumétrica según el tipos de estabilización

Suelo	Arcillas finas	Arcillas gruesas	Limos finos	Limos gruesos	Arenas finas	Arenas gruesas
Tamaño de las partículas (mm)	<0.0006	0.0006-0.002	0.002-0.01	0.01-0.06	0.06-0.4	0.4-2.0
Estabilidad volumétrica	Muy pobre	Regular	Regular	Buena	Muy buena	Muy buena

Suelo		Arcillas finas	Arcillas gruesas	Limos finos	Limos gruesos	Arenas finas	Arenas gruesas
Tipo de estabilización	Cal						
	Cemento						
	Asfalto						
	Mecánica						
Rango de máxima eficiencia							
Efectiva, pero el control de calidad puede ser difícil							

Fuente: Guía para el diseño y la construcción de capas estructurales de pavimentos estabilizadas mediante procesos químicos. Instituto de Desarrollo Urbano (IDU), (2005).

1.3. Estabilización con cementantes

Los agentes estabilizadores del suelo como el cemento o la cal se ha utilizado convencionalmente en la ingeniería de pavimentos y en el mejoramiento de suelos (Yao et al., 2016; Liu, 2017; Cheng, 2018). A continuación hablaremos de la aplicación de aditivos químicos.

1.3.1. Cal

La adición de cal a los suelos para su mejoramiento tiene una larga historia. McDowell (1959) menciona que este tipo de estabilización se usaba desde Mesopotamia y Egipto para la estabilización de caminos de tierra, además, los griegos y romanos usaban mezclas de suelo-cal (Bell, 1996). Los primeros ensayos modernos con cal como agente estabilizante se desarrollaron en Estados Unidos 1904 (Clare y Cruchley, 1957). En la práctica, la cal se usó por primera vez como agente estabilizador del suelo en 1924 en tramos cortos de carretera fortalecidos con cal hidratada (McCaustland, 1925). A partir de entonces el uso de la estabilización de los suelos comenzó a aumentar y fue ampliamente usado durante la segunda guerra mundial para la construcción de pistas y carreteras (Bell, 1996).

En la actualidad, la estabilización de suelos arcillosos con la incorporación de cal es una técnica ampliamente utilizada en el campo de la construcción. Además, es usado principalmente en construcción de carreteras para el mejoramiento de subrasantes y subbases. También se utiliza en la construcción de ferrocarriles, aeropuertos, terraplenes y como mejoramiento para material de préstamo en pendientes inestables, como relleno en pilares de puentes y muros de contención (Anon, 1985,1990). La elección del contenido óptimo de cal varía con respecto a los diversos factores, como la presencia de la materia orgánica, el porcentaje de los diferentes minerales arcillosos, el tipo de cal, el porcentaje de finos y el material grueso presente en el suelo a estabilizar (Martínez, 2012).

La mezcla de un suelo arcilloso y cal genera un efecto inmediato sobre las propiedades del suelo a medida que el intercambio de cationes toma lugar entre los iones metálicos asociados con la superficie de las partículas de arcilla y los iones de calcio de la cal. Las partículas de arcilla, como ya se mencionó, están rodeadas por una doble capa difusa que se modifica con el intercambio iónico del calcio.

Lo anterior produce una modificación de la densidad de la carga eléctrica alrededor de las partículas de arcilla que produce un acercamiento entre partículas formando flóculos. Este proceso es el principal responsable de la modificación de las propiedades de ingeniería de los suelos arcillosos cuando son tratados con cal (Sherwood, 1993). Todos los tipos de minerales arcillosos reaccionan con la cal. Por otra parte, la naturaleza del catión intercambiable no hace mucha diferencia en los suelos arcillosos caoliníticos, pero puede tener un efecto significativo en los suelos arcillosos que contienen montmorillonita. De hecho, las arcillas expansibles tienden a reaccionar fácilmente con la cal, perdiendo plasticidad inmediatamente (Bell y Coulthard, 1990).

Al agregar cal a un suelo arcilloso, primero debe satisfacer la afinidad del suelo por la cal, es decir, los iones son adsorbidos por los minerales de arcilla y no están disponibles para las reacciones puzolánicas hasta satisfacer esta afinidad. Este proceso se conoce como fijación de cal (Hilt y Davidson, 1960, p. 9). El punto de fijación de cal en la práctica corresponde al punto donde la adición de la cal no produce cambios adicionales en el límite plástico y, por lo tanto, es la adición óptima de cal necesaria para el mejoramiento del suelo y normalmente esta entre 1% y 3% de cal añadido en peso. Más allá de este punto, la cal está disponible para un incremento de la resistencia y, de acuerdo con los trabajos desarrollados por Ingles (1978), una buena regla general para establecer la cantidad de cal para adicionar es incorporar un 1% de cal al suelo por cada 10% de arcilla.

Los tipos de cal utilizados para estabilizar los suelos de grano fino son cal hidratada alta en calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$, cal viva calcítica (CaO), cal dolomítica monohidratada $[\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgO}]$ y cal viva dolomítica $[\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2]$.

1.3.2. Cemento

El cemento, después de fraguar e hidratarse los silicatos y aluminatos cálcicos anhidros, produce uniones entre las partículas del suelo que logran disminuir la sensibilidad al agua y, dependiendo del contenido de conglomerante, pueden aumentar considerablemente la resistencia a la deformación y ofrecer cierta resistencia a la tracción (IECA, 2008).

La mayoría de los suelos se pueden estabilizar con éxito empleando cemento, pero cada caso específico debe analizarse para determinar la cantidad requerida

(Jeyapalan, 1981). Lambe y Whitman (1959) proponen un determinado porcentaje de cemento dependiendo de la tipología del suelo. Para arenas, un nivel de cemento de 7 a 12 % en peso, en limos un porcentaje de cemento de 12 a 15% y para arcillas entre un 12 al 20% en peso.

El uso del cemento logra desarrollar en el suelo una red de enlaces durante las reacciones de hidratación que proporcionan a la mezcla “suelo-cemento” una buena capacidad de soporte e incluso con una dosificación adecuada, una cierta resistencia mecánica a corto plazo, mejorando también la durabilidad y las estabilidad dimensional (IECA, 2013). La acción del cemento sobre la arcilla reduce el límite líquido, el índice de plasticidad y el cambio potencia volumétrico, además, aumenta el límite de contracción y la resistencia al corte (Diaz, 2010). Autores como Spangler y Patel (1949) y Jones (1958) registran casos de éxito con la utilización del cemento portland en porcentajes del 2 al 6%, además, se observa una reducción considerable en la tendencia al cambio volumétrico. Una de las principales limitaciones prácticas de la estabilización con cemento es el requerimiento de agua, pues los suelos que absorben gran cantidad de esta limitan la cantidad de agua disponible para que se produzcan las reacciones necesarias para la formación suelo-cemento.

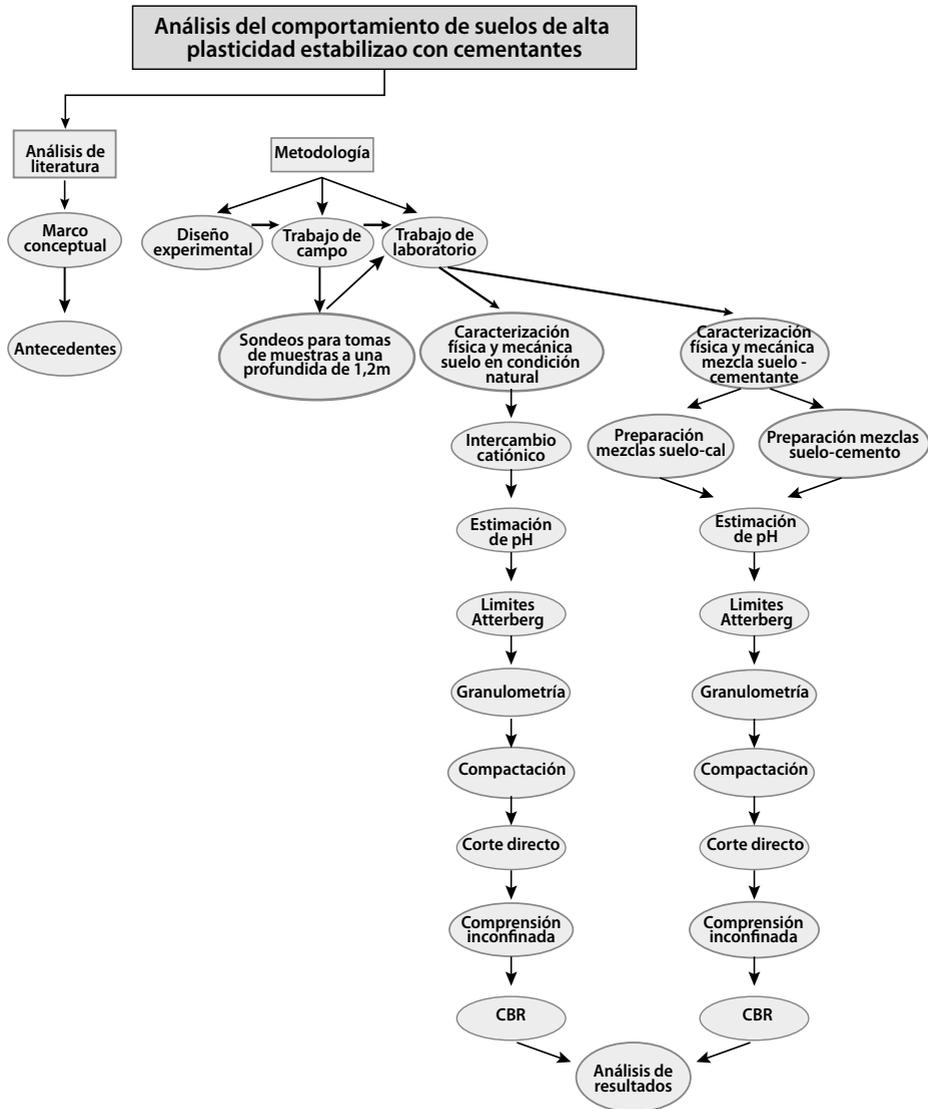
Los métodos usados para aplicar el cemento para la estabilización son similares a los utilizados con la cal, sin embargo, la infiltración del cemento en suelos de grano fino no es tan eficaz como en el caso de la cal debido a la poca solubilidad del cemento en el agua. Cuanto más cemento se agregue al suelo, más fuerte será la mezcla de cemento-suelo resultante (Jeyapalan, 1958). El cemento más efectivo para este proceso de estabilización es el de alta resistencia, pues logra una mezcla más resistente y más duradera para el suelo.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

Para realizar el análisis de la incidencia en el comportamiento de un suelo de alta plasticidad cuando estos han sido mezclados con materiales cementantes como la cal y el cemento portland, se requirió establecer un diagrama de trabajo que permitiera establecer los procedimientos a emplear en el desarrollo de la investigación y que sirviera para determinar algunas características físicas básicas y mecánicas del tipo de suelo a estudiar, para que finalmente se pudiera analizar la variación de estas propiedades al comparar las que se obtuvieron en la *condición natural* del suelo y las obtenidas al *mezclarlo con materiales cementantes*. En la figura 2 se muestra el procedimiento esquemático del trabajo realizado.

Figura 2. Metodología implementada



Fuente: elaboración propia.

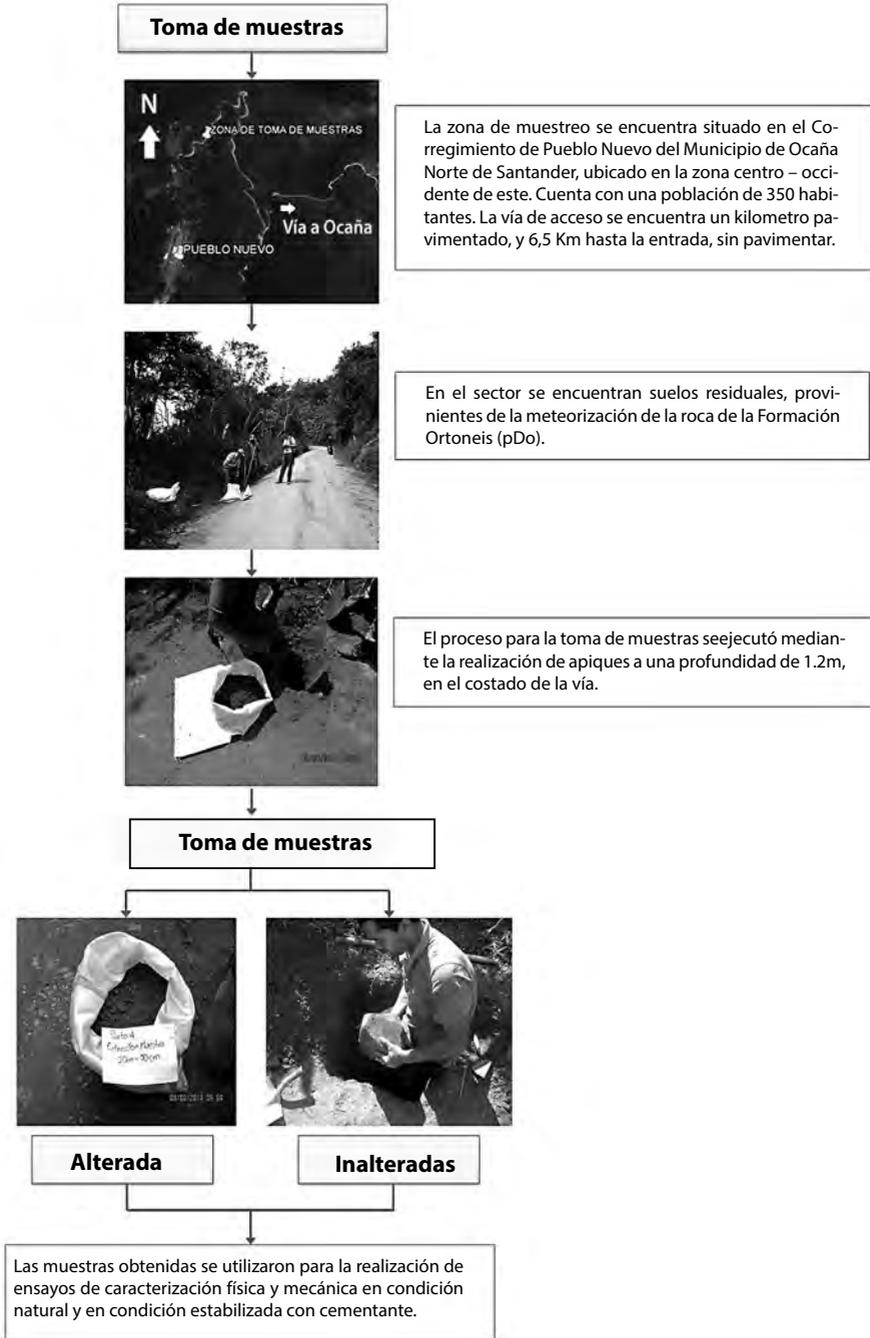
2.1. Diseño experimental

El diseño de experimento se realiza teniendo en cuenta que el objetivo fundamental de la investigación es establecer el efecto generado por la combinación de suelo con diferentes proporciones de agentes estabilizadores como el cemento y la cal en sus

propiedades físicas y mecánicas como la cohesión, el ángulo de fricción, capacidad de soporte, límites de plasticidad y resistencia a la compresión inconfiada.

Para el desarrollo de cualquier programa de ensayos de laboratorio se requiere, en primera instancia, obtener la cantidad suficiente y representativa de muestra. Para ello se procede a identificar el sector donde se encuentran los materiales que serán objeto de estudio, realizando visitas de campo e identificando por inspección visual sitios donde se encuentren suelos arcillosos. En la ciudad de Ocaña los suelos con alto contenido de materiales finos con alta plasticidad se encuentran en las zonas donde se tienen perfiles residuales evolucionados de la alteración de rocas de tipo ígneo y metamórfico. En este caso el sector seleccionado para el muestreo corresponde a un tramo de la vía que comunica a la ciudad de Ocaña con el corregimiento de Pueblo nuevo, en el que se encontraron materiales residuales de tipo cohesivo provenientes de la meteorización de la roca de la unidad geológica presente en el sector, el Ortoneis (pDo). Posteriormente se realizaron apiques para la extracción de las muestras por el lado derecho de la vía en el sentido Ocaña–Pueblo Nuevo. En la figura 3 se detalla el proceso de toma de muestras:

Figura 3. Localización de la zona y toma de muestras para el estudio



Fuente: elaboración propia.

2.1.1. Diseño de experimento con un solo factor

Se decidió utilizar como factor de diseño la dosificación de suelo-cal dadas en un porcentaje del peso seco al aire del suelo y utilizando cal hidratada marca SuperTecnical de la empresa Carbuross Mekong. En la tabla 3 se muestran las proporciones empleadas:

Tabla 3. Dosificaciones empleadas de suelo-cal

Dosificación (% en peso suelo seco al aire)
2%
3%
4%
5%
6%

Fuente: elaboración propia.

Las proporciones para suelo - cemento se especifican en la tabla 4 empleando el cemento marca Holcim.

Tabla 4. Dosificaciones empleadas de suelo-cemento

Dosificación (% en peso suelo seco al aire)
2%
4%
6%
8%
10%
12%
14%
16%

Fuente: elaboración propia.

Estas proporciones se determinaron con base en los resultados publicados en el *Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA)*, en el que se establece la variación en el porcentaje de finos, en los límites de plasticidad y en el índice CBR para el porcentaje de adición de cal variando desde 0.5% a 3%. Se planteó esta investigación para conocer la incidencia en otras propiedades como la compresión inconfiada, el

ángulo de fricción interna y la cohesión, no solo para porcentaje de cal mayores al 2% sino también para el caso en el que el material cementante sea el cemento. Las muestras por utilizar en el experimento se realizaron variando las proporciones de suelo-cal y suelo-cemento en los rangos especificados en las tablas 3 y 4. Para el caso de las probetas sin adición de cementante, el procedimiento para la elaboración de las muestras se realizó mediante el tallado de bloques inalterados de suelo obtenidos de apiques realizados en el sector de muestreo. Para el caso de las probetas de suelo-cal y suelo-cemento el procedimiento de preparación se estableció de la siguiente forma:

1. Secado del suelo al aire.
2. Determinación del contenido remanente de humedad del suelo.
3. Cálculo del peso seco (W_s) del suelo.
4. Determinación de los pesos de cal y cemento en función del peso seco del suelo (W_s) para las dosificaciones indicadas en las tablas 1 y 2.
5. Mezclado del suelo seco al aire con la cal o el cemento hasta obtener aspecto homogéneo.
6. Adición de agua y mezclado hasta obtener una distribución homogénea del agua y la mezcla suelo-cal o suelo-cemento.
7. Compactación en un molde de 101.6 mm (4") de diámetro, altura de 116.39 mm y peso 1992.2 g, en 3 capas y aplicando 25 golpes a cada capa con el martillo del Proctor estándar.
8. Determinación de la humedad óptima de compactación para cada dosificación de mezcla suelo-cal y suelo-cemento.
9. Fabricación de probetas para ensayos de corte directo y compresión inconfiada mediante el tallado de una probeta cilíndrica fabricada como se indicó en el paso 7, preparada con la humedad óptima correspondiente a cada dosificación y para tiempos de curado de 7, 14 y 28 días.
10. Realización de ensayos CBR para tres muestras compactadas a diferentes energías (10, 25 y 56 golpes) y preparadas con las diferentes dosificaciones suelo-cal y suelo-cemento indicadas en la tabla 3 y tabla 4.

Las muestras de cal y cemento se tomaron de la misma bolsa y la muestra de suelo se tomó del mismo apique y el mismo tipo de suelo. El experimento se realizó de forma aleatoria empleando los equipos:

- » Limite Líquido (Cazuela de Casagrande marca PINZUAR Ref. PS11).
- » Limite Plástico (Conjunto para determinar el límite plástico Ref. PS 14).

- » Ensayo de Corte Directo (Equipo Automático para ensayos de corte directo Ref. PS 107 Serial HJ-437666).

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de suelos de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña implementando los equipos descritos anteriormente. El experimento se replicó 3 veces dados los costos del proceso y los tiempos de ejecución. En la tabla 5 se muestra la secuencia aleatorizada de ensayos para el experimento suelo-cemento y suelo-cal.

Tabla 5. Secuencia de ensayos del experimento suelo-cemento y suelo-cal

Número de corrida	Dosificación suelo-cemento	Dosificación suelo-cal
1	6	3
2	2	4
3	2	4
4	14	2
5	4	2
6	8	3
7	8	5
8	6	6
9	16	4
10	10	6
11	10	2
12	6	5
13	14	3
14	4	2
15	2	6
16	10	-
17	16	-
18	8	-
19	2	-
20	4	-
21	16	-
22	16	-
23	12	-
24	12	-

Fuente: elaboración propia.

Los ensayos se realizaron en un ambiente controlado evitando que factores externos como el operador, el equipo, la temperatura, la evaporación, etc., puedan afectar la medición. Para la realización de los ensayos, el procedimiento se basó en la normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM) y las del Instituto Nacional de Vías (INVIAS).

2.2. Tipo de investigación

La investigación implementada para el desarrollo del proyecto es de tipo experimental, esto incluye el trabajo de campo para la recolectar las muestras necesarias para ejecutar el programa de ensayos de laboratorio y, así, realizar posteriormente el análisis del comportamiento del suelo en su condición natural y en la condición en la que es mezclado con diferentes dosificación de cementantes hidráulicos. La población objeto de estudio está integrada por los suelos de tipo cohesivo con alta plasticidad, estos en época de lluvias presentan condiciones que los hacen tener un comportamiento deficiente cuando son sometidos a cargas.

La obtención de la muestra se basó en experiencias registradas por autores como Obert y Duvall (1967). Ellos establecen que se puede trabajar con un valor de desviación estándar aceptable de entre el 3.5 al 10% y, tomando como base lo propuesto por Correa (2005), se determinó que el número de pruebas a realizar es de 99. Estas pruebas corresponden a los ensayos para obtener algunas propiedades físicas y mecánicas de modo que se conforme un grupo de datos estadísticamente representativo que permita establecer la variación en el comportamiento del suelo al compararlo en *condición natural* y *mezclado con algún material cementante*.

2.3. Metodología para la recolección de la información

Para la recolección de la información utilizada en el desarrollo de la investigación, se partió de la revisión de fuentes que brindaran información primaria en lo relacionado a la toma de muestras y la realización de los ensayos de laboratorio. Para ello se consultaron las normas de ensayos de materiales (en este caso de suelo) del INVIAS; las Normas Técnicas Colombianas (NTC); y las normas de la ASTM; todas estas en sus versiones más recientes.

En lo referente a fuentes secundarias de información, se consultaron diferentes tipos de publicaciones como artículos de revistas, libros y diversos documentos publicados en internet que tratan la temática de estabilización de suelos y, en particular, el uso de cementantes hidráulicos tales como la cal y el cemento portland.

La información recopilada en campo se obtuvo mediante el uso de herramienta manual para la obtención de muestras alteradas de suelo y mediante el tubo de pared delgada (*Shelby*). Para las muestras inalteradas, los tubos fueron protegidos

en sus extremos y, junto con el resto de material, se transportaron al laboratorio de suelos y pavimentos de la UFPS seccional Ocaña para la ejecución del programa de ensayos.

2.4. Programa de ensayos de laboratorio

El conjunto de ensayos de laboratorio a desarrollar tiene como fin establecer el comportamiento del suelo de alta plasticidad en estudio tanto desde el punto de vista de las propiedades físicas básicas como: humedad, límites de plasticidad, peso unitario y relaciones humedad-densidad. Además, es relevante su comportamiento mecánico, este será evaluado mediante ensayos de corte directo, compresión inconfina y CBR bajo dos condiciones: en *estado natural* y cuando se han *mezclado con algún material cementante* como la cal y el cemento portland.

Para la realización de los ensayos de laboratorio se seleccionaron las normas del INVIAS versión 2013. En la tabla 6 se resumen los ensayos realizados y la correspondiente norma.

Tabla 6. Relación de normas de ensayo utilizadas en el programa de laboratorio

Norma	Descripción
I.N.V. E-103	Conservación y transporte de muestras de suelo.
I.N.V. E-104	Toma de muestras inalteradas de suelo en superficie.
I.N.V. E-105	Obtención de muestras de suelo mediante tubos de pared delgada.
I.N.V. E-122	Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de muestras de suelo, roca y mezclas de suelo-agregado.
I.N.V. E-123	Determinación de los tamaños de partículas de los suelos.
I.N.V. E-125	Determinación del límite líquido de los suelos.
I.N.V. E-126	Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.
I.N.V. E-128	Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua.
I.N.V. E-141	Relaciones de humedad – peso unitario seco en los suelos (ensayo normal de compactación).
I.N.V. E-148	CBR de los suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada.
I.N.V. E-152	Compresión inconfina en muestras de suelos.
I.N.V. E-154	Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD).
I.N.V. E-180	Clasificación de suelos y de mezclas de suelos y agregados con fines de construcción de carreteras (sistema AASHTO).
I.N.V. E-181	Sistema unificado de clasificación de suelos para propósitos de ingeniería.
ASMT D-6276	Standard Test Method for Using pH to Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization.

Fuente: INVIAS, 2013.

2.4.1. Análisis en condición natural de propiedades físicas y mecánicas del suelo

Para establecer el comportamiento del suelo objeto de estudio se analizaron algunas de sus propiedades físicas básicas mediante ensayos de capacidad de intercambio catiónico, contenido de humedad, límites de plasticidad, granulometría por tamizado e hidrómetro, gravedad específica de los sólidos y peso unitario, además se analizó la relación humedad-densidad mediante el ensayo Proctor. También se analizaron algunas propiedades mecánicas mediante la realización de ensayos de corte directo, compresión inconfiada y se verificó su relación de soporte (CBR).

Adicionalmente, como ayuda para establecer un punto de muestreo que permita obtener muestras con la menor variabilidad posible y con las mejores características para el objeto del proyecto, se procedió a realizar un muestreo en diferentes lugares: 10 en total, en el tramo de vía seleccionado para el muestreo (ver figura 4). Al conjunto de muestras obtenido se le realizó el *ensayo de capacidad de intercambio catiónico* y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 7.

Figura 4. Muestras para ensayo de capacidad de intercambio catiónico, obtenidas a lo largo del sector para muestreo



Fuente: GIGMA, 2018.

Tabla 7. Capacidad de intercambio catiónico

Número de muestra	CIC [meq/100g suelo]
1	10,4
2	10,3
3	23,4

Número de muestra	CIC [meq/100g suelo]
4	23,3
5	29,2
6	41,7
7	27,1
8	35,9
9	31,4
10	46,1

Fuente: GIGMA, 2018.

2.4.1.1 Caracterización física

La caracterización física del suelo utilizado en la investigación, en su condición natural, se realizó mediante la determinación de su perfil de humedad natural, su peso unitario húmedo, la distribución de sus tamaños de partícula, su comportamiento plástico y se ha incluido el ensayo Proctor para establecer su comportamiento cuando es compactado. La descripción de los ensayos se realiza a continuación.

Ensayo de humedad natural. Las muestras inalteradas que se usaron para la realización del ensayo (según la norma I.N.V. E-122-13) se obtuvieron en campo mediante la realización de apiques hasta una profundidad de 1.2 m, realizando el muestreo en frascos de vidrio cada 0.2 m, como se aprecia en la figura 5.

Figura 5. Toma de muestras para contenido de agua (humedad)



Fuente: elaboración propia.

Clasificación del suelo objeto de estudio. Del material obtenido de los apiques realizados de la zona de muestreo, una vez mezclado homogéneamente y realizado

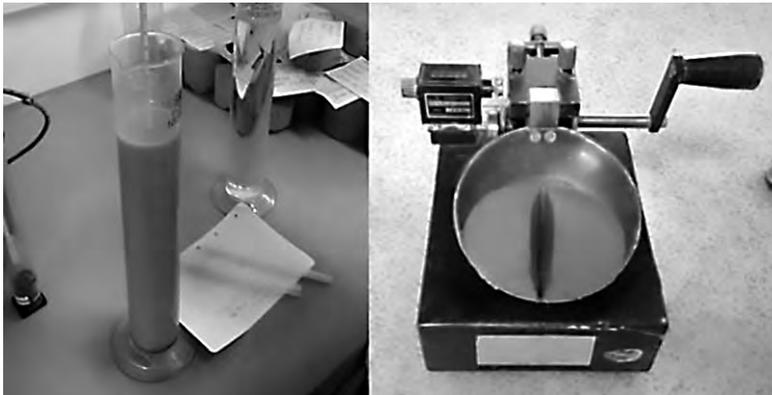
el respectivo cuarteo, se obtuvieron las muestras necesaria para los ensayos de granulometría (INV E-123), limites liquido (INV E-125) y límite plástico (INV E-126), para poder determinar la clasificación del suelo analizado según las normas INV E-180 e INV E-181. En la figura 6 se muestra la obtención de las muestras en campo y su preparación en laboratorio y en la figura 7 se aprecia la realización de algunos de los ensayos.

Figura 6. Obtención y preparación de muestras para ensayo



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Ensayos para clasificación del tipo de suelo



Fuente: elaboración propia.

Ensayo de gravedad específica. La gravedad específica o peso específico relativo de los sólidos del suelo “SS” corresponde a la relación que hay entre el peso de las partículas sólidas del suelo y su respectivo volumen (INVIAS, 2012). El procedimiento de ensayo utilizado fue el definido en la norma INV E-128. En la figura 8 se muestran los 3 especímenes ensayados en cada prueba realizada.

Figura 8. Picnómetros con muestras para ensayo de gravedad específica

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de peso unitario. Para la determinación del peso unitario del suelo se realizó la toma de bloques de muestras inalterados en campo, a estos posteriormente se les realizó el tallado de muestras más pequeñas. Se presentó la dificultad de que, por la condición de alta porosidad del suelo y la presencia de material granular, no fue posible tallar muestras de forma geométrica regular, por esto se procedió a determinar el peso unitario a muestras de forma irregular (terrones) mediante el uso de parafina y aplicando el principio de Arquímedes (Giancoli, 2006). En la figura 9 se muestra el procedimiento realizado.

Figura 9. Toma de muestras inalteradas y determinación del volumen de la muestra en ensayo de peso unitario

Fuente: elaboración propia.

Relaciones humedad-densidad (ensayo Proctor normal). Este ensayo se realizó acorde a las normas INV E-141 e INV E-142 de 2013 del INVIAS con el objeto de determinar las condiciones de máxima densidad seca y su correspondiente humedad, para las que se puede compactar el suelo. Los parámetros anteriores se

obtienen al trazar la gráfica de densidad seca contra humedad de compactación denominada “curva de compactación” (Bowles, 2006). En la figura 10 se muestra parte del procedimiento de ensayo.

Figura 10. Realización del ensayo normal de compactación



Fuente: elaboración propia.

2.4.1.2. Caracterización mecánica

La caracterización mecánica del suelo utilizado en la investigación, en su condición natural, se realizó mediante la determinación de sus dos principales parámetros mecánicos: el ángulo de fricción interna y la cohesión y su resistencia a la compresión inconfiada. En este ítem se ha incluido el ensayo CBR, se tuvo en cuenta que no corresponde a una propiedad intrínseca del suelo por depender del estado de humedad y grado de compactación que tenga con el objeto de apreciar el comportamiento de las curvas esfuerzo-deformación y, además, porque puede correlacionarse con el módulo de reacción de la subrasante (K) e incluso con el módulo resiliente (M_R) del suelo (Higuera, 2011). La descripción de los procedimientos de los ensayos se realiza a continuación.

Ensayo de corte directo. La figura 11 muestra la instalación de la muestra para ensayo en el dispositivo de corte para su posterior instalación en la máquina de ensayo. Se aplica progresivamente una carga horizontal, mientras se mantiene una presión vertical actuando sobre la muestra. La falla de la muestra se presenta por el deslizamiento de una mitad de la caja de corte respecto a la otra inducida por la fuerza horizontal aplicada (Das, 2001). Este ensayo se realizó según la norma INV E-154 y en concordancia con la norma NTC 1917. La muestra se obtuvo de un bloque de material inalterado tallado en campo como se observa en la figura 9, la carga de corte fue aplicada con una velocidad de 0.00042 mm/minuto.

Figura 11. Preparación de muestra para ensayo en el dispositivo de corte y equipo de corte directo

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de compresión inconfínada. Este ensayo se aplica a materiales de tipo cohesivo o suelos cementados que no expulsan agua durante la aplicación de la carga y que mantienen su resistencia intrínseca después de que se les ha removido el confinamiento (Olivera et al. 2015).

La figura 12 muestra el equipo utilizado en el ensayo de compresión inconfínada y la muestra tallada para ensayo, obtenida del bloque de material inalterado extraído en campo.

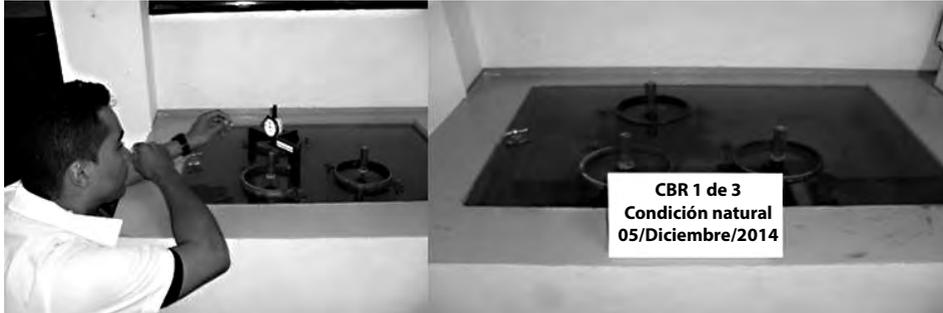
Figura 12. Máquina de compresión simple

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de capacidad de soporte (CBR). Para el desarrollo de este ensayo se utilizó el procedimiento establecido en la norma INV E-148. El valor de CBR obtenido para un suelo corresponde a la relación, expresada en porcentaje, entre el esfuerzo necesario para producir una penetración en el suelo de 2.5 mm o 5 mm y el valor

de esfuerzo patrón para esas deformaciones (Chang, 2015). Además, el ensayo de CBR se ha considerado una mediada de la resistencia de un suelo al esfuerzo cortante para unas condiciones controladas de humedad-densidad, también permite evaluar la condición del suelo para su uso como capa de una estructura de pavimentos (Sánchez, 2014). La figura 13 muestra parte del trabajo de laboratorio en la realización del ensayo.

Figura 13. Lecturas de datos de expansión y muestra sumergida lista para aplicación de cargas



Fuente: elaboración propia.

2.4.2. Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del suelo mezclado con cal

El suelo objeto de estudio se mezcló con porciones de cal en dosificaciones que van desde el 2% al 6% y se procedió a determinar las propiedades básicas que se habían determinado para el mismo suelo en condición natural y sus límites de plasticidad (líquido y plástico). Además, se analizó la relación humedad-densidad mediante el ensayo normal de compactación. Para analizar el comportamiento en cuanto a resistencia y deformación se realizaron los ensayos de corte directo, compresión inconfiada y se verificó su capacidad de soporte (CBR).

2.4.2.1. Determinación de pH

Inicialmente se hace un análisis químico del suelo al estimar el pH de las muestras, siguiendo el procedimiento descrito en la ASTM D 6276-99^a, los datos utilizados para el ensayo se describen en la tabla 8. Este procedimiento parte del hecho de que la adición de un cementante como el hidróxido de calcio es efectiva para la estabilización de un suelo en la medida en que logre mantener elevado el pH, pues esto permite el desarrollo de las reacciones puzolánicas, responsables del incremento de la resistencia mecánica a largo plazo. Para determinar el porcentaje óptimo de cal para la estabilización se han propuesto diferentes dosificaciones para

evaluar cuáles mezclas permiten alcanzar un valor lo suficientemente elevado de pH (cercano a 12,45).

Tabla 8. Relación de peso de suelo en diferentes dosificaciones de suelo-cal, para la realización del ensayo de pH según norma ASTM 6276-99^a

Dosificación (%)	Humedad	Ws (g)	Wm (g)	Vol. Agua (ml)	Peso cementante (g)	Temperatura
2	16,72%	25,0	29,18	100	0,5	26,3
4	16,72%	25,0	29,18	100	1	26,1
6	16,72%	25,0	29,18	100	1,5	25,9
8	16,72%	25,0	29,18	100	2	26,3
10	16,72%	25,0	29,18	100	2,5	26,2
12	16,72%	25,0	29,18	100	3	26,3
14	16,72%	25,0	29,18	100	3,5	26
16	16,72%	25,0	29,18	100	4	26
18	16,72%	25,0	29,18	100	4,5	25,9
20	16,72%	25,0	29,18	100	5	25,6

Fuente: GIGMA, 2018.

En la figura 14 se puede observar el procedimiento de preparación de las mezclas suelo-cementante para la determinación del ensayo de pH.

Figura 14. Realización del ensayo de pH



Fuente: GIGMA, 2018.

2.4.2.2. Caracterización física

La caracterización física del suelo utilizado en la investigación, en su condición estabilizada con cal, se realizó mediante la determinación de su comportamiento relacionado con la plasticidad mediante el ensayo de límite líquido y límite plástico y su comportamiento cuando es compactado mediante el ensayo normal de compactación. La descripción de los ensayos se realiza a continuación.

Ensayo de límites de Atterberg para la muestra estabilizada con cal. En la figura 15 se muestra parte del procedimiento que se efectuó para realizar la mezcla suelo-cal, este consistió en seleccionar por cuarteo una muestra de 200 gr a la que posteriormente se le adicionó una cantidad de cal de acuerdo al porcentaje de dosificación descrito en la tabla 9, posteriormente esta mezcla es tamizada a través del tamiz n° 40 y seguidamente se realizó el ensayo. *Es importante tener en cuenta que para la realización de cada punto del ensayo para la curva de fluidez se preparó cada muestra de forma independiente.*

Figura 15. Proceso de mezclado suelo y el material cementante: cal



Fuente: GIGMA, 2018.

Tabla 9. Relación de peso suelo–cementante: cal, para ensayos de límites de Atterberg

Descripción	Peso muestra seca (g)	Porcentaje de Cal respecto a peso seco muestra	Peso cemento: cal (g)	Peso total muestra (g)
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cal	200	2	4	204
		3	6	206
		4	8	208
		5	10	210
		6	12	212

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de normal de compactación (proctor estándar). El material utilizado en este ensayo fue obtenido mediante cuarteo y posteriormente tamizado a través de la malla n° 4. Se tomaron 6000 gr de muestra para luego ser mezclado con la cantidad de cal descrita en la tabla 10, para peo y ppe de la mall59 (l)a4 (e t)6 (o)12 (m)3 (a)9 (respecto a peso

seco muestra-	Peso total	
tante: cal (g)	muestra (g)	6000
	lloro color	
	manón	
	mezclado	
	con cal	

natural también se analiza el comportamiento de la mezcla suelo-cementante mediante el ensayo CBR.

Ensayo de corte directo. La determinación de los parámetros de resistencia al corte de la mezcla suelo-cal requirió que se adicionara la variable tiempo de curado en el ensayo. Las muestras fueron talladas de un espécimen que fue elaborado mediante la compactación de la mezcla suelo-cemento en un molde de 6" con un procedimiento similar al del Proctor estándar método B. En la tabla 11 se muestra la cantidad de material utilizado para preparar la mezcla a compactar. Posterior a la compactación se realizaba la extracción del cilindro de material del molde (ver figura 17) y este era envuelto en papel humedecido y llevado a condiciones de humedad controlada hasta completar los periodos de curado de 7, 14 y 28 días.

Una vez culminado el tiempo de curado un día anterior a la fecha de ensayo, se realizaba el tallado de tres muestras (galletas) del espécimen de material compactado para el ensayo, como se indica en la figura 18. Las muestras fueron ensayadas en la máquina de corte directo bajo esfuerzos normales de 5, 10 y 40 kPa. Las muestras fueron preparadas según el cronograma mostrado en las tablas 12, 13 y 14.

Tabla 11. Relación de peso suelo-material cementante: cal, para montaje de especímenes compactados para tallado de muestras

Descripción	Peso muestra seca (g)	Porcentaje de Cal respecto a peso seco muestra	Peso cemento: cal (g)	Peso total muestra (g)
Suelo limo-Arcilloso color marrón naranja mezclado con cal	5000	2	100	5100
		3	150	5150
		4	200	5200
		5	250	5250
		6	300	5300

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12. Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 7 días

Descripción	Porcentaje de Cal respecto a peso seco muestra	Cantidad de probetas	Fecha de elaboración espécimen	Fecha tallado muestra	Fecha ensayo muestra
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cal	2	1	18 marzo 2015	24-03-2015	25-03-2105
	3	1	19 marzo 2015	25-03-2015	26-03-2105
	4	1	20 marzo 2015	26-03-2015	27-03-2015
	5	1	9 abril 2015	15-03-2015	16-04-2015
	6	1	10 abril 2015	16-03-2015	17-04-2015

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 14 días

Descripción	Porcentaje de Cal respecto a peso seco muestra	Cantidad de probetas	Fecha de elaboración espécimen	Fecha tallado muestra	Fecha ensayo muestra
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cal	2	1	24 marzo 2015	6-04-2015	7-04-2015
	3	1	25 marzo 015	7-04-2015	8-04-2015
	4	1	26 marzo 2015	8-04-2015	9-04-2015
	5	1	27 marzo 2015	9-04-2015	10-04-2015
	6	1	9 abril 2015	22-04-2015	23-04-2015

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 28 días

Descripción	Porcentaje de Cal respecto a peso seco muestra	Cantidad de probetas	Fecha de elaboración espécimen	Fecha tallado muestra	Fecha ensayo muestra
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cal	2	1	18-Marzo-2015	14-04-2015	15-04-2015
	3	1	19-Marzo-2015	15-04-2015	16-04-2015
	4	1	20-Marzo-2015	16-04-2015	17-04-2015
	5	1	24-Marzo-2015	20-04-2015	21-04-2015
	6	1	25-Marzo-2015	21-04-2015	22-04-2015

Fuente: elaboración propia.

Figura 17. Extracción de espécimen compactado y listo para iniciar proceso de curado



Fuente: elaboración propia.

Figura 18. Tallado de Muestra a partir de espécimen compactado y muestra lista para ensayo



Fuente: elaboración propia.

Ensayo de compresión inconfnada. Esta prueba se realizó sobre muestras talladas de especímenes cilíndricos obtenidos de la compactación de mezclas suelo-cal en forma similar al procedimiento realizado para obtener las muestras para ensayo de corte directo, ver Tablas 12, 13, 14 y 15. En la figura 19 se aprecia el procedimiento de tallado de una muestra y el montaje para ensayo.

Figura 19. Tallado de muestras para ensayar

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de capacidad de soporte (CBR de laboratorio). En la tabla 15 se indican las cantidades de suelo y cal para la preparación de las muestras de ensayo. En cada ensayo se compactó el material en capas con 10, 25 y 56 golpes y se sumergieron en agua durante cuatro días, en este periodo se tomaron lecturas con el deformímetro para establecer el porcentaje de expansión, cumplido el periodo de sumersión se procedió a su ensayo en la maquina multiusos. En la figura 20 y figura 21 se muestran algunos de los procedimientos realizados para el ensayo.

Tabla 15. Relación de peso suelo-material cementante: cal, para ensayo de CBR

Descripción	Peso muestra seca (g)	Porcentaje de Cal respecto a peso seco muestra	Peso cemen-tante: cal (g)	Peso total muestra (g)
Suelo limo-arcillo- so color marrón naranja mezclado con cal	12000	2	240	12240
		3	360	12360
		4	480	12480
		5	600	12600
		6	720	12720

Fuente: elaboración propia.

Figura 20. Preparación de mezcla suelo-cal y de muestras para ensayo

Fuente: elaboración propia.

Figura 21. Muestras sumergidas para lectura de expansión y muestra lista para ensayo



Fuente: elaboración propia.

2.4.3. Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del suelo mezclado con cemento

El suelo objeto de estudio se mezcló con porciones de cemento en dosificaciones que van desde el 2 al 16% de cemento respecto al peso seco del suelo, también se procedió a determinar las propiedades de plasticidad: límite líquido y límite plástico y, además, se analizó la relación humedad-densidad mediante el ensayo normal de compactación. Para analizar el comportamiento en cuanto a resistencia-deformación se realizaron ensayos de corte directo, compresión inconfiada y se verificó su capacidad de soporte (CBR). Se realizaron mezclas desde 8% a 16% para verificar no solo comportamiento en cuanto a incidencia en la plasticidad sino también en cuanto a resistencia.

2.4.3.1. Determinación de PH

Se realiza el mismo procedimiento que se desarrolló con las mezclas de suelo-cal para las mezclas con cemento. La tabla 16 describe la relación y cantidad de material empleado para el ensayo.

Tabla 16. Relación de peso de suelo en diferentes dosificaciones de suelo-cemento, para la realización del ensayo de pH según norma ASTM 6276-99^a

Porcentaje de cemento	Humedad	Ws (g)	Wm (g)	Vol. Agua (ml)	Peso Cementante (g)	Dosificación	Temperatura
2	16,72%	25,0	29,18	100	0,5	2	25,5
4	16,72%	25,0	29,18	100	1	4	25,7
6	16,72%	25,0	29,18	100	1,5	6	25,5
8	16,72%	25,0	29,18	100	2	8	25,5
10	16,72%	25,0	29,18	100	2,5	10	25,3
12	16,72%	25,0	29,18	100	3	12	25,2
14	16,72%	25,0	29,18	100	3,5	14	25,1
16	16,72%	25,0	29,18	100	4	16	25,1
18	16,72%	25,0	29,18	100	4,5	18	25,0
20	16,72%	25,0	29,18	100	5	20	24,9

Fuente: GIGMA, 2018

2.4.3.2. Caracterización física

La caracterización física del suelo utilizado en la investigación, en su condición estabilizada con cemento, se realizó de manera similar que para el caso de la mezcla suelo-cal, determinándose su comportamiento relacionado con la plasticidad mediante el ensayo de límite líquido y límite plástico y su comportamiento cuando es compactado mediante el ensayo normal de compactación.

Ensayo de Límites de Atterberg para la muestra estabilizada con cemento. En la figura 22 se muestra parte del procedimiento que se efectuó para realizar la mezcla suelo-cemento, este ha sido seleccionado por el cuarteo de una muestra de 200 gr a la que posteriormente se le adicionó una cantidad de cemento de acuerdo con el porcentaje de dosificación descrito en la tabla 17, posteriormente esta mezcla se tamizó en tamiz n° 40 y se preparó de forma separada para cada punto requerido para elaborar la curva de fluidez.

Tabla 17. Relación de peso suelo-material cementante: cemento, para los ensayos de Límites de Atterberg

Descripción	Peso muestra seca (g)	Porcentaje de Cal respecto a peso seco muestra	Peso cementante: cemento (g)	Peso total muestra (g)
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cemento	200	2	4	204
		3	6	206
		4	8	208
		5	10	210
		6	12	212
		8	16	216
		10	20	220
		12	24	224
		14	28	228
		16	32	232

Fuente: elaboración propia.

Figura 22. Proceso de mezclado del suelo y el material cementante: cemento portland para ensayo de límites de plasticidad



Fuente: GIGMA, 2018.

Ensayo de normal de compactación (Proctor estándar). El material utilizado en este ensayo fue obtenido mediante cuarteo y posteriormente tamizado a través de la malla n° 4. Se tomaron 6000 gr de muestra para luego mezclarlas con la cantidad de cal descrita en la tabla 18 según la dosificación. Esto se hizo para posteriormente realizar las adiciones de humedad y, así, obtener los puntos necesarios para trazar la curva de compactación. Cada punto de ensayo se preparó de forma separada para que el tiempo entre cada uno no interfiriera en los resultados, por la reacción del agua con el cemento, ver figura 23.

Figura 23. Proceso de mezclado y compactación



Fuente: GIGMA, 2018.

Tabla 18. Relación de peso suelo-material cementante: cemento, para ensayo normal de compactación

Descripción	Peso muestra seca (g)	Ensayo No	% Cemento respecto a peso seco muestra	Peso cemento (g)
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cemento	6000	2	120	6120
		3	180	6180
		4	240	6240
		5	300	6300
		6	360	6360
		8	480	6480
		10	600	6600
		12	720	6720
		14	840	6840
		16	960	6960

Fuente: elaboración propia.

2.4.3.3. Caracterización mecánica

El análisis del comportamiento mecánico del suelo utilizado en la investigación, en su condición estabilizada con cemento, se realizó de manera similar a la mezcla suelo-cal, esto permitió determinar el ángulo de fricción interna y la cohesión en el ensayo de corte directo y su resistencia a la compresión confinada. Adicionalmente se analiza el comportamiento de la mezcla suelo-cementante mediante el ensayo CBR.

Ensayo de corte directo. Para la determinación de los parámetros de resistencia al corte de la mezcla suelo-cemento se procedió de manera similar al caso de la

mezcla suelo-cal, tanto para la preparación de las muestras como para su ensayo. En la tabla 19 se muestra la cantidad de material utilizado para preparar los especímenes a compactar, para su curado y posterior tallado de muestras para ensayo. Los especímenes fueron preparados según el cronograma mostrado en las tablas 20, 21 y 22. En la figura 24 y figura 25 se muestra el procedimiento de mezclado, elaboración y protección de espécimen para el proceso de curado e inicio del proceso de tallado de muestra para ensayo.

Tabla 19. Relación de peso suelo-material cementante: cemento, para montaje de especímenes compactados para tallado de muestras

Descripción	Peso muestra seca (g)	Porcentaje cemento respecto a peso seco muestra	Peso cemento (g)	Peso total muestra (g)
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cemento	6000	2	120	6120
		3	180	6180
		4	240	6240
		5	300	6300
		6	360	6360
		8	480	6480
		10	600	6600
		12	720	6720
		14	840	6840
		16	960	6960

Fuente: elaboración propia.

Tabla 20. Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 7 días

Descripción	% Cemento respecto a peso seco muestra	Cantidad de probetas	Fecha de elaboración espécimen	Fecha tallado muestra	Fecha ensayo muestra
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cemento	2	1	13-04-2015	19-04-2015	20-04-2015
	3	1	14-04-2015	20-04-2015	21-04-2015
	4	1	15-04-2015	21-04-2015	22-04-2015
	5	1	12-05-2015	18-05-2015	19-05-2015
	6	1	13-05-2015	19-05-2015	20-05-2015
	8	1	14-05-2015	20-05-2015	21-05-2015
	10	1	15-05-2015	21-05-2015	22-05-2015
	12	1	13-05-2015	19-05-2015	20-05-2015
	14	1	14-05-2015	20-05-2015	21-05-2015
		1	15-05-2015	21-05-2015	22-05-2015

Fuente: elaboración propia.

Tabla 21. Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 14 días

Descripción	Porcentaje cemento respecto a peso seco muestra	Cantidad de probetas	Fecha de elaboración espécimen	Fecha tallado muestra	Fecha ensayo muestra
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cemento	2	1	10-04-2015	23-04-2015	24-04-2015
	3	1	13-04-2015	26-04-2015	27-04-2015
	4	1	14-04-2015	27-04-2015	28-04-2015
	5	1	15-04-2015	28-04-2015	29-04-2015
	6	1	16-04-2015	29-04-2015	30-04-2015
	8	1	20-04-2015	3-05-2015	4-05-2015
	10	1	21-04-2015	4-05-2015	5-05-2015
	12	1	22-04-2015	5-05-2015	6-05-2015
	14	1	23-04-2015	6-05-2015	7-05-2015
	16	1	24-04-2015	7-05-2015	8-05-2015

Fuente: elaboración propia.

Tabla 22. Cronograma para elaboración de especímenes compactado para tallado de muestras y ensayo a 28 días

Descripción	Porcentaje cemento respecto a peso seco muestra	Cantidad de probetas	Fecha de elaboración espécimen	Fecha tallado muestra	Fecha ensayo muestra
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja mezclado con cemento	2	1	26-03-2015	22-03-2015	23-04-2015
	3	1	27-03-2015	23-04-2015	24-04-2015
	4	1	7-04-2015	4-05-2015	5-05-2015
	5	1	8-04-2015	5-05-2015	6-05-2015
	6	1	9-04-2015	6-05-2015	7-05-2015
	8	1	10-04-2015	7-05-2015	8-05-2015
	10	1	14-04-2015	11-05-2015	12-05-2015
	12	1	15-04-2015	12-05-2015	13-05-2015
	14	1	16-04-2015	13-05-2015	14-05-2015
	16	1	17-04-2015	14-05-2015	15-05-2015

Fuente: elaboración propia.

Figura 24. Preparación de mezcla y espécimen listo para proceso de curado

Fuente: elaboración propia.

Figura 25. Protección de espécimen para proceso de curado y posterior tallado de muestra para ensayo

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de compresión inconfnada. Esta prueba se realizó sobre muestras talladas de especímenes cilíndricos obtenidos de la compactación de mezclas suelo-cemento en forma similar al procedimiento realizado para obtener las muestras para ensayo de corte directo. La cantidad de material requerido para cada mezcla suelo-cemento para preparación de los especímenes de curado y fechas de posterior tallado de estos para la obtención de las muestras a ensayar. Este proceso se puede apreciar en las tablas 11, 12, 13 y 14. En la figura 26 se aprecia el procedimiento de tallado de una muestra y el montaje para ensayo.

Figura 26. Tallado de muestra a partir del espécimen y posterior ensayo de esta

Fuente: elaboración propia.

Ensayo de capacidad de soporte (CBR de laboratorio). Con un procedimiento similar a las mezclas suelo-cal se prepararon las muestras para ensayo según las cantidades de materiales mostradas en la tabla 23, compactando cada probeta en capas con 10, 25 y 56 golpes, y se mantuvieron por un periodo de 4 días sumergidas en agua antes de ensayo. En la figura 27 se muestran algunos de los procedimientos realizados para el ensayo.

Tabla 23. Relación de peso suelo-material cementante: cemento, para ensayo de CBR

Descripción	Peso muestra seca (g)	Porcentaje de cemento respecto a peso seco muestra	Peso cemento (g)	Peso total muestra (g)
Suelo limo-Arcilloso color marrón naranja mezclado con cemento.	12000	2	240	12240
		3	360	12360
		4	480	12480
		5	600	12600
		6	720	12720
		8	960	12960
		10	1200	13200
		12	1440	13440
		14	1680	13680
		16	1920	13920

Fuente: elaboración propia.

Figura 27. Toma de lecturas y aplicación de carga durante el ensayo CBR



Fuente: elaboración propia.

2.4.4. Análisis de imagen microscópica electrónica de barrido

El microscopio electrónico de barrido utiliza electrones en lugar de luz para formar una imagen, para esto el equipo cuenta con un filamento que genera un haz de electrones para iluminar la muestra y con diferentes detectores se recogen después los electrones generados de la interacción con su superficie para crear una imagen que refleja las características superficiales, esto proporciona información de las formas, texturas y composición química de sus componentes.

El microscopio electrónico de barrido es un equipo que da un rango de información de la muestra que se está analizando cuando el haz de electrones pasa sobre esta y produce diversos efectos que son captados y visualizados en función del equipo que se utilice.

Las muestras se colocaron sobre *stubs* metálicos con cinta adhesiva de carbón y se recubrieron con grafito en un equipo de recubrimiento Quorum 150ES como se aprecia en la figura 28. Una vez preparadas las muestras en estado natural con 6% de cemento y con 6% de cal se realizaron las micrografías SEM para diferentes magnificaciones. Para la toma de las imágenes fue utilizado microscopio electrónico de barrido FEG (*Field Emission Gun*) QUANTA FEG 650 y los siguientes detectores:

Figura 28. Preparación de muestras para el ensayo electrónico de barrido

Fuente: GIGMA, 2018.

Detector de electrones secundarios (SE): este detector ofrece la morfología de la muestra y, por ello, se obtiene una imagen de mayor resolución.

Detector de electrones retrodispersados (BSE): ofrece una imagen de superficie, aunque de menor resolución. Su ventaja es la sensibilidad a las variaciones en el número atómico de los elementos presentes en la superficie, es decir, si se tiene una superficie totalmente lisa, se pueden observar distintos tonos de gris en función de los diferentes elementos.

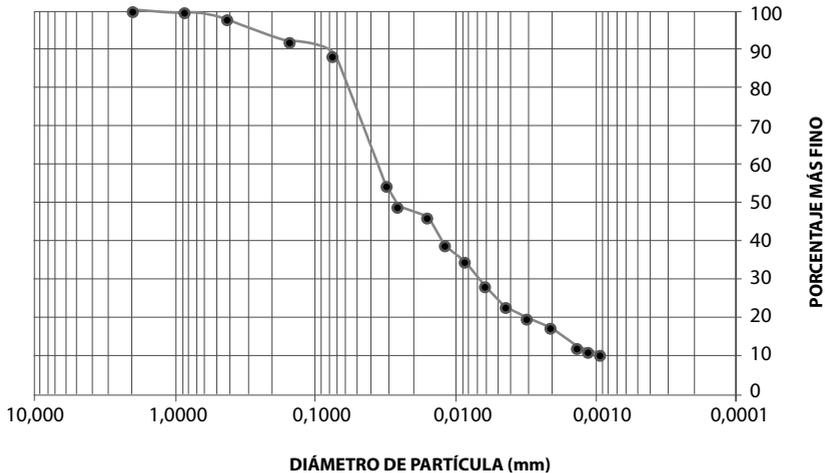
Una vez realizado el programa de ensayos tanto para el material en su *condición natural* como cuando estuvo *mezclado con cementantes hidráulicos* como la cal y el cemento portland, se procedió a tabular la información obtenida. Los principales resultados obtenidos de la investigación se detallan a continuación.

Tabla 24. Datos obtenidos de los ensayos de clasificación

Descripción	% Arenas	% Finos	% Arcillas	% Limos	L.L (%)	L.P (%)	I.P (%)	LC (%)	Clasificación	
									SUCS	AASTHO
Suelo limo-arcilloso color marrón naranja	11,95	88,05	16,48	71,57	61.70	44.90	16.78	33.62	MH	A-7-5(25)

Fuente: elaboración propia.

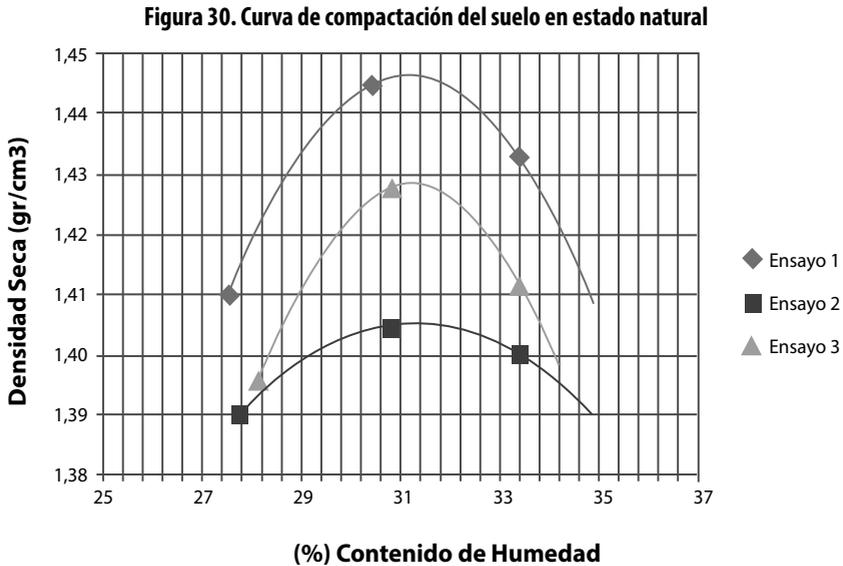
Gravedad específica. Se obtuvo un valor medio de 2.784. Los valores comunes de gravedad específica para minerales de arcilla son: 2.75 a 2.78 para montmorillonitas, 2.60 a 2.86 para Illita y 2.62 a 2.66 para caolinita. El resultado obtenido para el suelo utilizado en la investigación indica que, según los valores anteriores, contiene minerales de illita o montmorillonita.

Figura 29. Distribución de tamaños de grano del suelo

Fuente: elaboración propia.

Peso unitario. De los diferentes ensayos realizados a las muestras de forma irregular obtenidas de los bloques de material inalterado, se obtuvo un valor promedio de 1.382 g/cm³. Este es un valor relativamente bajo que normalmente corresponde a suelo con contenido de materia orgánica. Sin embargo, en este caso el suelo no presenta tal tipo de material, entonces se considera que el valor se debe a la presencia de alta porosidad que presenta el suelo en estado natural. *Es una recomendación de esta investigación que se analice con más detalle el suelo teniendo en cuenta que los valores de peso unitario y gravedad específica son típicos de un suelo originado a partir de material relacionado con cenizas volcánicas.*

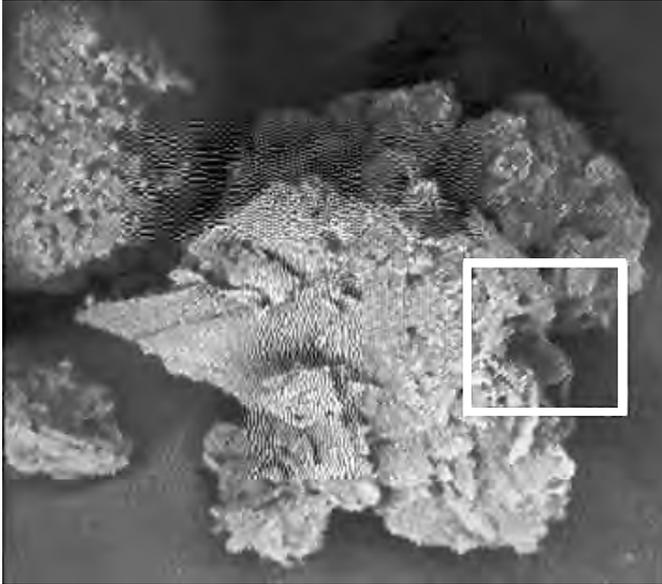
Relaciones humedad – densidad (ensayo Proctor normal). La figura 30 muestra los resultados obtenidos en los tres ensayos realizados. Se observa que incluso cuando se mantiene el valor de humedad óptima de 31,03%, no ocurre lo mismo para los valores de densidad seca máxima. Esto podría indicar algún nivel de *sensitividad* del material. Se estableció un valor promedio para la densidad seca máxima de 1.427 g/cm³.



Fuente: elaboración propia.

Micrografía del suelo. La figura 31 muestra una ampliación de las partículas que integran la masa de suelo a una escala de 20 μm , en el lado derecho del recuadro señalado se aprecia que la morfología fibrosa de los minerales de illita estaría en desacuerdo con los valores de gravedad típicos de este tipo de materiales.

Figura 31. Curva de compactación del suelo en estado natural



Fuente: GIGMA, 2018.

3.1.2. Resultados de la caracterización mecánica del suelo en condición natural

Una vez realizados los ensayos de corte directo y de compresión inconfiada sobre las muestras inalteradas, se obtuvieron los valores del ángulo de fricción interna y cohesión del suelo y su resistencia a la compresión inconfiada. Adicionalmente se analizó la capacidad de soporte del suelo que, como se mencionó anteriormente, no corresponde a una propiedad intrínseca del suelo porque depende del grado de compactación y humedad que este tenga.

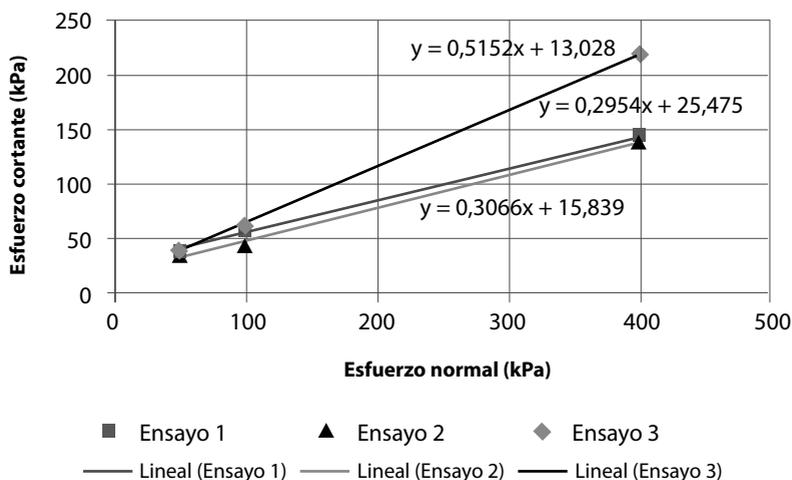
Corte directo. Para las muestras inalteradas de suelo se realizaron 3 ensayos de corte directo y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 25. Para esta propiedad también se encontró variabilidad entre un ensayo y otro incluso cuando se repitieron los ensayos varias veces. En la figura 32 se aprecian las envolventes de falla para los 3 ensayos realizados, estas se podrían usar para calcular un valor medio de “ ϕ ” y “ c ”

Tabla 25. Resultados del ensayo de corte directo

Ensayo No.	ϕ (°)	Cohesión (kPa)
1	16.457	25.475
2	17.046	15.839
3	27.258	13.028

Fuente: elaboración propia.

Figura 32. Envolventes de falla para los 3 ensayos de corte directo realizados



Fuente: elaboración propia.

Compresión inconfiada. En la tabla 26 se muestran los datos obtenidos de los ensayos de compresión inconfiada realizada a los especímenes ensayados. El tipo de falla que arrojó la probeta 1 se presenta en forma de grietas verticales que evidencian falla frágil en el suelo. Para las probetas 2 y 3 también se presenta rotura frágil por corte, como se muestra en la figura 33.

Tabla 26. Resultados del ensayo de resistencia a la compresión no confinada

Ensayo	RCU (kPa)
1	128.330
2	132.034
3	146.456

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. Resultados del análisis químico del suelo: capacidad de intercambio catiónico

Cuando se agrega algún agente estabilizador como la cal a un suelo arcilloso, este tiene un efecto inmediato sobre las propiedades del suelo a medida que el intercambio de cationes se desarrolla entre los iones metálicos asociados con la superficie de las partículas de arcilla y los iones de calcio de la cal. Como ya se ha mencionado las partículas de arcilla están rodeadas por una doble capa difusa que se modifica con el intercambio iónico del calcio. Este proceso altera la densidad de la carga eléctrica alrededor de las partículas de arcilla, haciendo que se atraigan más cerca unas de otras para formar flóculos, en un proceso denominado floculación. Este es el responsable de la modificación de las propiedades como resistencia y plasticidad (Sherwood, 1993)

La naturaleza del catión intercambiable no es tan significativa en suelos arcillosos caoliníticos, pero si es de gran relevancia en suelos que contienen montmorillonita, pues las arcillas de tipo expansivo reaccionan con facilidad con la cal, reduciendo la plasticidad de forma inmediata (Bell y Coulthard, 1990). Entonces, entre mayor sea la capacidad de intercambio del suelo, más efectiva será el proceso de estabilización. Dicho esto, a partir del análisis químico realizado al suelo en su condición natural, se determinó la capacidad de intercambio catiónico de diferentes muestras de suelo en un determinado sector de vía donde se presenta el material utilizado para el desarrollo de la investigación, de modo que se puede establecer el punto específico con el material adecuado para la toma de muestras.

Los datos indican que las muestras 6 y 10 son las que tiene una mayor capacidad de intercambio catiónico, por ello, son las muestras con mayor presencia de minerales arcillosos, específicamente la 10 dio el mayor valor, por eso los ensayos se desarrollaron con este material.

3.2. Análisis del comportamiento del suelo con adición de cal

Los parámetros que fueron evaluados a la mezcla de suelo con cal en las diferentes dosificaciones analizadas, se limitaron a sus propiedades de plasticidad: límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad; y a algunos parámetros mecánicas: ángulo de fricción interna, cohesión y resistencia a la compresión confinada. Adicionalmente se incluyó el comportamiento relacionado con la prueba normal de compactación y la capacidad de soporte (ensayo CBR). Las dosificaciones analizadas fueron del 2%, 3%, 4%, 5% y 6%. Se estudiaron estas dosificaciones para ver la incidencia en las condiciones de plasticidad, compactación, parámetros de resistencia y CBR.

3.2.1. Variación del límite líquido y plástico e índice de plasticidad

En la tabla 29 se resumen los valores obtenidos en los ensayos de límites de plasticidad para la mezcla suelo-cal en las diferentes dosificaciones usadas del cementante.

Tabla 29. Resultados de los ensayos de límites de plasticidad para la mezcla suelo-cal en sus diferentes dosificaciones

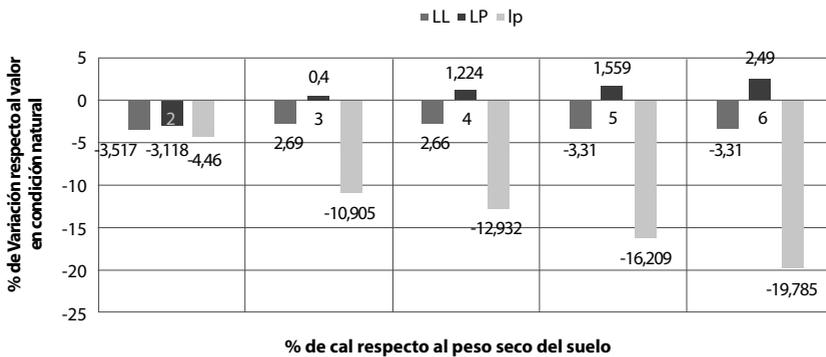
Límites de plasticidad	Suelo en condición natural	% de cal adicionado respecto al peso seco del suelo				
		2	3	4	5	6
LL (%)	61,7	59,53	60,04	60,06	59,66	59,66
LP (%)	44,90	43,5	45,08	45,45	45,6	46,02
IP (%)	16,78	16,03	14,95	14,61	14,06	13,46

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados obtenidos en todos los porcentajes analizados, la adición de cal tiene un efecto directo en la plasticidad del suelo, esto hace que se disminuya de forma considerable el índice de plasticidad al aumentar el límite plástico y reducir el límite líquido.

En la figura 34 se presentan los diferentes porcentajes de variación de los límites líquido, plástico e índice de plasticidad comparados con los valores obtenidos para el suelo en su condición natural. Además, se indica con valores negativos cuando se presenta una disminución y positivos cuando ocurre un aumento respecto al valor en condición natural.

Figura 34. Variación, en porcentaje, de la plasticidad al comparar las mezclas suelo-cal con la condición natural del suelo



Fuente: elaboración propia.

3.2.2. Variación de las relaciones humedad-densidad (ensayo Proctor normal)

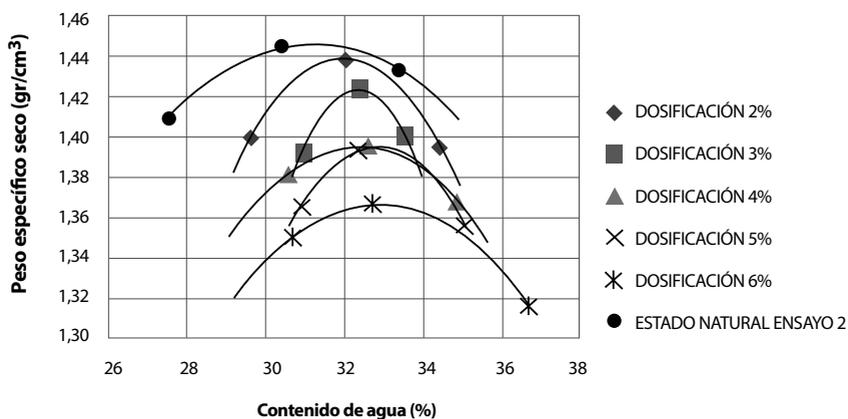
En la Tabla 30 se muestran los resultados del ensayo normal de compactación (Proctor) para los diferentes porcentajes de cal que se adicionaron al suelo y en la figura 35 se muestran las curvas de compactación correspondientes. Se puede observar que, al aumentar el porcentaje de cal que se adiciona, aumenta el contenido de humedad óptimo y disminuye, en valores similares, el valor de la densidad seca máxima.

Tabla 30. Valores obtenidos de la curva de compactación normal para la mezcla suelo-cal en sus diferentes dosificaciones

Porcentaje de Cal adicionado	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	CHO (%)
2	1,438	32,04%
3	1,424	32,40%
4	1,396	32,60%
5	1,396	32,80%
6	1,368	32,80%
Valores promedio en condición natural	1,427	31,03%

Fuente: elaboración propia.

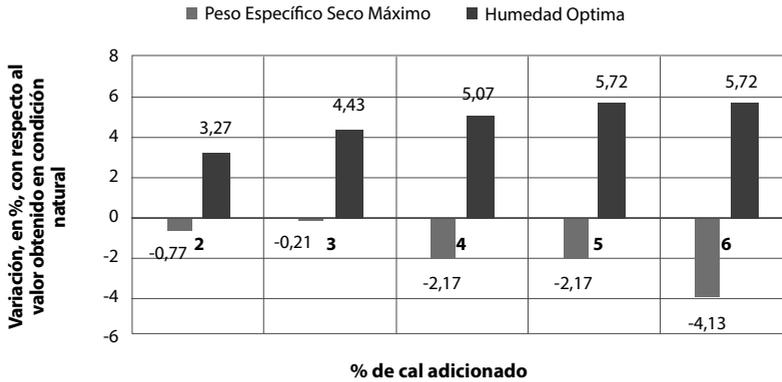
Figura 35. Resultados para el ensayo normal de compactación en la mezcla suelo-cal en sus diferentes dosificaciones



Fuente: elaboración propia.

En la figura 36 se muestra la variación porcentual para el CHO y la densidad seca máxima obtenida al comparar los resultados para los diferentes porcentajes adicionados de cal al suelo, con los valores obtenidos para este en su condición natural, en cada caso se indica si se produce aumento (positivo) o disminución (negativo).

Figura 36. Variación de la densidad seca máxima y el CHO al comparar las mezclas suelo-cal con la condición natural del suelo



Fuente: elaboración propia.

3.2.3. Variación del ángulo de fricción y la cohesión (ensayo de corte directo)

Se analizó la variación en la cohesión obtenida del ensayo de corte directo para las cinco dosificaciones de mezcla suelo-cal, teniendo en cuenta tiempos de curado de 7, 14 y 28 días. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 31.

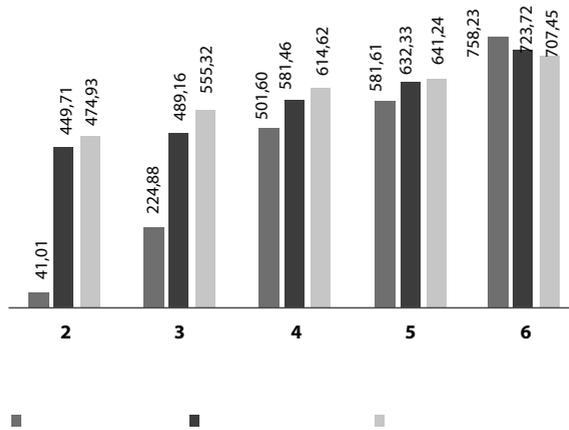
Tabla 31. Valores de cohesión, en kPa, obtenidos para las mezclas suelo-cal con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días

Tiempo de curado	% de cal adicionada por peso seco del suelo					
	Condición natural	2	3	4	5	6
7 días	20,66	29,133	67,12	124,29	140,82	177,31
14 días	20,66	113,57	121,72	140,79	151,30	170,18
28 días	20,66	118,78	135,39	147,64	153,14	166,82

Fuente: elaboración propia.

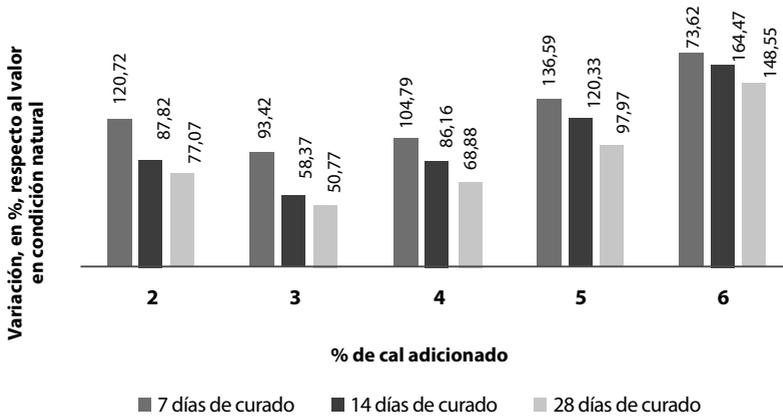
En la figura 37 se puede observar el comportamiento de la cohesión en las diferentes dosificaciones para la mezcla suelo-cal y, según los tiempos de curado, se aprecia un aumento significativo de la cohesión para todas las dosificaciones. Sobre la incidencia del tiempo curado se puede decir que esta no es muy marcada, a excepción de las dosificaciones del 2% y 3%. Además, se observa que para dosificación del 6% se marca una tendencia a disminuir la cohesión con respecto al tiempo de curado.

Figura 37. Variación, en porcentaje, de la cohesión para las mezclas suelo-cal, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural



En la figura 38 se puede observar el comportamiento del ángulo de fricción en las diferentes dosificaciones para la mezcla suelo-cal y, según los tiempos de curado, se aprecia un aumento considerable del valor obtenido para las mezclas suelo-cal en relación con el valor obtenido en estado natural. Se puede apreciar que el aumento es decreciente para dosificaciones de 2% y 3% y creciente para las dosificaciones entre 4% y 6%. Además, se aprecia una incidencia del tiempo curado que hace que el ángulo de fricción disminuya con relación a este.

Figura 38. Variación, en porcentaje, del ángulo de fricción para las mezclas suelo-cal, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural



Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Compresión incon nada

Los resultados del comportamiento de las probetas de mezcla suelo-cal para las diferentes dosificaciones y los distintos tiempos de curado se muestran en la tabla 33.

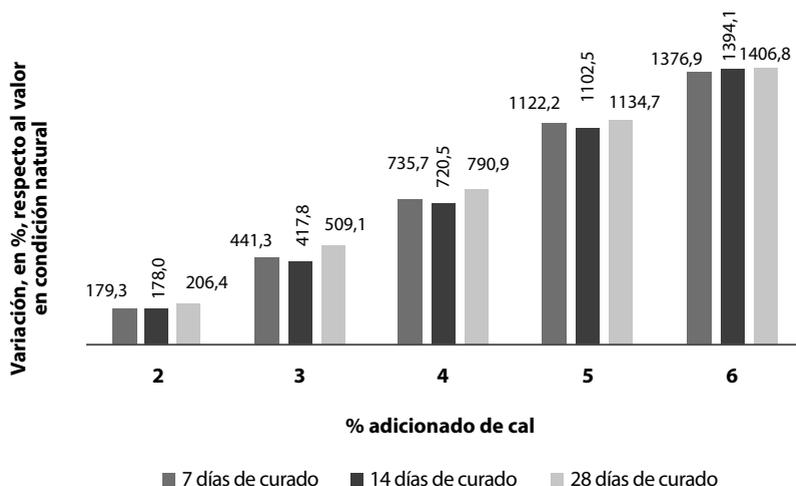
Tabla 33. Valores de RCU, en kPa, obtenidos para las mezclas suelo-cal con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días

Tiempo de curado	% de cal adicionada por peso seco del suelo					
	Condición natural	2	3	4	5	6
7 días	135,61	378,74	734,09	1133,23	1657,38	2002,89
14 días	135,61	377,00	702,24	1112,63	1630,73	2026,13
28 días	135,61	415,45	826,03	1208,10	1674,41	2043,42

Fuente: elaboración propia.

En la figura 39 se puede observar la variación en la resistencia a la compresión inconfiada con respecto al porcentaje de cal utilizada en la mezcla y al tiempo de curado. La mejora en la RCU con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural es muy significativa, pues alcanza aumentos hasta del 1400% cuando se adiciona un 6% de cal a la mezcla. En relación con el tiempo de curado, su influencia no es muy marcada, pues se observan valores en el mismo rango para cada dosificación analizada.

Figura 39. Variación, en porcentaje, de la RCU para las mezclas suelo-cal, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural



Fuente: elaboración propia.

3.2.5. Variación de la capacidad de soporte (ensayo CBR de laboratorio)

En la Tabla 34 encontramos la capacidad de soporte CBR del suelo en estado natural y luego de las dosificaciones de suelo-cal.

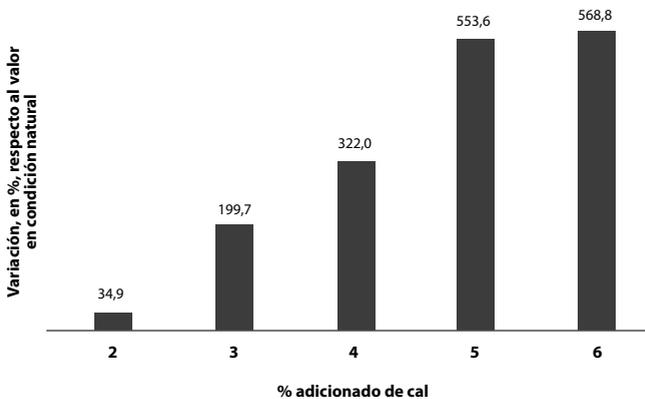
Tabla 34. Valores de capacidad de soporte (CBR) obtenidos para la mezcla suelo-cal en las diferentes dosificaciones analizadas

Porcentaje de Cal adicionado	CBR (%)
2	9.13
3	20.29
4	28.57
5	44.25
6	45.28
Valor promedio estado natural γ_{dmax}	6.77

Fuente: elaboración propia.

En la figura 40 se muestra la variación, en porcentaje, de la capacidad de soporte (CBR) con respecto al porcentaje de cal utilizado en la mezcla. Esta variación se determina con respecto al valor de CBR promedio obtenido para el suelo en condición natural. Se aprecia que la capacidad de soporte mejora considerablemente cuando se alcanzan aumentos hasta del 568% con la adición de 6% de cal en la mezcla.

Figura 40. Variación, en porcentaje, de la capacidad de soporte (CBR) para las mezclas suelo-cal, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural



Fuente: elaboración propia.

3.2.6. Variación del porcentaje de pH en la muestras de cal

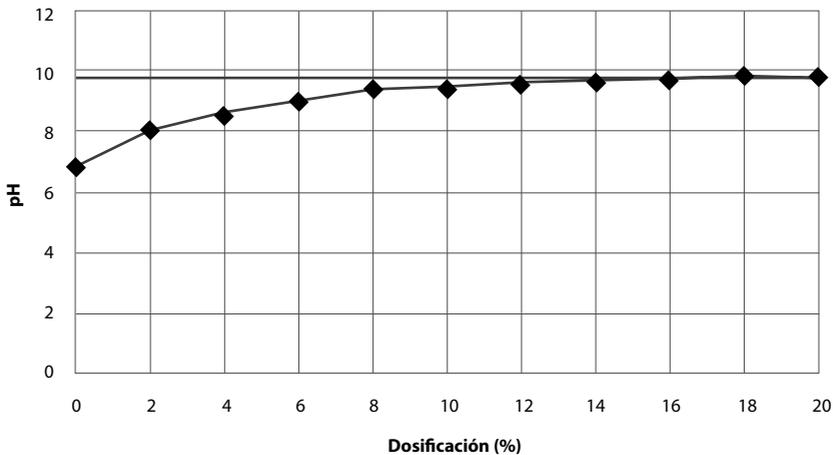
Cuando la cal se agrega al suelo, primero debe satisfacer la afinidad del suelo por la cal. Es decir, como los iones son adsorbidos por los minerales de arcilla, no están disponibles para las reacciones puzolánicas hasta satisfacer el estado de

afinidad. Estas corresponden al punto de fijación (Hilt y Davidson, 1960) donde la cal no produce más cambios en el límite de plasticidad. En general este valor está entre el 1 y 3 % de la cal agregada, más allá de este valor la cal está disponible para incrementar la resistencia del suelo.

Además del intercambio de cationes, se produce una reacción entre la sílice y la alúmina de las celosías de los minerales arcillosos, especialmente en los bordes de las partículas de arcilla. En otras palabras, el ambiente altamente alcalino producido por la adición de cal da lugar a la solución lenta de aluminosilicatos que luego se precipitan como productos de reacción cementosos hidratados (Diamond y Kinter, 1966) que además contribuyen a la floculación al unir partículas adyacentes al suelo. Estos, que al producirse el proceso de curado, incrementan la resistencia.

Para una reactividad máxima, el valor del pH del suelo debe permanecer alrededor de 12,4 la solubilidad de los iones de silicio y aluminio, así, los silicatos de calcio se formarán mientras persistan las condiciones de alta alcalinidad. La figura 41 muestra la curva de variación de los valores de pH con respecto a las dosificaciones de 2 a 20%.

Figura 41. Variación, en el valor de pH en las mezclas de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

De acuerdo a la figura 41 para valores superiores a 12% de cal el pH empieza a adquirir un comportamiento asintótico que se aproxima a 10.

3.3. Análisis del comportamiento del suelo con la adición de cemento

Los parámetros que fueron evaluados para el caso de la mezcla suelo-cemento en las diferentes dosificaciones analizadas, al igual que para la mezcla suelo-cal, se limitaron a sus propiedades de plasticidad: límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad; y algunos parámetros mecánicas: ángulo de fricción interna, cohesión y resistencia a la compresión confinada. Adicionalmente se incluyó el comportamiento relacionado con la prueba normal de compactación y la capacidad de soporte (ensayo CBR). En este caso las dosificaciones analizadas fueron del 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14% y 16%. Se estudiaron estas dosificaciones para ver la incidencia en las condiciones de plasticidad, compactación, parámetros de resistencia y CBR. Se señala que se incluyeron los porcentajes de 3 y 5% adicionales a lo programado en el diseño experimental para contar con mayor cantidad de datos.

3.3.1. Variación del límite líquido y plástico e índice de plasticidad

En la Tabla 35 se resumen los valores obtenidos en los ensayos de límites de plasticidad para la mezcla suelo-cemento en las diferentes dosificaciones usadas del cementante.

Tabla 35. Resultados de los ensayos de límites de plasticidad para la mezcla suelo-cemento en sus diferentes dosificaciones

Límites de plasticidad	Suelo en condición natural	Porcentaje de cemento adicionado respecto al peso seco del suelo									
		2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
LL (%)	61,70	58,58	59,41	58,53	58,63	58,60	57,84	53,29	50,54	49,82	49,55
LP (%)	44,90	41,56	44,25	43,37	42,38	42,59	42,57	38,94	37,78	37,58	36,70
IP (%)	16,78	17,02	15,16	15,16	16,25	16,02	15,27	14,35	12,76	12,25	12,85

Fuente: elaboración propia.

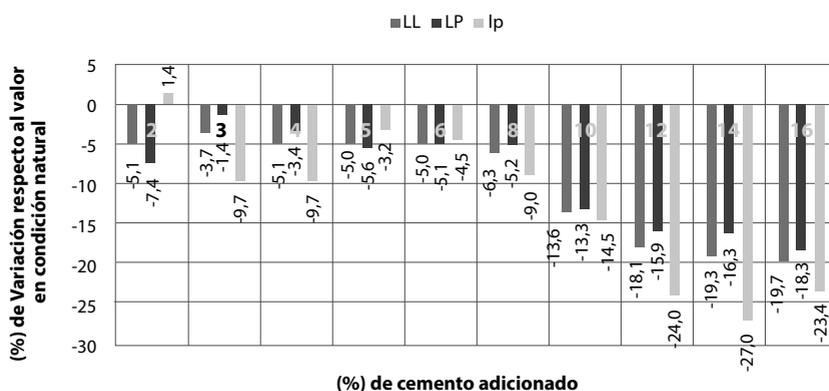
De acuerdo con los resultados obtenidos, para todos los porcentajes analizados, la adición de cemento tiene un efecto directo en la plasticidad del suelo, pues hace que se disminuya, en términos globales, el índice de plasticidad, el límite plástico y el límite líquido.

En la figura 42 se presentan los diferentes porcentajes de variación de los límites líquido, plástico e índice de plasticidad comparados con los valores obtenidos para el suelo en su condición natural. Se indican con valores negativos cuando se presenta una disminución y positivos cuando se tiene aumento respecto al valor

en condición natural. El comportamiento que muestra la mezcla suelo-cemento indica que el efecto del cemento para las dosificaciones bajas (2% y 3) es una disminución decreciente para el LL y el LP y la disminución se hace creciente para el resto de las dosificaciones. En el caso del índice de plasticidad, la disminución es decreciente para dosificaciones entre 2% y 5% y creciente entre 6% y 14%.

La mayor reducción se obtuvo para la mezcla con adición de 14% de cemento, en la que la reducción para el límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad fueron respectivamente de 19%, 16% y 27%.

Figura 42. Variación, en porcentaje, de la plasticidad al comparar las mezclas suelo-cal con la condición natural del suelo



Fuente: elaboración propia.

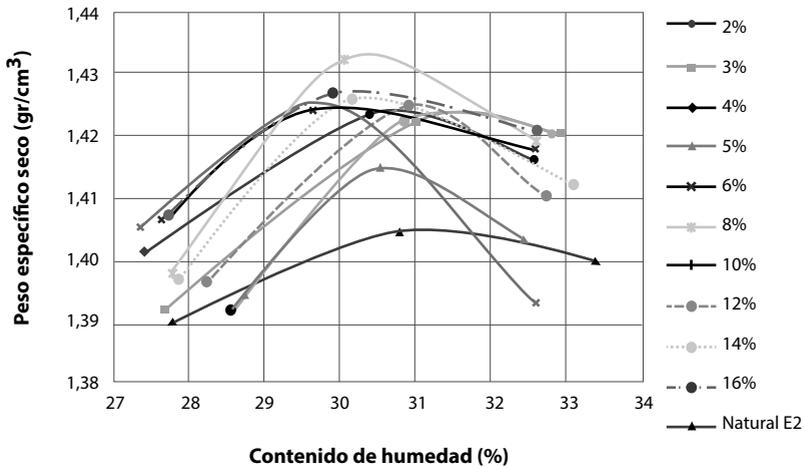
3.3.2. Variación de las relaciones humedad-densidad (ensayo Proctor normal)

En la Tabla 36 se muestran los resultados del ensayo normal de compactación (Proctor) para los diferentes porcentajes de cemento que se adicionaron al suelo y en la figura 43 se muestran las curvas de compactación correspondientes, junto con las curvas de los tres ensayos realizados al suelo en su condición natural. Se puede observar que, al aumentar el porcentaje de cemento que se adiciona, aumenta el contenido de humedad óptimo y disminuye el valor de la densidad seca máxima en valores similares.

Tabla 36. Valores de la curva de compactación normal para la mezclas suelo-cemento

% de cemento adicionado	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	CHO (%)
2	1,425	31,70%
3	1,423	31,30%
4	1,424	30,80%
5	1,425	30,80%
6	1,426	30,80%
8	1,425	30,80%
10	1,425	30,20%
12	1,425	30,80%
14	1,428	31,00%
16	1,428	30,80%
Valores promedio en condición natural	1,427	31,03%

Fuente: elaboración propia.

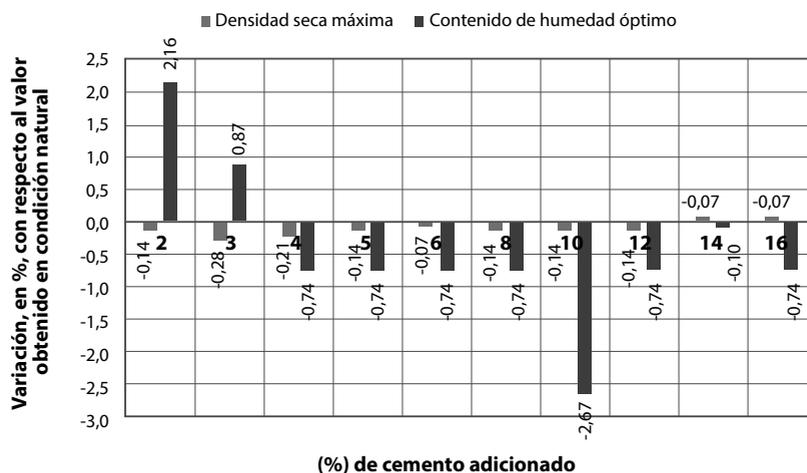
Figura 43. Resultados para el ensayo normal de compactación en la mezcla suelo-cemento en sus diferentes dosificaciones, además se incluyen las curvas de los ensayos realizados al suelo en su condición natural

Fuente: elaboración propia.

En la figura 44 se muestra la variación porcentual para el CHO y la densidad seca máxima obtenida al comparar los resultados de los diferentes porcentajes adicionados de cemento al suelo con los valores obtenidos para este en su condición natural. Se encontró que las variaciones porcentuales son muy bajas. En general, el contenido de humedad óptima se mantiene muy cercano al valor

obtenido para el suelo sin adición de cementante y los valores de densidad seca máxima, en promedio, se mantienen similares.

Figura 44. Variación de la densidad seca máxima y el CHO al comparar las mezclas suelo-cemento con la condición natural del suelo



Fuente: elaboración propia.

3.3.3. Variación del ángulo de fricción y la cohesión (ensayo de corte directo)

Se analizó la variación en la cohesión obtenida del ensayo de corte directo para diez (10) dosificaciones de mezcla suelo-cemento realizadas y se tuvieron en cuenta los tiempos de curado de 7, 14 y 28 días. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 37.

Tabla 37. Valores de cohesión, en kPa, obtenidos para las mezclas suelo-cal con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días

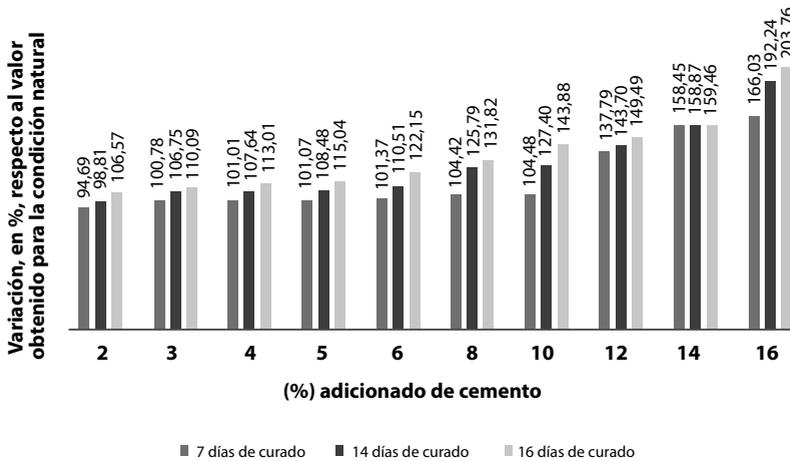
Tiempo de curado	Porcentaje de cemento adicionado por peso seco del suelo										
	Condición natural	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
7 días	20,66	72,05	73,42	75,49	76,00	76,10	76,88	105,19	122,77	130,94	151,83
14 días	20,66	76,71	77,79	77,79	79,62	82,22	86,79	108,63	145,88	149,79	151,83
28 días	20,66	80,36	83,92	88,05	94,00	99,99	108,28	118,29	146,16	151,83	155,06

Fuente: elaboración propia.

En la figura 45 se puede observar el comportamiento de la cohesión en las diferentes dosificaciones para la mezcla suelo-cemento y, en los tiempos de curado de

En la figura 46 se puede observar el comportamiento del ángulo de fricción en las diferentes dosificaciones para la mezcla suelo-cemento y según los tiempos de curado de 7, 14 y 28 días. Se encuentra un aumento importante en relación con el valor obtenido en estado natural y alcanza una mejora cercana al 100% cuando se adiciona 2% de cemento y hasta un 200% con un 16% de cemento. Se puede apreciar que, si se compara de una dosificación a otra, el aumento es moderado en las dosificaciones desde 2% hasta 8% y más marcado en las dosificaciones del 8% al 16%. Se aprecia una incidencia del tiempo curado que hace que el ángulo de fricción aumente con relación a este para cada dosificación analizada.

Figura 46. Variación, en porcentaje, del ángulo de fricción para las mezclas suelo-cemento, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural



Fuente: elaboración propia.

3.3.4. Resistencia a la compresión incon nada

Los resultados del comportamiento de las probetas de mezcla suelo-cemento preparadas para diferentes dosificaciones y tiempos de curado se muestran en la tabla 39.

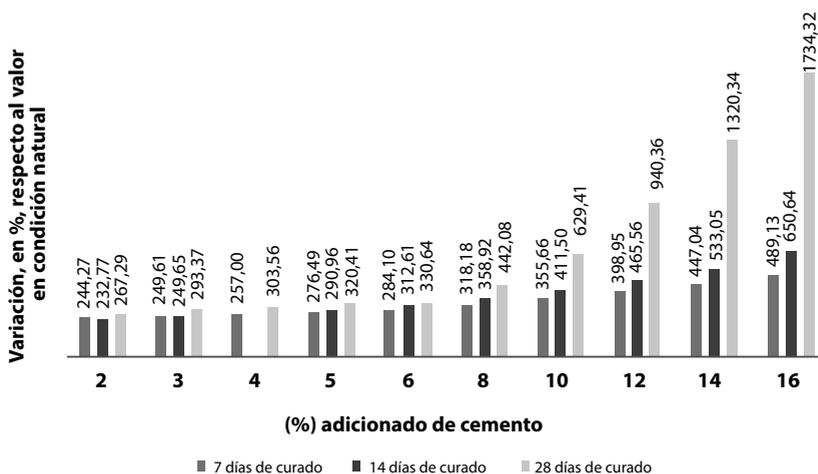
Tabla 39. Valores de RCU, en kPa, obtenidos para las mezclas suelo-cemento con tiempos de curado de 7, 14 y 28 días

Tiempo de curado	Porcentaje de cemento adicionado por peso seco del suelo										
	Condición natural	2	3	4	5	6	8	10	12	14	16
7 días	135.61	466.86	474.11	484.13	510.55	520.87	567.10	617.93	676.62	741.84	798.92
14 días	135.61	451.27	474.16	271.87	530.18	559.54	622.34	693.65	766.95	858.48	1017.94
28 días	135.61	498.08	533.45	547.27	570.12	583.99	735.11	989.15	1410.83	1926.12	2487.52

Fuente: elaboración propia.

En la figura 47 se puede observar la variación en la resistencia a la compresión confinada con respecto al porcentaje de cemento utilizado en la mezcla y al tiempo de curado. La mejora en la RCU con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural es muy significativa alcanzando un aumento de alrededor de 250% para adición de 2% de cemento hasta del 1700% para la adición de un 16% de cemento al suelo. En relación con el tiempo de curado su influencia no es muy marcada para dosificaciones entre el 2% y el 8%, pero es muy significativa para dosificaciones entre el 10% y el 16%. Los datos muestran que la variación es muy grande para el tiempo de curado de 28 días respecto a los tiempos de 7 y 14 días. Se aclara que no se incluyó el dato de RCU obtenido para la dosificación de 4% y tiempo de curado de 14 días porque fue considerado un dato errado, esto debido a que la RCU debió aumentar y no disminuir como es la tendencia al aumentar el contenido de cemento.

Figura 47. Variación, en porcentaje, de la RCU para las mezclas suelo-cemento, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural



Fuente: elaboración propia.

3.3.5. Variación de la capacidad de soporte (ensayo CBR de laboratorio)

En la tabla 40 encontramos la capacidad de soporte CBR del suelo en estado natural y cuando recibe las dosificaciones de suelo-cemento.

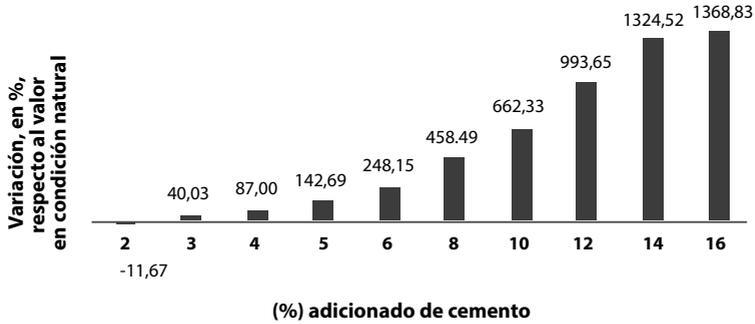
Tabla 40. Valores de capacidad de soporte (CBR) obtenidos para la mezcla suelo-cemento en las diferentes dosificaciones analizadas

Porcentaje de cemento adicionado	CBR (%)
2	5.98
3	9.48
4	12.66
5	16.43
6	23.57
8	37.81
10	51.61
12	74.04
14	96.44
16	99.44
Valor promedio en condición natural para γ_{dmax}	6.77

Fuente: elaboración propia.

En la figura 48 se muestra la variación, en porcentaje, de la capacidad de soporte (CBR) con respecto al porcentaje de cemento utilizado en la mezcla con relación al valor de CBR promedio obtenido para el suelo en condición natural. Los resultados muestran que la capacidad de soporte mejora considerablemente alcanzado valores hasta del 1360% con la adición de 16% de cemento en la mezcla. Incluso pese a que se encontró que para una adición del 2% de cemento, la mezcla presenta una disminución del 14% en el valor de CBR.

Figura 48. Variación, en porcentaje, de la capacidad de soporte (CBR), para las mezclas suelo-cemento, con respecto al valor obtenido para el suelo en condición natural

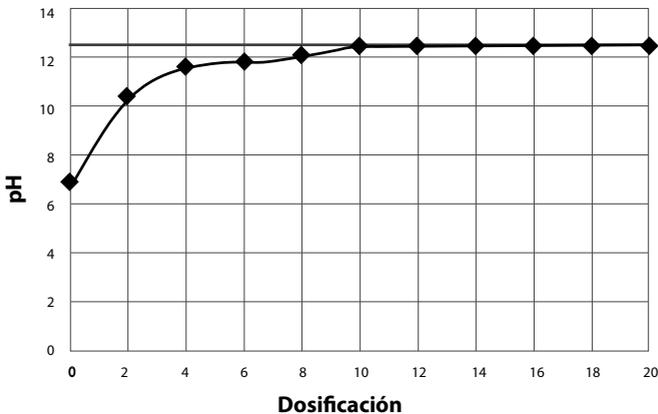


Fuente: elaboración propia.

3.3.6. Variación del porcentaje de pH en la muestras de Cemento

La figura 49 muestra los valores correspondientes a las pruebas de pH realizadas a las mezclas suelo-cemento y, de forma similar a la cal, adquiere un comportamiento asintótico para dosificaciones superiores al 10% y en este caso el suelo alcanza el grado de alcalinidad necesario para la máxima reactividad de los iones de silicio y aluminio.

Figura 49. Variación, en el valor de pH en las mezclas de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

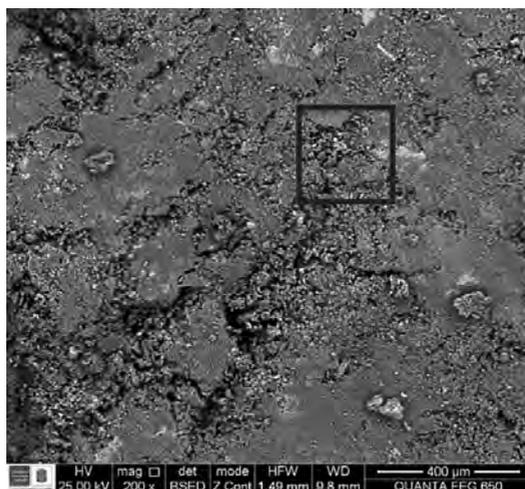
3.4. Análisis de microscopía electrónica de barrido

El análisis de microscopía electrónica de barrido SEM (*Scanning Electron Microscopy*) de las muestras se realizó con un microscopio de barrido FEG (*Field Emission Gun*) QUANTA FEG 650. Las muestras se tomaron con alto vacío, un voltaje de aceleración de 25 kV, y para la detección de imágenes se usaron electrones secundarios (SE): *Everhart Thornley detector* ETD (para observar morfología y electrones retrodispersados (BSE) y *Back scattered electron detector* (BSED) tipo SSD para observar variaciones de composición. En el análisis químico el voltaje de aceleración fue 25 Kv a 200X con un detector EDAX APOLO X con resolución de 126.1 eV (en. Mn K α) para el análisis EDS (Energy-Dispersive Spectroscopy) utilizando el software EDX Genesis. La imágenes se tomaron con aumentos desde 200X hasta 4000X según lo permitieran las propiedades físicas de la muestra y la deleznablez. Estas ocasionan pérdidas en la superficie de la muestra y dejan zonas no metalizadas que generan carga de superficie e interferencia a aumentos superiores a 8000X.

El suelo y los cementantes se mezclaron con las dosificaciones y repeticiones del diseño de experimento y posteriormente se realizó el proceso de compactación con la misma energía del Proctor estándar.

En la figura 50, que corresponde al suelo en condición natural, se puede observar un material heterogéneo, con una superficie irregular, con fragmentos de minerales en diferentes proporciones como el cuarzo y formación de arcillas. Se puede destacar a esta escala la porosidad que posee el material y otro de los rasgos relevantes es la posible falta de cohesión entre los materiales.

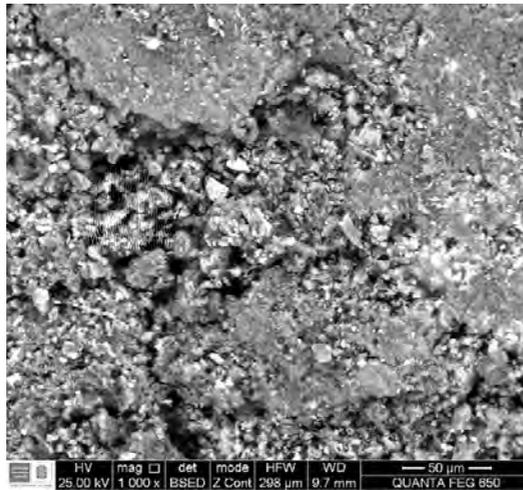
Figura 50. Micrografías SEM del suelo en condición natural a escala de 400 μ m



Fuente: GIGMA, 2018.

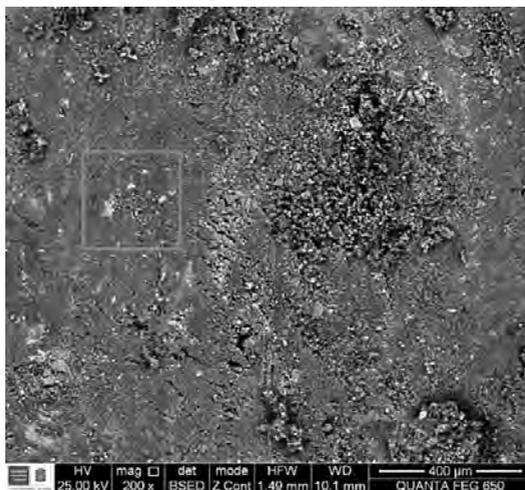
Una magnificación de la figura 50 a 1000 aumentos permite ver un poco más a detalle la morfología y composición de la muestra como se aprecia en la figura 51. Como se observa, el material mantiene las características heterogéneas y una superficie irregular, con considerables espacios porosos y una escasa matriz con tendencia a ser grano-soportada y una baja cohesión. En esta imagen de *retrodispersados* se evidencia la variación de su composición por medio de las diferentes texturas y escalas de grises, al igual que una distribución homogénea de materiales de alta densidad representados por los puntos o zonas más brillantes que muestran un contenido de óxido.

Figura 51. Micrografías SEM del suelo en condición natural a escala de 50 μm



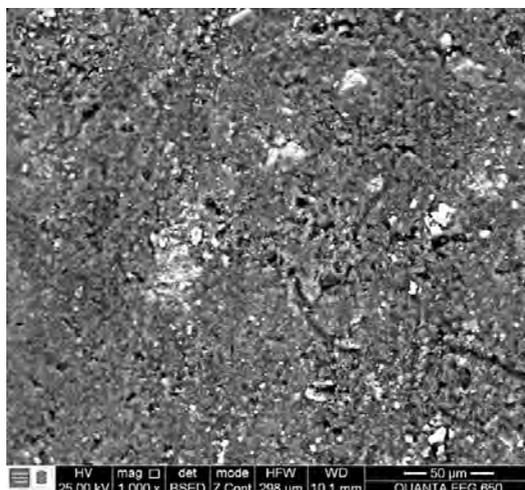
Fuente: GIGMA, 2018.

En la mezcla de suelo con 6% de cemento en peso de suelo seco, se observa un cambio de textura en la muestra. Esto se muestra en la figura 52 que corresponde a una imagen de *retrodispersados*, en ella se observan regiones menos irregulares y por ende más planas. Esto puede indicar que la mezcla con cemento puede tener un efecto positivo en la consistencia del material aumentando la cohesión y atracción entre partículas.

Figura 52. Micrografías SEM de la mezcla suelo-cemento al 6% a escala de 400 μm 

Fuente: GIGMA, 2018.

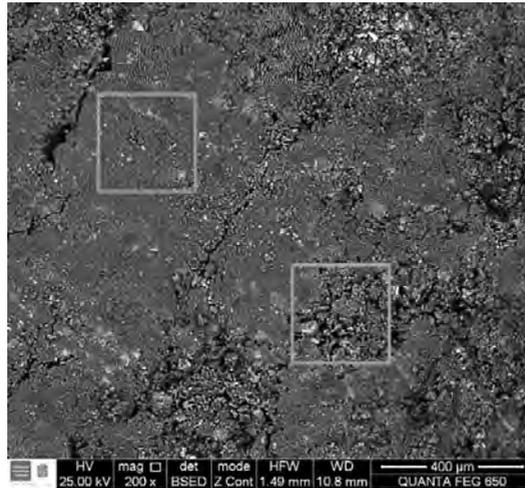
Una magnificación a la muestra de suelo-cemento permite apreciar un gran cambio con respecto al suelo en condición natural, ya que en la figura 53 se aprecia una textura más homogénea con aspecto de matriz soportada y con una disminución del tamaño de grano.

Figura 53. Micrografías SEM de la mezcla suelo-cemento al 6% a escala de 50 μm 

Fuente: GIGMA, 2018.

La figura 54 muestra la mezcla de suelo con 6% de cal en peso de suelo seco. A nivel morfológico el resultado es muy similar al suelo en condición natural, pues se siguen presentando aspectos superficiales de irregularidad, porosidad, baja cohesión y además la aparición de unas grietas de tamaño considerable. Sin embargo, se crearon zonas pulidas que son más homogéneas donde no se vio comprometida la integridad del material por las grietas presentes.

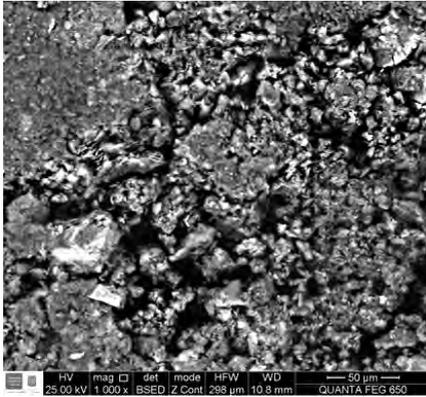
Figura 54. Micrografías SEM de la mezcla suelo-cal al 6% a escala de 400 μm



Fuente: GIGMA, 2018.

Una magnificación de la zona de mayor porosidad como se muestra en la figura 55 (a) pone en evidencia grandes espacios porosos y falta de cohesión, pues se presentan granos y fragmentos que soportan el armazón del material con una composición muy heterogénea; una magnificación de la misma muestra en la zona más pulida (Figura 55 (b)) muestra un material más homogéneo con menor tamaño de partículas y con un aspecto matriz soportado.

**Figura 55. Micrografías SEM de la mezcla suelo-cal al 6% a escala de 50 μm .
(a) superficie porosa (b) superficie pulida**



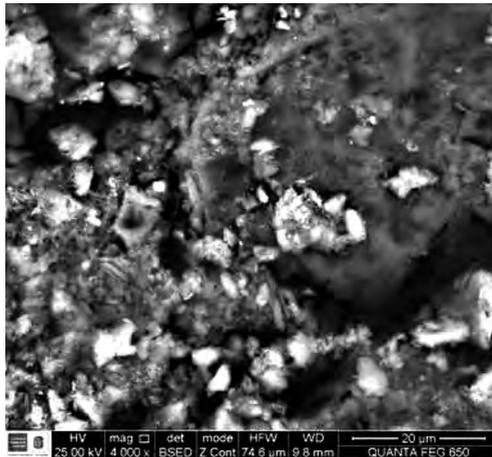
(a)

(b)

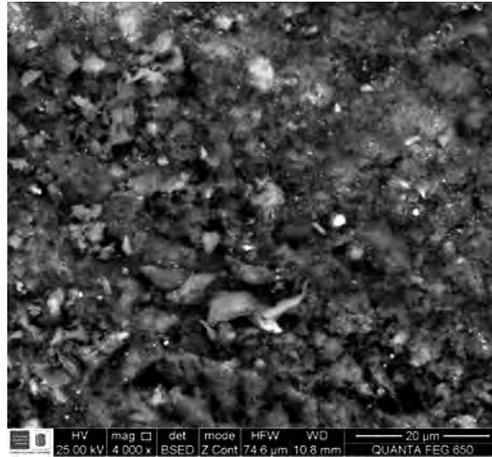
Fuente: GIGMA, 2018.

Con la incorporación de la cal con una dosificación del 6% al suelo, se puede percibir como los bordes de las partículas fueron atacados por la cal. Esto explica la apariencia irregular que se aprecia en la figura 56, así mismo, las partículas individuales parecen estar unidas entre sí con material gelatinoso que cubre los flocúlos. Esto coincide con investigaciones desarrolladas por Eades y Grim (1960) y Croft (1964) en las que identificaron que la adición de cal da lugar a pequeños parches nebulosos producidos por la reacción en el borde de las partículas del suelo (figura 57).

Figura 56. Micrografías SEM del suelo con 6% de cal adicionada a escala de 20 μm



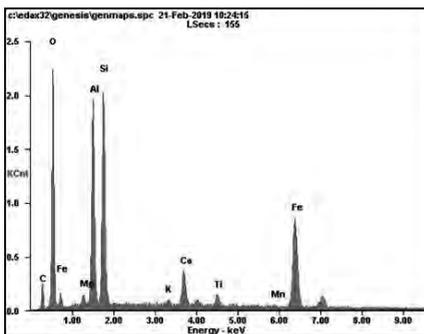
Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 57. Parches nebulosos producto de la reacción de la cal

Fuente: GIGMA, 2018.

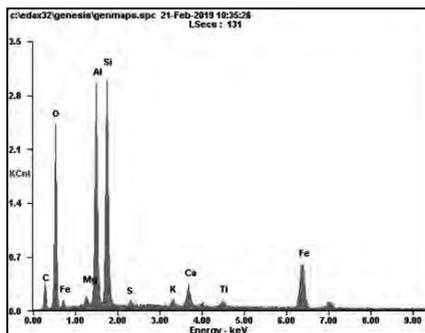
El análisis elemental EDS de las muestras se realizó en regiones puntuales de las micrografías y los resultados se muestran en la figura 58. En el suelo en condición natural el principal elemento es el oxígeno, seguido del silicio y el aluminio, además, existe una notoria presencia de óxido de hierro. Los altos niveles de oxígeno pueden deberse a la porosidad del material que se caracteriza por su particular bajo peso unitario.

Con la adición de la cal y el cemento se produce un incremento significativo del silicio y aluminio con algunas trazas de calcio que se presume que hacen parte de los productos de reacción formados por el ataque de la cal sobre las partículas de arcilla.

Figura 58. Análisis EDS de las muestras (a) estado natural, (b) suelo-cal 6%, (c) Suelo-cemento 6%

(a)

(b)



(c)

Fuente: GIGMA, 2018.

3.5. Análisis estadístico

Con el fin de analizar los resultados obtenidos para los parámetros físicos y mecánicos del suelo utilizado en el desarrollo de la investigación en el caso de las mezclas con dosificaciones de cal y las de cemento, se procedió a realizar un análisis DOE (Tanco, 2008) con el que se busca determinar qué tan significativa es, en algunas de las variables estudiadas, la dosificación y tipo de cementante utilizado.

3.5.1. Análisis para mezclas de suelo-cemento

El análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio para las mezclas suelo-cemento en sus diferentes dosificaciones se realiza para variables como los límites de plasticidad y el ensayo CBR.

Límite líquido. Al aplicar los modelos de regresión dado por las ecuaciones 3, 4 y 5 se determinó que en ningún caso la variable satisface los supuestos de distribución normal, linealidad entre respuesta y regresores, varianza constante para los residuos y residuos con media cero. Por tal motivo, el análisis de varianza para la variable LL no tiene validez estadística.

Ecuación 3.

$$y = \sqrt{y}$$

Ecuación 4.

$$y = \text{Log}(y)$$

Ecuación 5.

$$y = y^{(-1)}$$

En consecuencia se realiza la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis, utilizando el software Statgraphics Centurion XVII. Esto generó el resultado: Test statistic = 15.933 y un P-Value = 0.02573. Este significa que se rechaza la hipótesis nula dado que (Valor $p=0,02573 < 0,05$), es decir, los residuos de la transformación no tienen normalidad, lo que significa que los resultados no poseen una distribución simétrica dentro de la campana de distribución y la nube de puntos no tiene una tendencia constante y homogénea, por lo cual, el supuesto de varianza constante tampoco se cumpliría.

Límite plástico. Con el análisis de regresión se hace un análisis de comprobación de los supuestos, para tal fin se realizan gráficas de probabilidad normal como se muestra en la figura 59 y la de dispersión de residuos vs ajuste (figura 60).

**Figura 59. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión:
límite plástico vs. porcentaje de cemento**

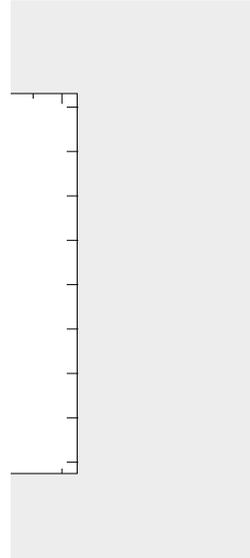
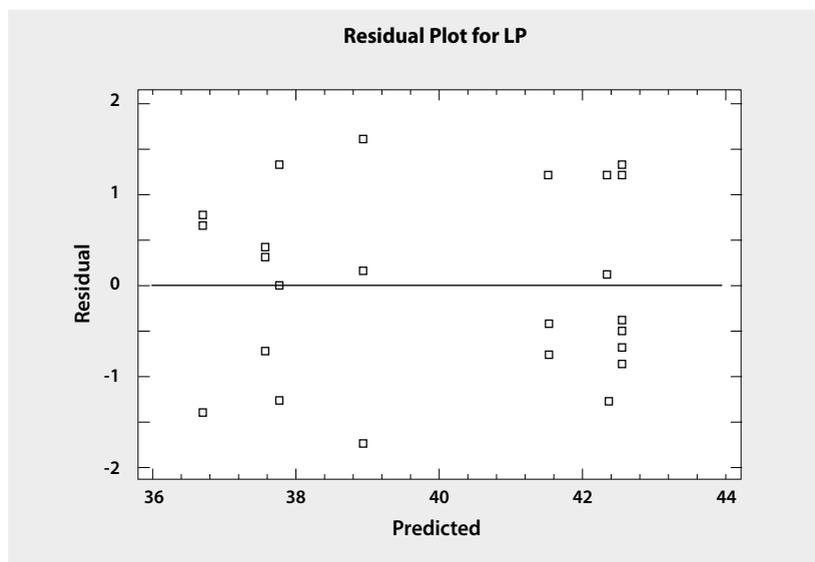


Figura 60. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

Analizando la gráfica de probabilidad de residuos ilustrada en la figura 59 se obtiene que el valor $P=0,2586$. Esto significa que como hipótesis nula los residuales tienen distribución normal (Valor $p=0,2573 > 0,05$). De la gráfica de dispersión de residuos se puede determinar que sí hay linealidad y, si su varianza es constante y el p -valor = 0.98 en la prueba de Barlett's, entonces, se verifica que se cumple el supuesto y el modelo es apropiado.

Comparación de medias. Este análisis se hace para comparar las respuestas medias del LP del suelo con diferentes dosificaciones y cuyos resultados se muestran en la tabla 41.

Tabla 41. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD

Level	Count	Mean	Homogeneous Groups
16%	3	36.7	X
14%	3	37.58	XX
12%	3	37.78	XX
10%	3	38.94	X
2%	3	41.56	X
4%	3	42.38	X

Level	Count	Mean	Homogeneous Groups
8%	3	42.57	X
6%	3	42.59	X

Fuente: GIGMA, 2018.

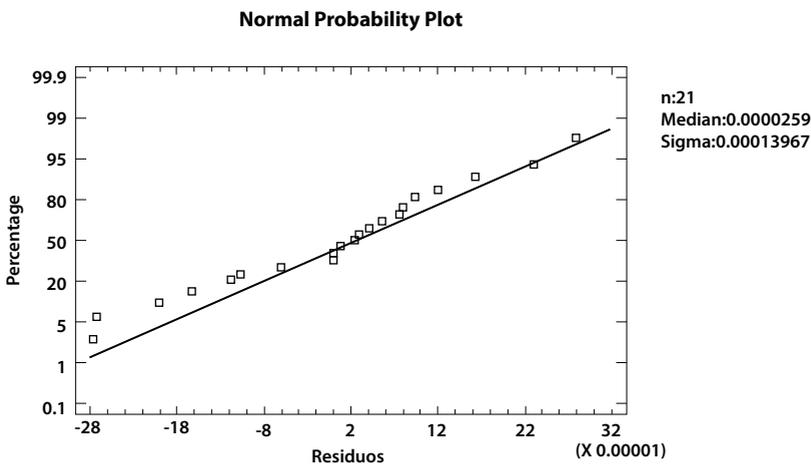
Como se puede apreciar, existen zonas homogéneas de operación, es decir, hay porcentajes de cemento adicionado que generan una misma respuesta de la variable.

Índice de *plasticidad* (IP). Para el caso del IP no cumple el supuesto de normalidad. Se intentó realizar una transformación estabilizadora de varianza aplicando los modelos de regresión dado por las ecuaciones 3,4 y 5, pero no fue posible. Por tal motivo el análisis de varianza para la variable IP no tiene validez estadística, pues los criterios de linealidad entre respuesta y regresores, varianza constante entre residuos y media de residuos es igual a cero.

En consecuencia, se realiza la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis que da como resultado Test statistic = 10.6267 y un P-Value = 0.1558. Esto significa que como hipótesis nula los residuales tienen distribución normal.

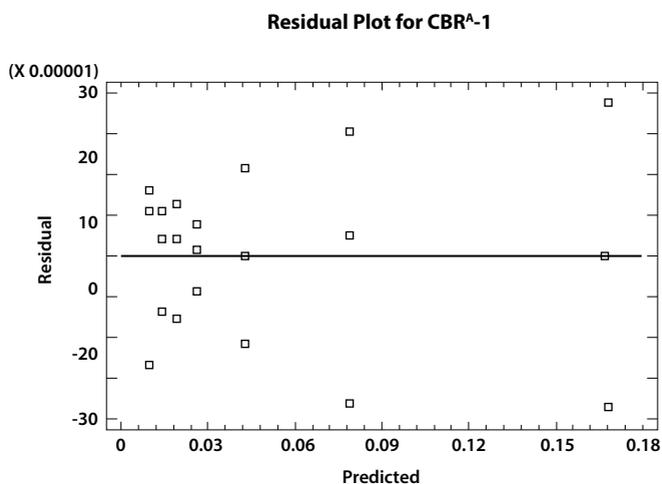
Valores de *capacidad de soporte* (CBR). Con el análisis de regresión se hace una análisis de comprobación de los supuestos. Para tal fin se realizan gráficas de probabilidad normal como se muestra en la figura 61 y de dispersión de residuos vs ajuste como se ilustra en la figura 62.

Figura 61. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: CBR vs. Porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

**Figura 62. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión:
CBR vs. porcentaje de cemento**



Fuente: GIGMA, 2018.

Cuando se analiza la gráfica de probabilidad de residuos ilustrada en la figura 61 se obtiene que el valor de P es 0,7058. Esto significa que como hipótesis nula los residuales tienen distribución normal, además, el valor P de 0,5224 en la prueba de Barlett (figura 62) nos permite verificar el cumplimiento del supuesto y podemos asegurar que el modelo es adecuado.

Comparación de medias. Este análisis se hace para comparar las respuestas medias del CBR del suelo con diferentes dosificaciones de suelo-cemento y cuyos resultados se muestran en la tabla 42.

Tabla 42. Pruebas de múltiple rangos para CBR -1 por porcentaje de cemento

Porcentaje de cemento	Count	Mean	Homogeneous Groups
14%	3	0.0102476	X
12%	3	0.0135061	X
10%	3	0.0193765	X
8%	3	0.0264481	X
6%	3	0.0424272	X
4%	3	0.0790103	X
2%	3	0.167224	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Con los datos de la tabla se puede afirmar que los datos son estadísticamente diferentes respecto al CBR, pues se obtienen valores medios representativos para cada una de las dosificaciones planteadas.

Valores de la cohesión. Inicialmente se hace un análisis de la varianza para la cohesión por el método de suma de cuadrados tipo III. La tabla 43 muestra los resultados del análisis ANOVA. Este consiste en descomponer la variabilidad de la cohesión en contribuciones debidas a varios factores. Ahora, debido a que se escogió la suma de cuadrados tipo III, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás.

Tabla 43. Análisis de varianza para cohesión – suma de cuadrados tipo III

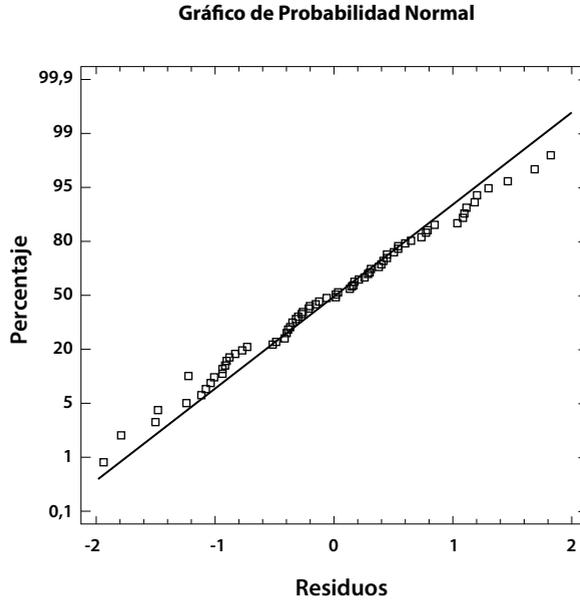
Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: tiempo	3507.04	2	1753.52	1623.43	0,0000
B: porcentaje cemento	60832.0	7	8690.28	8045.55	0,0000
Interacciones					
Ab	1509.84	14	107.846	99.84	0,0000
Residuos	51.8465	48	1.08013		
Total (corregido)	65900.7	71			

Fuente: GIGMA, 2018.

Los valores P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores y, como se aprecia en la tabla, tres de los factores son menores que 0,05, es decir, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la cohesión con un 95,0% de nivel de confianza. Entonces, el tiempo de curado y la dosificación del cemento son variables que influyen en la cohesión del suelo en estudio.

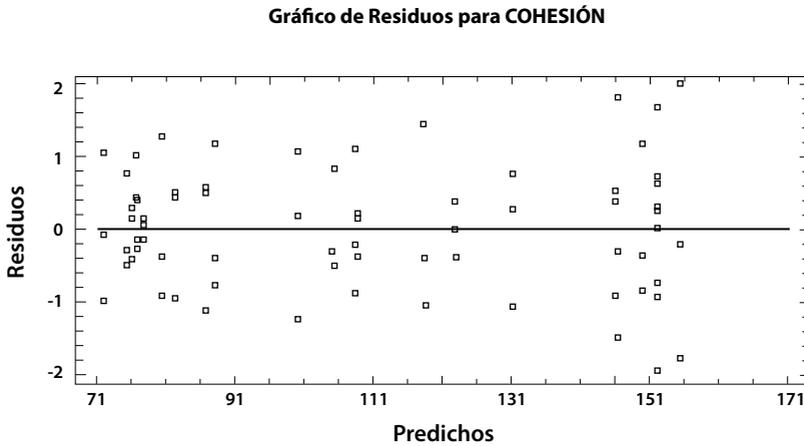
Posteriormente se realiza el análisis y comprobación de los supuestos. Para tal fin se realizan gráficas de probabilidad normal (figura 63) y de dispersión de residuos vs ajuste (figura 64).

Figura 63. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: cohesión vs. porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 64. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: cohesión vs. porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

El valor de $P = 0,786643$ es mayor a $0,05$, es decir, se cumple la hipótesis nula y los residuos tienen una distribución normal. Esto significa que, como hipótesis nula, los residuales tienen distribución normal.

Comparación de medias. Este análisis se hace para comparar las respuestas medias de la cohesión del suelo con diferentes tiempo de curado y dosificaciones de suelo-cemento. Los resultados se muestran en la tabla 44 y 45.

Tabla 44. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por tiempo de curado. Método: 95,0 porcentaje LSD

Tiempo de curado	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
7	24	101,407	0,212145	X
14	24	109,956	0,212145	X
28	24	118,502	0,212145	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Tabla 45. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por porcentaje de cemento. Método: 95,0 porcentaje LSD

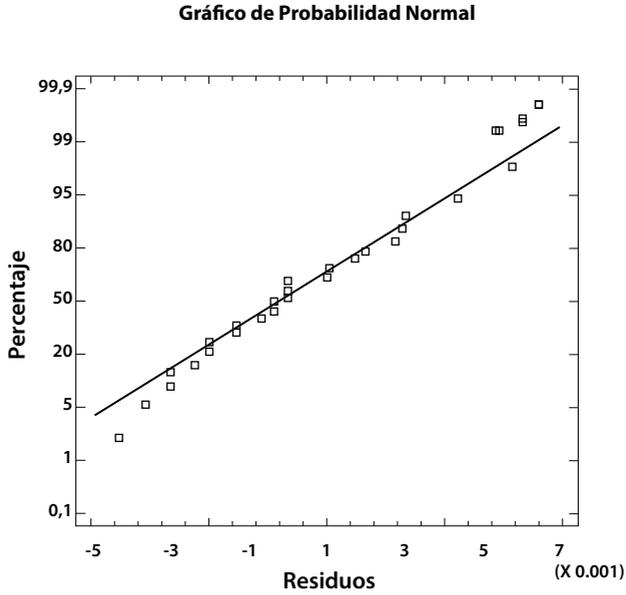
Dosificación de cemento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
2%	9	76,3733	0,346432	X
4%	9	80,4433	0,346432	X
6%	9	86,1044	0,346432	X
8%	9	90,6511	0,346432	X
10%	9	110,703	0,346432	X
12%	9	138,27	0,346432	X
14%	9	144,187	0,346432	X
16%	9	152,907	0,346432	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Con los datos de las tablas 44 y 45 se puede afirmar que los datos son estadísticamente diferentes respecto a los tiempos de curado y la dosificación, es decir, tienen una respuesta variable frente a la cohesión al no tener zonas homogéneas de operación.

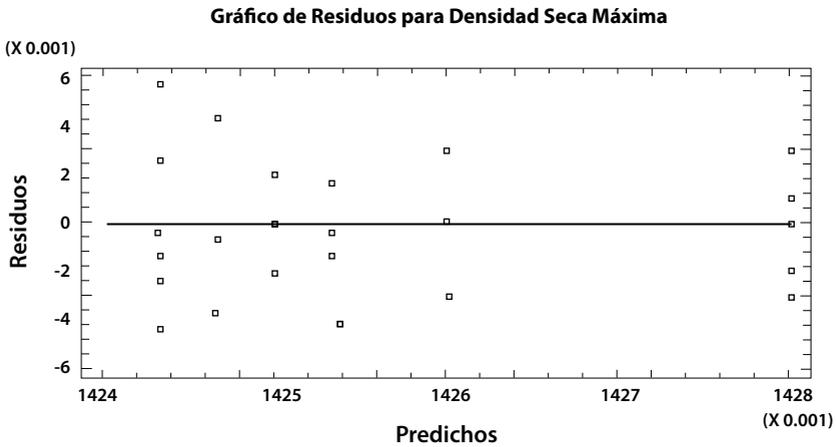
Valores de la densidad máxima. Con el análisis de regresión se hace un análisis de comprobación de los supuestos. Para tal fin se realizan gráficas de probabilidad normal (figura 65) y dispersión de residuos vs. ajuste (figura 66).

Figura 65. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: densidad máxima vs. porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 66. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: densidad máxima vs. porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

Analizando la gráfica de probabilidad de residuos ilustrada en la figura 62 se obtiene el valor $P = 0,842175$. Esto significa que como hipótesis nula los residuales tienen distribución normal, así mismo el valor P de $0,773194$ en la prueba de Barlett nos permite verificar el cumplimiento del supuesto y podemos asegurar que el modelo es adecuado.

Comparación de medias. Los resultados del análisis se realiza se muestra en la tabla 46.

Tabla 46. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por tiempo de curado.
Método: 95,0 porcentaje LSD

Porcentaje de cemento	Casos	Media	Grupos homogéneos
4%	3	1,42433	X
12%	3	1,42433	X
10%	3	1,42467	X
2%	3	1,425	X
8%	3	1,42533	X
6%	3	1,426	X
14%	3	1,428	X
16%	3	1,428	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Es notorio que para cualquier dosificación de cemento se tiene una misma respuesta de la variable, pues para cada nivel existe una misma zona homogénea de operación.

Valores del ángulo de fricción. El ángulo de fricción no cumple con el supuesto de normalidad y se intentó realizar una transformación estabilizadora de varianza aplicando los modelos de regresión dado por las ecuaciones 3, 4 y 5 pero no fue posible. Por tal motivo el análisis de varianza para la variable no tiene validez estadística, pues los criterios de linealidad entre respuesta y regresores, varianza constante entre residuos y media de residuos es igual a cero.

En consecuencia se realiza la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis genera como resultado Test statistic = 6.5917 y un P-Value = 0.037 para el factor tiempo y Test statistic = 57,9246 y un P-Value = 3,91395E-10 para el factor dosificación cemento. Con base en este análisis y dado que el valor-p es menor que 0.05, se rechaza la hipótesis nula de que las medianas de los niveles del factor dosificación suelo/ cemento y tiempo son estadísticamente iguales.

Valores de RCU. Se realizó una transformación estabilizadora de varianza aplicando los modelos de regresión dado por la ecuación 3 que confirma los supuestos, además, en la tabla 47 se realiza el análisis ANOVA.

Tabla 47. Análisis de varianza para RCU – suma de cuadrados tipo III

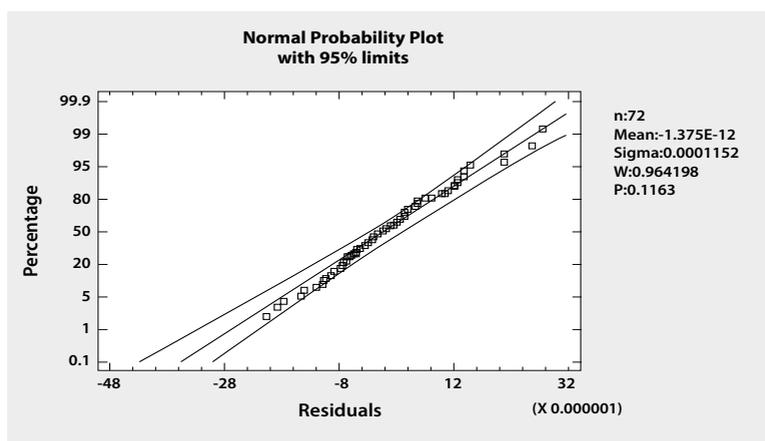
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: tiempo	0.0000047635	2	0.00000238175	12114.78	0,0000
B: porcentaje de cemento	0.00000204237	7	0.00000291768	14840.77	0,0000
Interacciones					
Ab	0.000000553058	14	3.95041E-1	2009.38	0,0000
Residuos	9.43674E-9	48	1.96599E-10		
Total (corregido)	0.0000307273	71			

Fuente: GIGMA, 2018.

Los valores P indican la significancia estadística de cada uno de los factores, a partir de ellos es posible sostener que el tiempo y el porcentaje de cemento tienen una influencia estadística significativa sobre el valor de RCU.

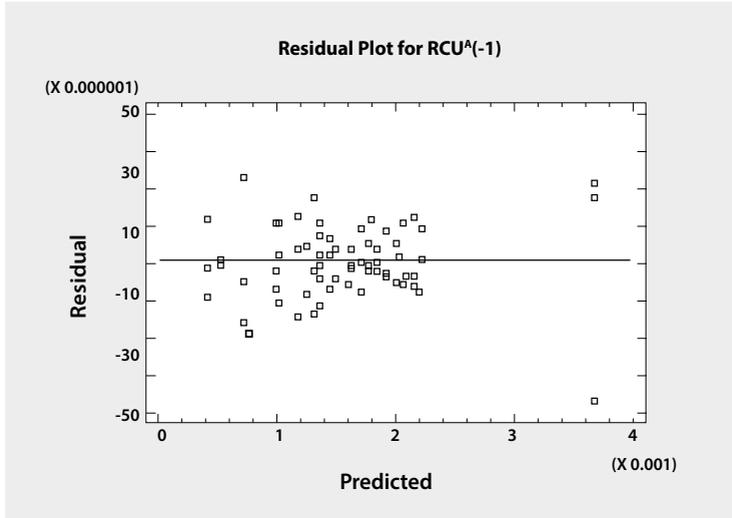
Posteriormente se realiza la verificación de los supuestos con las gráficas de probabilidad normal (figura 67) y dispersión de residuos vs. ajuste (figura 68).

Figura 67. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: RCU vs. porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

**Figura 68. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión:
RCU vs. porcentaje de cemento**



Fuente: GIGMA, 2018.

El valor de $P = 0,1163$ es mayor a $0,05$, es decir, se cumple la hipótesis nula y los residuos tienen una distribución normal.

Comparación de medias. Los resultados del análisis se realiza se muestra en las tablas 48 y 49.

**Tabla 48. Pruebas de múltiple rangos para RCU por tiempo de curado.
Método: 95,0 porcentaje LSD**

TIEMPO DE CURADO	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos Homogéneos
28	24	0.00119372	0.0000025621	X
7	24	0.00169836	0.0000028621	X
14	24	0.00177273	0.0000028621	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Es notorio que para cualquier tiempo de curado se tienen diferentes respuestas, es decir, todos los niveles del factor tiempo son estadísticamente diferentes respecto al RCU.

**Tabla 49. Pruebas de múltiple rangos para RCU por porcentaje de cemento.
Método: 95,0 porcentaje LSD**

Porcentaje de cemento	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
16%	9	0,000878841	0,00000467379	X
14%	9	0,00101074	0,00000467379	X
12%	9	0,0011638	0,00000467379	X
10%	9	0,00135703	0,00000467379	X
8%	9	0,00157688	0,00000467379	X
6%	9	0,00180651	0,00000467379	X
2%	9	0,00212191	0,00000467379	X
4%	9	0,00252378	0,00000467379	X

Fuente: GIGMA, 2018.

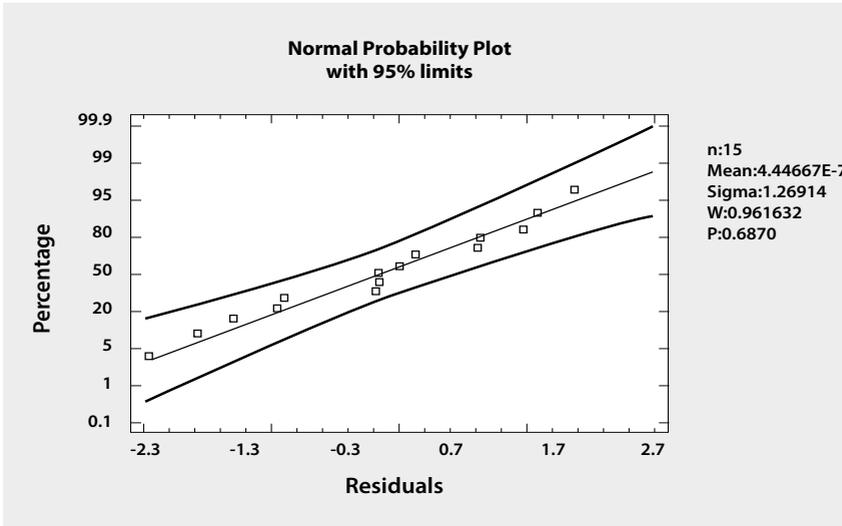
Al igual que con el tiempo de curado, las diferentes dosificaciones de cemento generan diferentes respuestas respecto a la RCU.

3.5.2. Análisis para mezclas de suelo-cal

El análisis de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio para las mezclas suelo-cal en sus diferentes dosificaciones se realiza aquí para variables como los límites de plasticidad, CBR, ángulo de Fricción, cohesión y RCU.

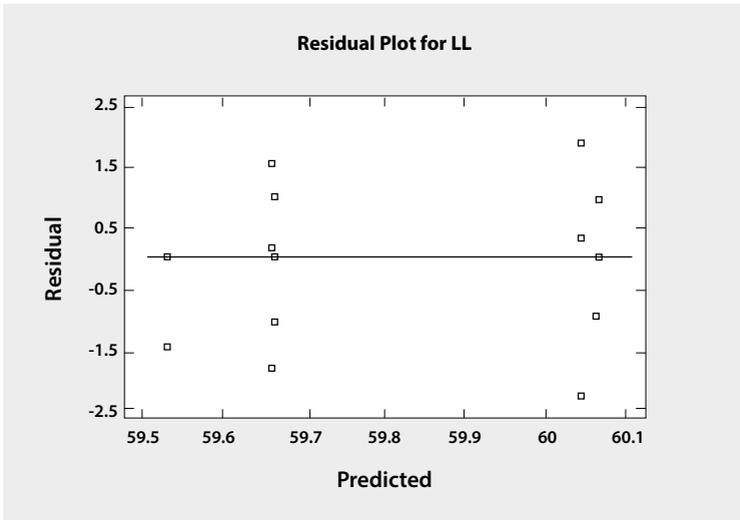
Límite líquido. Con el análisis de regresión se hace una análisis de comprobación de los supuestos, para tal fin se realizan gráficas de probabilidad (figura 69) y dispersión de residuos vs. ajuste (figura 70).

Figura 69. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 70. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

Analizando la gráfica de probabilidad de residuos ilustrada en la figura 66 se obtiene el valor $P = 0,687$. Este significa que como hipótesis nula los residuales

tienen distribución normal. A partir de la gráfica de dispersión de residuos se puede determinar que sí hay linealidad y que su varianza es constante y, como el p -valor= 0,8316 en la prueba de Barlett, también se verifica que se cumple el supuesto y, por lo tanto, el modelo es apropiado.

Comparación de medias. Este análisis se hace para comparar las respuestas medias del LL del suelo con diferentes dosificaciones y cuyos resultados se muestran en la tabla 50.

Tabla 50. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD

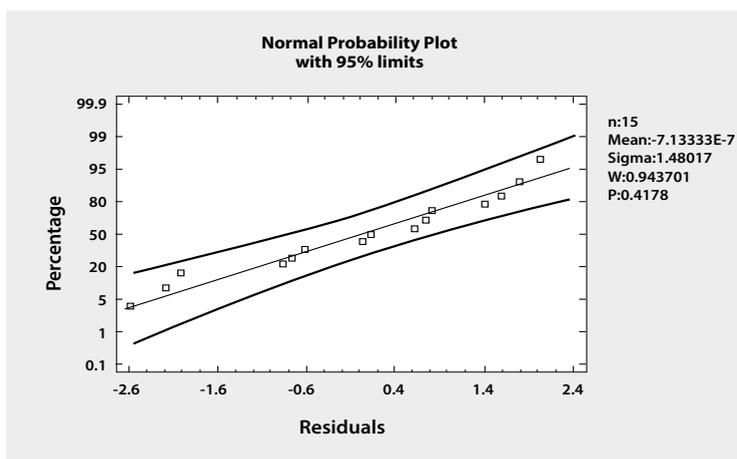
Dosificación de cal	Casos	Media LS	Grupos homogéneos
2%	3	59,53	X
5%	3	59.66	X
6%	3	59.6633	X
3%	3	60.04	X
4%	3	60.06	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Como se puede apreciar, existen zonas homogéneas de operación, es decir, hay porcentajes de cemento adicionado que generan una misma respuesta de la variable.

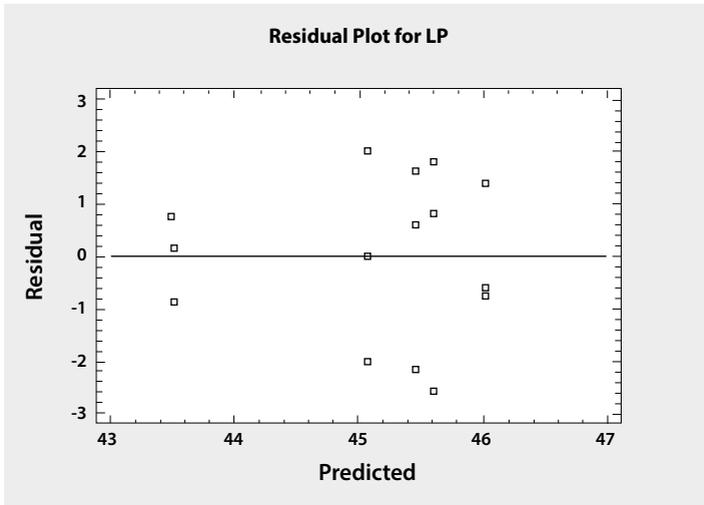
Límite plástico. Con el análisis de regresión se hace un análisis de comprobación de los supuestos, para tal fin se realizan gráficas de probabilidad normal (figura 71) y de dispersión de residuos vs. ajuste (figura 72).

Figura 71. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 72. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

Analizando la gráfica de probabilidad de residuos ilustrada en la figura 56 se obtiene el valor $P= 0,4178$. Este significa que como hipótesis nula los residuales tienen distribución normal. De la gráfica de dispersión de residuos determina que sí hay linealidad y que su varianza es constante y, como el $p\text{-valor}= 0.7282$ en la prueba de Barlett's, se verifica que se cumple el supuesto y, por lo tanto, el modelo es apropiado.

Comparación de medias. Este análisis se hace para comparar las respuestas medias del LP del suelo con diferentes dosificaciones. Sus resultados se muestran en la tabla 51.

Tabla 51. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD

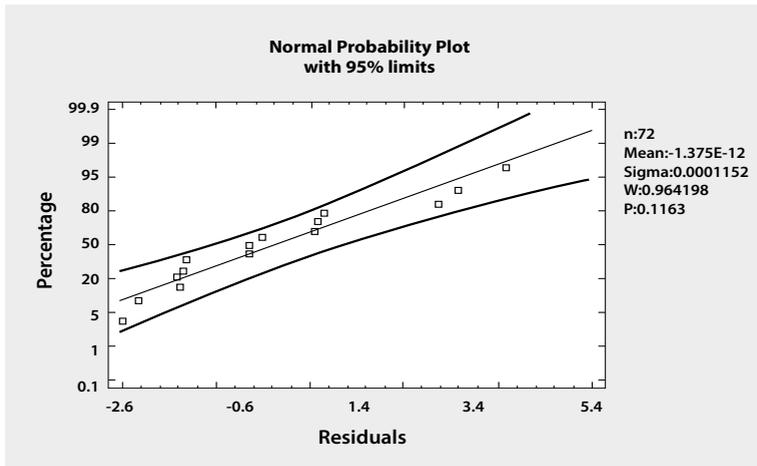
Dosificación de cal	Casos	Media LS	Grupos homogéneos
2%	3	43.5	X
3%	3	45.0833	X
4%	3	45.4533	X
5%	3	45.5967	X
6%	3	46.0233	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Como se puede apreciar, existen zonas homogéneas de operación, es decir, hay porcentajes de cemento adicionado que generan una misma respuesta de la variable.

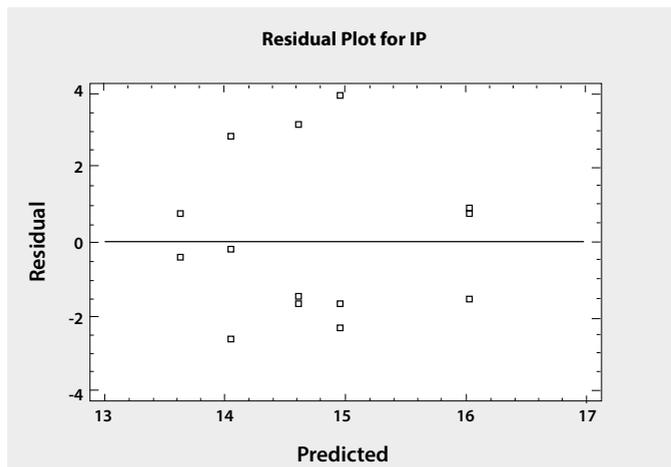
Índice de plasticidad. Con el análisis de regresión se hace un análisis de comprobación de los supuestos, para tal fin se realizan gráficas de probabilidad normal (figura 73) y de dispersión de residuos vs. ajuste (figura 74).

Figura 73. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 74. Gráfica de dispersión de residuos vs. Ajuste del modelo de regresión: límite plástico vs. porcentaje de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

Analizando la gráfica de probabilidad de residuos ilustrada en la figura 66 se obtiene el valor $P= 0,1701$. Este significa que como hipótesis nula los residuales tienen distribución normal. A partir de la gráfica de dispersión de residuos se puede determinar que sí hay linealidad y que su varianza es constante y, como el p -valor= $0,3899$ en la prueba de Barlett, entonces se cumple el supuesto y el modelo es apropiado.

Comparación de medias. Este análisis se hace para comparar las respuestas medias del IP del suelo con diferentes dosificaciones. Sus resultados se muestran en la tabla 52.

Tabla 52. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD

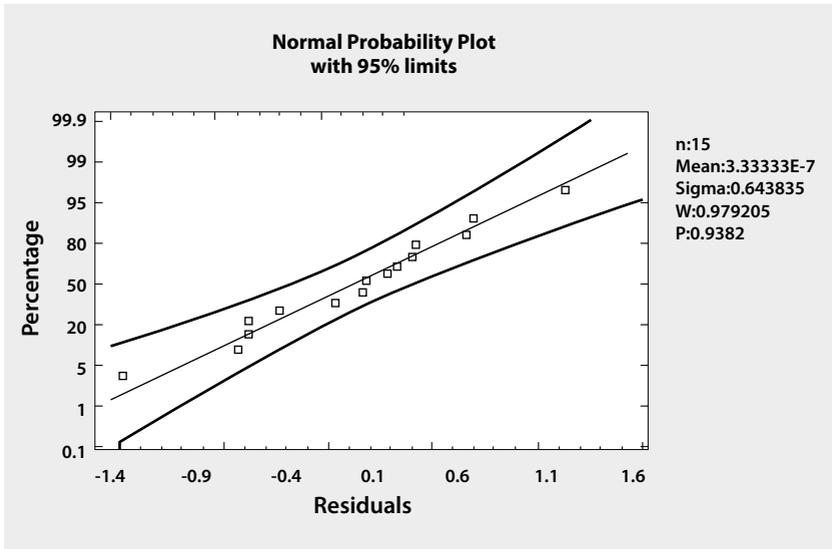
Dosificación de cal	Casos	Media LS	Grupos homogéneos
2%	3	13.64	X
5%	3	14.06	X
6%	3	14.61	X
3%	3	14.96	X
4%	3	16.0333	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Como se puede apreciar, existen zonas homogéneas de operación, es decir, hay porcentajes de cemento adicionado que generan una misma respuesta de la variable.

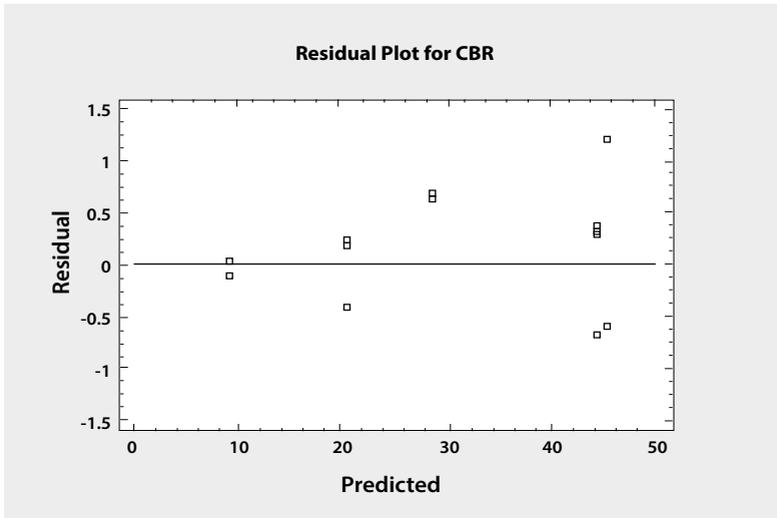
Valores de capacidad de soporte (CBR). A partir del análisis de regresión se hace un análisis de comprobación de los supuestos. Para esto se realizan gráficas de probabilidad normal (figura 75) y de dispersión de residuos vs. ajuste (figura 76).

**Figura 75. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión:
CBR vs. porcentaje de cal**



Fuente: GIGMA, 2018.

**Figura 76. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión:
CBR vs. porcentaje de cal**



Fuente: GIGMA, 2018.

Analizando la gráfica de probabilidad de residuos ilustrada en la figura 66 se obtiene el valor $P=0,9382$. Este significa que como hipótesis nula los residuales tienen distribución normal, así mismo el valor P de $0,08839$ en la prueba de Barlett, esto nos permite verificar el cumplimiento del supuesto y, así, podemos asegurar que el modelo es adecuado.

Valores de la cohesión. Inicialmente se hace un análisis de la varianza para la cohesión por el método de suma de cuadrados tipo III. La tabla 53 muestra los resultados de este análisis conocido como ANOVA que consiste en descomponer la variabilidad de la cohesión en contribuciones debidas a varios factores. Ahora, debido a que se escogió la suma de cuadrados tipo III, la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás.

Tabla 53. Análisis de varianza para cohesión – suma de cuadrados tipo III

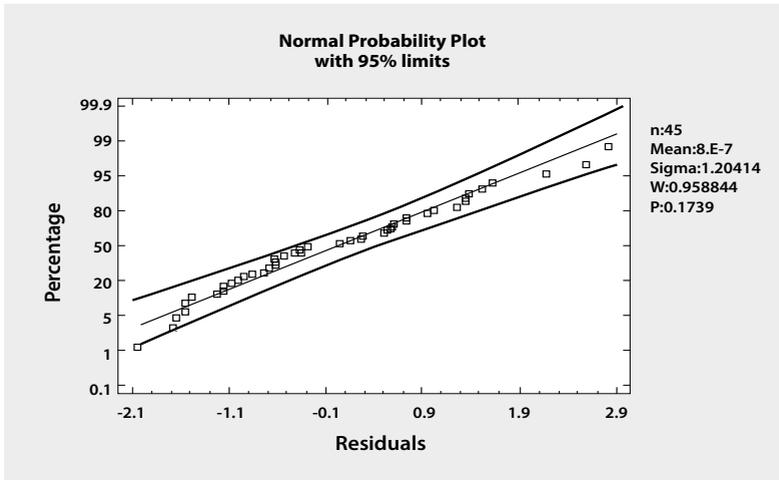
Fuente	Suma de cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: tiempo	11870.1	2	5935.04	2790.85	0,0000
B: porcentaje de cal	39851.8	4	9962.95	4684.89	0,0000
Interacciones					
Ab	12452.7	8	1556.59	731.96	0,0000
Residuos	63.7983	30	2.12661		
Total (corregido)	64238.4	44			

Fuente: GIGMA, 2018.

Los valores de P prueban el significado estadístico de cada uno de los factores y, como se aprecia en la tabla, tres de los factores son menores que $0,05$, es decir, tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la cohesión con un $95,0\%$ de nivel de confianza. Entonces, el tiempo de curado y la dosificación de la cal, así como su interacción, son variables que influyen en la cohesión del suelo en estudio.

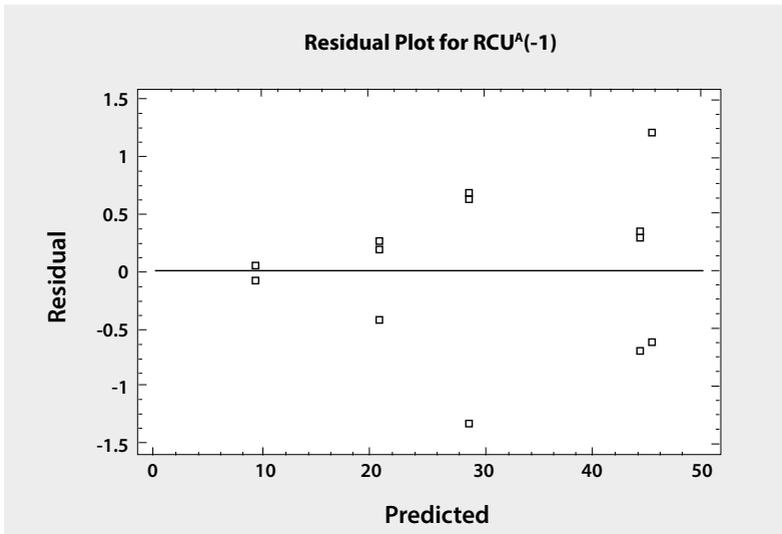
Posteriormente se realiza el análisis y comprobación de los supuestos. Para tal fin se realizan gráficas de probabilidad normal (figura 77) y de dispersión de residuos vs. ajuste (figura 78).

Figura 77. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: cohesión vs. porcentaje de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 78. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: cohesión vs. porcentaje de cal



Fuente: GIGMA, 2018.

El valor de $P = 0,1739$ es mayor a $0,05$, es decir, se cumple la hipótesis nula y los residuos tienen una distribución normal, esto significa que como hipótesis nula los residuales tienen distribución normal (Valor $p=0,1739 > 0,05$).

Comparación de medias. Este análisis se hace para comparar las respuestas medias de la cohesión del suelo con diferentes tiempo de curado y dosificaciones de suelo-cemento. Los resultados se muestran en las tablas 54 y 55.

Tabla 54. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por tiempo de curado.
Método: 95,0 porcentaje LSD

Tiempo de curado	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
7	15	101,737	0,376529	X
14	15	139,513	0,376529	X
28	15	144,354	0,376529	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Tabla 55. Pruebas de múltiple rangos para cohesión por porcentaje de cal.
Método: 95,0 porcentaje LSD

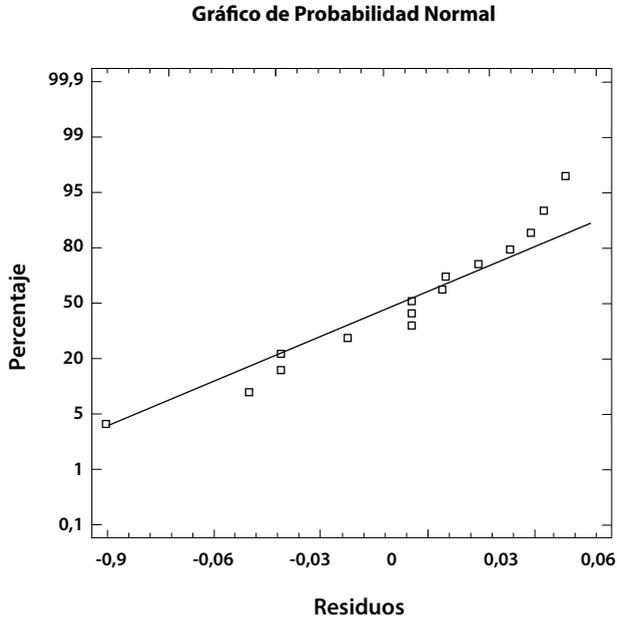
Dosificación de cal	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
2%	9	87,1611	0,346432	X
3%	9	108,079	0,346432	X
4%	9	137,577	0,346432	X
5%	9	148,42	0,346432	X
6%	9	171,437	0,346432	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Con los datos de las tablas se puede afirmar que los tiempos de curado y la dosificación son estadísticamente diferentes, es decir, tienen una respuesta variable frente a la cohesión al no tener zonas homogéneas de operación.

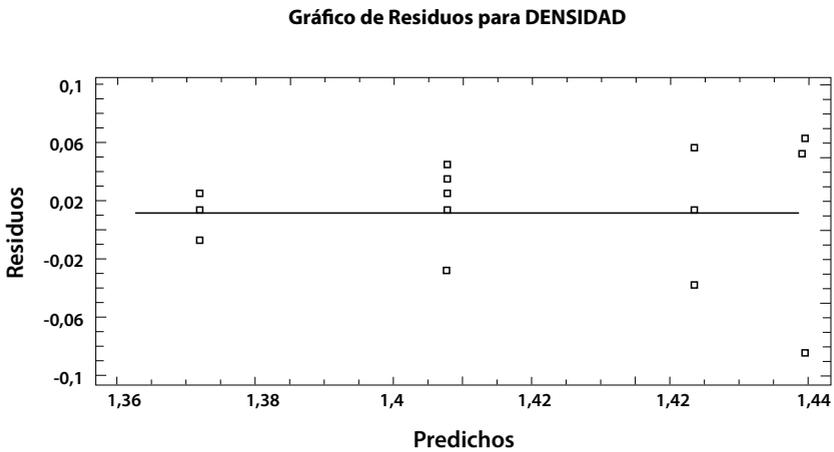
Valores de la densidad máxima. A partir del análisis de regresión se hace una análisis de comprobación de los supuestos, para tal fin se realizan gráficas de probabilidad normal (figura 79) y de dispersión de residuos vs. ajuste (figura 80).

Figura 79. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: densidad máxima vs. porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 80. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión: densidad máxima vs. porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

Analizando la gráfica de probabilidad de residuos ilustrada en la figura 79 se obtiene el valor $P=0,3021689$, este significa que como hipótesis nula los residuales tienen distribución normal.

Comparación de medias. Los resultados del análisis se realiza se muestra en la tabla 56.

Tabla 56. Comparación de medias. Método: 95.0 percentil LSD

Porcentaje de cal	Casos	Media	Grupos homogéneos
6%	3	1,36667	X
4%	3	1,39667	X
5%	3	1,39667	X
3%	3	1,42667	X
2%	3	1,44	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Es notorio que para cualquier dosificación de cemento se tiene una misma respuesta de la variable, pues para cada nivel existe una misma zona homogénea de operación.

Valores del ángulo de fricción. El ángulo de fricción no cumple con el supuesto de normalidad y se intentó realizar una transformación estabilizadora de varianza aplicando los modelos de regresión dado por las ecuaciones 3,4 y 5, pero no fue posible. Por tal motivo, el análisis de varianza para la variable no tiene validez estadística, pues los criterios de linealidad entre respuesta y regresores, la varianza constante entre residuos y media de residuos es igual a cero.

En consecuencia se realiza la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis que genera un resultado Test statistic = 6.97908 y un P-Value = 0.0305148 para el factor tiempo y Test statistic = 34,8706 y un P-Value = 4,93847E-7 para el factor dosificación cal. Con base en este análisis y dado que el valor-p es menor que 0.05 se rechaza la hipótesis nula de que las medianas de los niveles del factor dosificación suelo/cal y tiempo son estadísticamente iguales.

Valores de RCU. Se realizó una transformación estabilizadora de varianza aplicando los modelos de regresión dado por la ecuación 3 cumpliendo con los supuestos, del mismo modo en la tabla 57 se realiza el análisis ANOVA.

Tabla 57. Análisis de varianza para RCU – suma de cuadrados tipo III

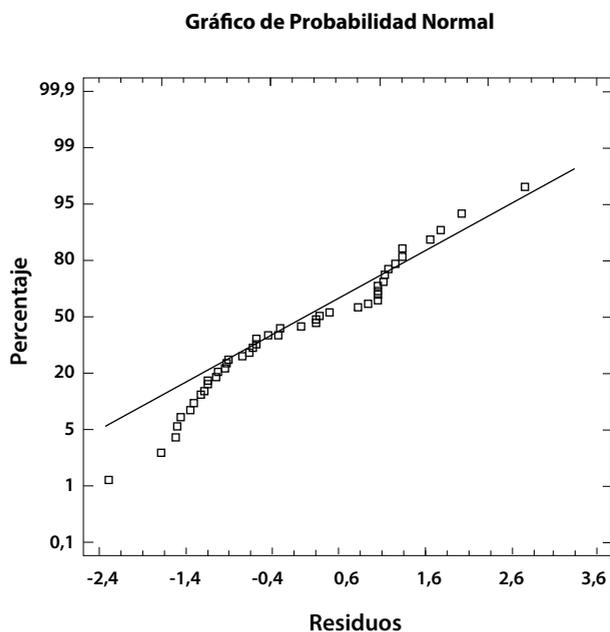
Fuente	Suma de Cuadrados	GL	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Efectos principales					
A: tiempo	34607,5	2	17303,7	8065,08	0,0000
B: porcentaje de cal	1,5678E7	4	3,91949E6	1826831,06	0,0000
Interacciones					
AB	13546,2	8	1693,27	789,21	0,0000
Residuos	64,3654	30	2,14551		
Total (corregido)	1,57262E7	44			

Fuente: GIGMA, 2018.

Los valores P indican la significancia estadística de cada uno de los factores, con ello se puede comprobar que el tiempo y el porcentaje de cal tienen una influencia estadística significativa sobre el valor de RCU.

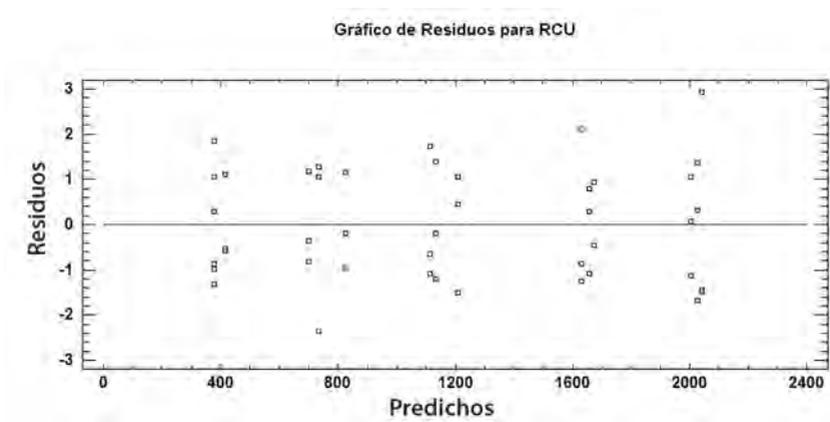
Posteriormente se realiza la verificación de los supuestos con las gráficas de probabilidad normal (figura 81) y dispersión de residuos vs. ajuste (figura 82).

Figura 81. Gráfica de probabilidad normal de residuos del modelo de regresión: RCU vs. porcentaje de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

**Figura 82. Gráfica de dispersión de residuos vs. ajuste del modelo de regresión:
RCU vs. porcentaje de cemento**



Fuente: GIGMA, 2018.

El valor de $P = 0,151628$ es mayor a $0,05$, es decir, se cumple la hipótesis nula y los residuos tienen una distribución normal.

Comparación de medias. Los resultados del análisis se realiza se muestran en las tablas 58 y 59.

**Tabla 58. Pruebas de múltiple rangos para RCU por tiempo de curado.
Método: 95,0 porcentaje LSD**

Tiempo	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
14	15	1169,75	0,378199	X
7	15	1181,27	0,378199	X
28	15	1233,48	0,378199	X

Fuente: GIGMA, 2018.

Vale la pena resaltar que para cualquier tiempo de curado se tienen diferentes respuestas, es decir, todos los niveles del factor tiempo son estadísticamente diferentes respecto al RCU.

**Tabla 59. Pruebas de múltiple rangos para RCU por porcentaje de cal.
Método: 95,0 porcentaje LSD**

Porcentaje de cal	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
2%	9	390,397	0,488252	X
3%	9	754,121	0,488252	X

Porcentaje de cal	Casos	Media LS	Sigma LS	Grupos homogéneos
4%	9	1151,32	0,488252	X
5%	9	1654,17	0,488252	X
6%	9	2024,15	0,488252	X

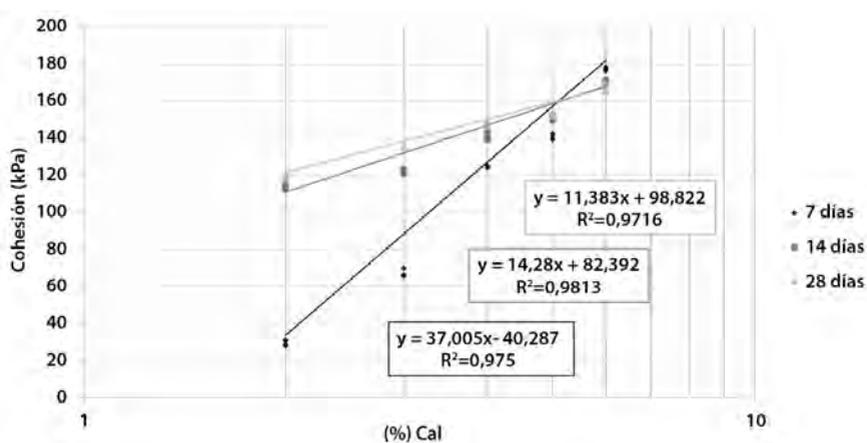
Fuente: GIGMA, 2018.

Al igual que con el tiempo de curado, las diferentes dosificaciones de cemento generan diferentes respuestas respecto al RCU.

3.6. Correlaciones

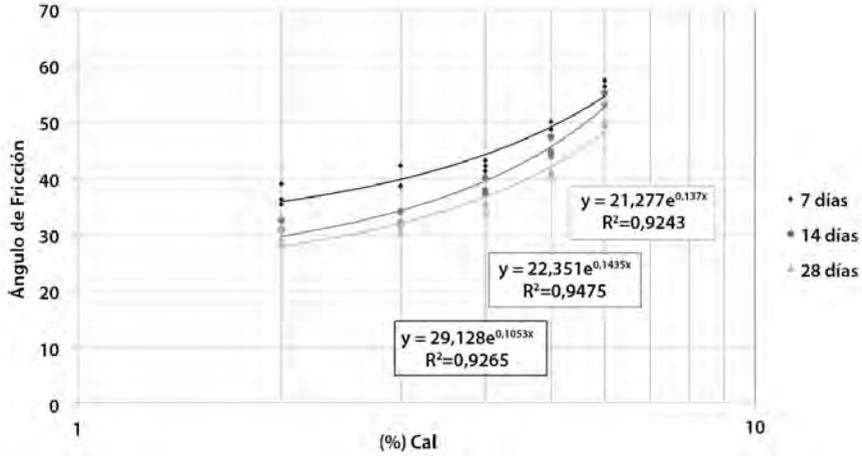
A partir de los resultados obtenidos y el análisis realizado a las variables en estudio, se realizaron un conjunto de correlaciones entre algunos parámetros como la cohesión, el ángulo de fricción y la resistencia a la compresión inconfina con respecto al porcentaje de cal y cemento adicionado. La gráficas de correlación se muestran en las figuras 83 a 88.

Figura 83. Correlación entre la Cohesión y el contenido de cal



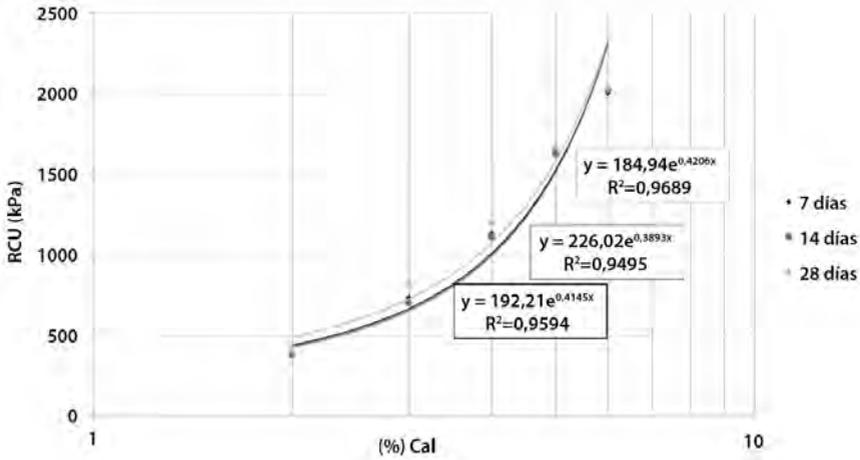
Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 84. Correlación entre el ángulo de fricción y el contenido de cal



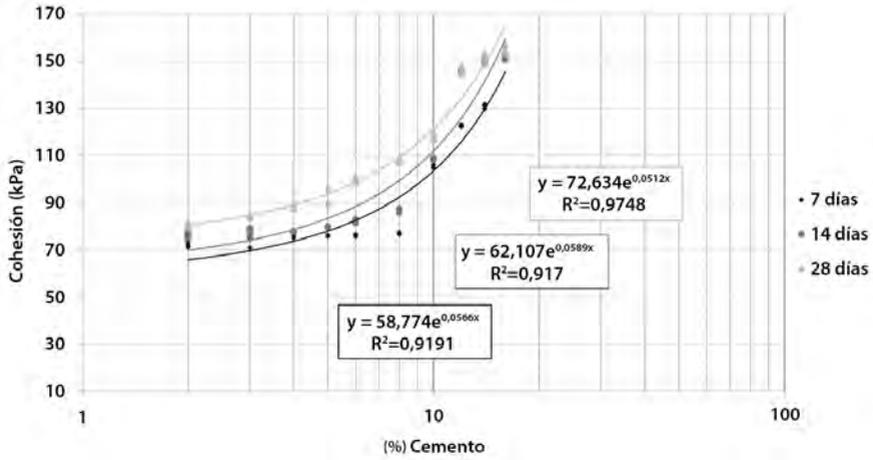
Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 85. Correlación entre RCU y el contenido de cal



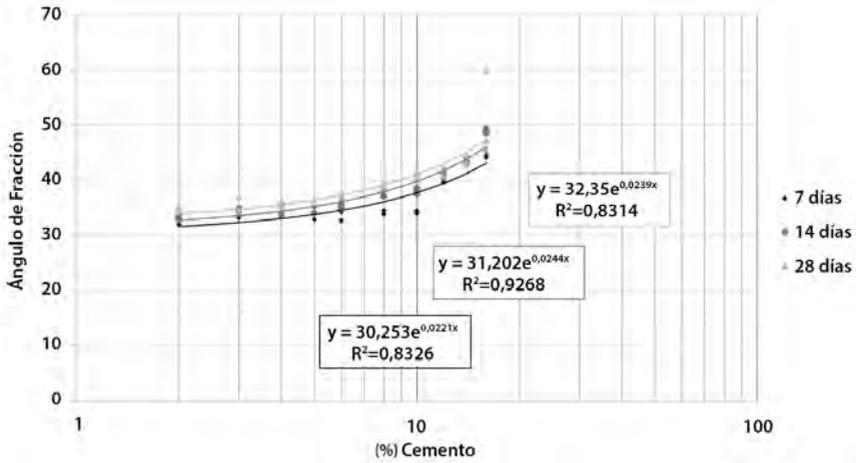
Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 86. Correlación entre la cohesión y el contenido de cemento

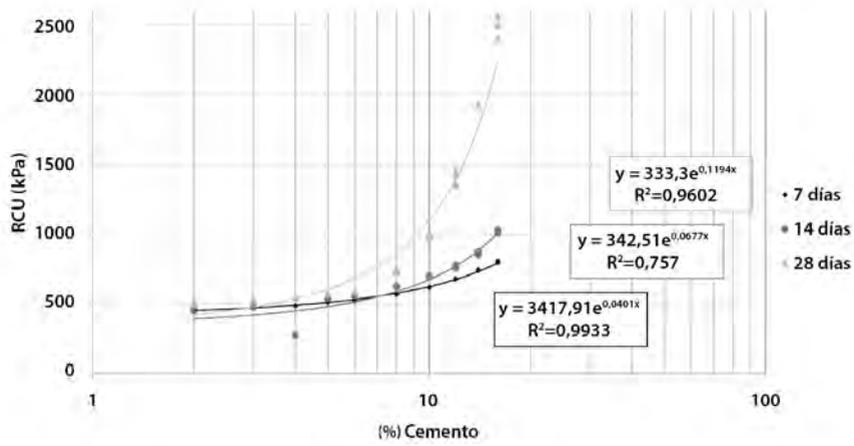


Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 87. Correlación entre el ángulo de fricción y el contenido de cemento



Fuente: GIGMA, 2018.

Figura 88. Correlación entre RCU y el contenido de cemento

Fuente: GIGMA, 2018.

CONCLUSIONES

Muchas de las características y propiedades de los suelos que son de interés en ingeniería logran mejorarse con la incorporación de material cementante. Esta mejora varía dependiendo de las proporciones empleadas, de las características específicas del suelo, el tiempo de curado y el control y la calidad en el proceso constructivo.

En el desarrollo de la investigación se utilizó un suelo residual, de tipo cohesivo, conformado por limos arcillosos de alta plasticidad de coloración marrón naranja que clasifica según el sistema unificado como un MH y según el sistema AASHTO como un A-7-5 (20), con un contenido de humedad natural de alrededor del 39% y con un bajo peso unitario de 13.6 kN/m^3 , valor que se atribuye a su alta porosidad.

A partir del ensayo de Eades y Grim indicado por la norma ASMT D-6276 para la medición del pH, el suelo analizado presenta mejor comportamiento cuando se estabiliza con porcentajes de cemento de 10% en adelante y, para el caso de la cal, con porcentajes mayores al 12%. Así mismo se pudo verificar que el pH óptimo para procesos de estabilización con cementantes hidráulicos se logra a partir del 12.4%. Este valor fue alcanzado en el caso del cemento, pero, en el caso de la cal, el máximo obtenido fue de 9.8. Esto indica que el suelo estudiado lograría una estabilización óptima con uso del cemento.

El ensayo de capacidad de intercambio catiónico permitió establecer en qué sector se podía realizar muestreo para garantizar mayor presencia de minerales de arcilla, pues, a mayor CIC, mayor será el porcentaje de arcilla en el suelo. Esto es un indicador de que al suelo se le puede realizar una estabilización con cementante hidráulico para obtener resultados adecuados.

Los resultados obtenidos muestran que la incorporación de material cementante logra una mejora significativa en un suelo plástico. Con respecto a la cal, las modificaciones físicas a corto plazo incluyen una disminución considerable del límite líquido entre 2,66% y 3,5% y en menor medida del índice de plasticidad entre 2,49% y 3,18%, y consecuentemente se encuentra una reducción del índice de plasticidad. Con respecto al cemento, el límite líquido se redujo entre un 5,00% y 19,30% y el límite de plasticidad entre 1,40% y 18,3%.

Se encontró que, para el suelo estudiado, la adición de cal produjo una disminución en la densidad seca máxima con un consecuente aumento del contenido de humedad óptima. Esta situación no se presenta cuando se adiciona cemento, pues en ese caso no se muestran variaciones apreciables en estos parámetros. Así mismo, en la medida que aumenta el tiempo de curado en mezclas del suelo con diferentes dosificaciones de cal, disminuye el ángulo de fricción pero, al mismo tiempo, se da un aumento en la cohesión. Para el caso de la adición de cemento, el comportamiento mostró que tanto el ángulo de fricción como la cohesión aumentan con el tiempo de curado

Las reacciones a largo plazo que son producto de la interacción química de los agentes estabilizadores con los minerales de arcilla del suelo son responsables del incremento significativo de la resistencia reflejado en el valor del CBR. Para la cal se obtuvo un incremento del 5,7 veces el valor inicial con el 6% de cal incorporado. Con respecto al cemento el incremento con este mismo porcentaje fue 2,5 veces el valor inicial.

Uno de los parámetros mecánicos del suelo que mejora considerablemente con la adición de cementantes es la resistencia a la compresión confinada. En el caso de la adición de cal al suelo, este parámetro se incrementó hasta 5 veces más que con la adición de cemento, esto cuando se trata de una dosificación del 6% de cementante. La mejora en la RCU que aporta la adición de cemento al suelo, para dosificaciones bajas, es casi constante y se incrementa considerablemente para dosificaciones a partir del 10%, mientras que para el caso de la cal este incremento es considerable para dosificaciones bajas incluso del orden de 2% y 3%.

Finalmente, el análisis de las micrografías ratifica varios de los resultados obtenidos, pues se puede ver como con un porcentaje de cemento al 6% se crea suficiente material gelatinoso para cubrir los flóculos y unir las partículas del suelo.

Esto aumenta la cohesión y mejora la estructura de la matriz, en cambio, con la adición de cal este incremento no es tan significativo y persiste una composición heterogénea, porosa y con baja cohesión.

Los resultados obtenidos en términos de resistencia y plasticidad representan una ventaja significativa en vías terciarias donde es común encontrar materiales con estas características, pues con la incorporación de materiales cementantes como agentes estabilizadores del suelo se logra potencializar sustancialmente las propiedades físicas como: límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad y de esfuerzo-deformación.

BIBLIOGRAFÍA



- Acosta, M.A y Alarcón, P.A. (2017). *Análisis de la cantidad y el estado de las vías terciarias en Colombia y la oportunidad de la ingeniería civil para su construcción y mantenimiento* (tesis de pregrado). Universidad Católica de Colombia. Colombia. Recuperado de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15205/1/AN%C3%81LISIS%20CANT%20Y%20EST%20V3%20COLOMBIA%20OPORT%20ING%2010%2011%202017.pdf>
- Ángel, Z y Fernando D. (2005). *El uso de la cal en la estabilización de suelos derivados de cenizas volcánicas (andosoles): un caso particular*. Trabajo de especialización. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Anon. (1985). *Lime Stabilization Construction Manual* (8 ed.). Arlington: National Lime Association.
- Anon.(1990). *Lime Stabilization Manual*. London: British Aggregate Construction Materials Industry.
- Atianza, M., Diaz, J., Fernández, J., Garrido, L., Jofré, C., Kreamer, C. y Segura, P. (2018). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Madrid: Vaquero Servicios de Publicaciones.
- Beltran, L. (1991). Expansión de los Suelos Arcillosos Parcialmente Saturados. *Ingeniería e Investigación*, 36-44. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/4902408.pdf>
- Bell, F. y Coulthard, J.M. (1990). Stabilization of clay soils with lime. *Municipal Engineer*, 7, 125-140.
- Bell, F. (1996). Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*, 42(4), 223-237.
- Bhattacharja, S., y Bhatta, J. (2003). *Comparative performance of portland cement and lime stabilization of moderate to high plasticity clay soils*. Portl. Cem. Assoc.
- Bowles, J. (1981). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. Ciudad de México: MacGraw Hill.
- Braja, M. DAS. (2001). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. Ciudad de México: Thomson Learning.

- Chamba, F. (2018). *Estudio de la tipología del suelo aplicando la metodología aashto, donde se construye el distribuidor de tráfico bella india*. Universidad Técnica de Manabala.
- Cheng, Q., Yao, K., y Liu, Y. (2018). Stress-dependent behavior of marine clay admixed with fly-ash-blended cement. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 11(6), 611-616.
- Clare, K. y Cruchley, A. (1957). Laboratory experiments in the stabilization of clays with hydrated lime. *Geotechnique*, 7(2), 97-110.
- Construdata (2014). *Informe Especial Carreteras y Vías*. Recuperado de http://www.construdata.com/BancoMedios/Archivos/construdata_news_carreteras_y_vias_feb_2014/construdata_news_carreteras_feb_2014.html
- Corporación Andina de Fomento. (2010). *Soluciones e innovaciones tecnológicas de mejoramiento de vías de bajo tránsito (Serie informes sectoriales. Infraestructura)*. Recuperado de <http://scioteca.caf.com/handle/123456789/401>
- Correa, A. (2005). *Principios básicos de ingenierías de rocas con aplicación a rocas colombianas*. Bogotá: Editorial Universidad Nacional.
- Craig, R. (2013). *Soil mechanics*. Switzerland: Springer.
- Duarte, M. y Sierra, V. (2011). *Estudio del comportamiento de un material de subrasante típico de Bogotá estabilizado con un sistema de geoceldas ante la aplicación de ciclos de carga y descarga mediante pruebas de laboratorio* (tesis de pregrado). Pontificia Universidad Javeriana. Colombia. Recuperado de <https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/7505/tesis601.pdf?sequence=1>
- Duque, G. y Escobar, C. (2002). Notas del curso Suelos I. En *Mecánica de los suelos I*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Eisazadeh, A., Kassim, K. y Nur, H. (2010). Molecular characteristics of phosphoric acid treated soils. *Engineering and Technology*, 63, 1-3.
- Giancoli, D. (2006). *Física. Principios con aplicaciones* (6 ed.). Ciudad de México: Pearson Educación.
- Higuera, C. (2010). *Estabilización de Suelos. Guías de clase*. Popayán: Universidad del Cauca.

- Higuera, C. (2011). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimento para carreteras. Volumen 1*. Tunja: Publicaciones UPTC.
- Higuera, C., Gómez, J. y Pardo, O. (2012). Caracterización de un suelo arcilloso tratado con hidróxido de calcio. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 21(32), 21-40. Recuperado de <https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/1431/1426>
- Hilt, G. y Davidson, D. (1960). Lime fixation of clayey soils. *Highway Research Board Bulletin*, (262), 20-32.
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2008). *Manual de estabilización de suelos con cemento o cal*. Recuperado de <https://civilgeeks.com/2012/03/28/manual-de-estabilizacion-de-suelos-con-cemento-o-cal/>
- Instituto Nacional de Vías. (2018). *Estado de la red vial criterio técnico*. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/informacion-institucional/8397-estado-de-la-red-vial-criterio-tecnico-segundo-semester-2018>
- Instituto Nacional de Vías. (2012). *Manual de Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras*. Recuperado de <https://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq/139-documento-tecnicos/1988-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-y-normas-de-ensayo-para-materiales-de-carreteras>
- Jeyapalan, J., Rice, G. y Lytton, R. (1981). *State-of-the-art Review of Expansive Soil Treatment Methods*. Texas: A y M University.
- Jones, C. W. (1958). Stabilization of Expansive Clay with Hydrated Lime and Portland cement. *Highway Research Board* (193).
- Kuttah, D. (2013). *Improving low-volume road construction and performance: Validity of using the heavy vehicle simulator in evaluating the reinforcement of low-volume roads*. Statens väg-och transportforskningsinstitut.
- Lambe, T. y Whitman, R. (1959). The Role of Effective Stress in the Behavior of Expansive Soils. *Quarterly*, 54(4), 33-66.
- Liu, Y., Hu, J., Li, Y. y Li, L. (2017). Statistical evaluation of the overall strength of a soil-cement column under axial compression. *Construction and Building Materials*, 132, 51-60.

- Marto, A., Latifi, N., y Sohaei, H. (2013). Stabilization of laterite soil using GKS soil stabilizer. *Electron. J. Geotech. Eng*, 18, 521-532.
- McDowell, C. (1959). Stabilization of soils with lime, lime-fly ash and other lime reactive materials. *Highway Research Board Bulletin*, 231, 60-66.
- Ministerio de Transporte. (2018). *Transporte en cifras estadísticas*. Recuperado de <https://www.mintransporte.gov.co/documentos/15/estadisticas/>
- National Lime Association (2004). *Lime-treated soil construction manual: Lime stabilization and lime modification*. The Association. Recuperado de: https://www.iom.int/sites/default/files/our_work/Shelter/documents/Lime-Stabilized-Construction-A-Manual-and-Practical-%20Guide.pdf
- Obert, L. y Duvall, W. (1967). *Rock Mechanics and the Design of Structures in Rock*. New York: Wiley.
- Oliva, C. (2010). *Estabilización de un suelo de la Formación Toledo con Cemento Portland y Sistema ROCAMIX Líquido* (tesis de pregrado). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Cuba. Recuperado de http://www.rocamix.es/TESIS/oliva_diaz_caridad_2.pdf.
- Olivera, C., Carvajal, A., Banegas, G. y Gonzales, J. (s.f.). *Mecánica de Suelos I Unitecuación*. Recuperado de <https://mecanicadesuelos1unitEcuaciónwordpress.com/>
- Ramaji, A. (2012). A review on the soil stabilization using low-cost methods. *Journal of Applied Sciences Research*, 8(4), 2193-2196.
- Sánchez, F. (2009). *Evaluación de la subrasante*. Recuperado de http://copernico.escuelaing.edu.co/vias/pagina_via/modulos/MODULO%206.pdf
- Santibáñez, D. (2004). *Ensayo de compresión no confinada*. Recuperado de <http://www.slideshare.net/JorgeVizneyChambiMamani/30512569-informeensayodecompresionsimple>
- Sherwood, P. (1993). *Soil Stabilization with Cement and Lime: State-of-the-Art Review*. London: Her Majesty's Stationery Office.
- Skempton, A. (1953). The colloidal activity of clays. *Selected papers on soil mechanics*, 106-118.

- Spangler, M. y Pratel, O. (1950) Modification of a Gumbotil Soil by Lime and Portland Cement Admixtures. En *Highway Research Board Proceedings* (vol. 29). 561-566.
- Tanco, M. (2008). *Metodología para la aplicación del diseño de experimentos (DoE) en la industria* (Disertación doctoral). Universidad de Navarra.
- Tensar Earth Technologies, Inc. (1999). *Sistemas para Pavimentos Mejoramiento de Subrasantes. Construcción Sobre Suelos Blandos*. Recuperado de http://www.tecnexsa.com/Productos/Geogrillas/br_spEcuaciónpdf
- Yao, K., Yao, Z., Song, X., Zhang, X., Hu, J. y Pan, X. (2016). Settlement evaluation of soft ground reinforced by deep mixed columns. *International Journal Pavement Research and Technology*, 9(6), 460-465.
- Zamora, N., y Barrera, O. (2013). *Diagnóstico de la infraestructura vial actual en Colombia*.
- Zapata, R. (2018) *Geología y Geotecnia. Tipos de Suelos: Caracterización de suelos arcillosos y limosos*. Rosario: Universidad Nacional de Rosario.

Este libro fue compuesto en caracteres Minion
a 11 puntos, impreso sobre papel Bond de 75
gramos y encuadernado con el método hot melt,
en diciembre de 2018, en Bogotá, Colombia.

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE SUELOS DE ALTA PLASTICIDAD ESTABILIZADOS CON CEMENTANTES

En la actualidad son varias las soluciones para mejorar los suelos con alta plasticidad y baja capacidad portante, una opción muy útil es el uso de cementantes, dada su facilidad de implementación y mejoramiento sustancial del comportamiento físico y mecánico que aporta a este tipo de suelos.

Parte de una metodología de trabajo para realizar la investigación de campo y laboratorio relacionadas con el mejoramiento de suelos con cementantes; realiza el diseño experimental que garantiza resultados representativos, establece un procedimiento de toma de muestras en campo y los diferentes ensayos de laboratorio que permiten establecer el comportamiento físico y de esfuerzo-deformación para suelos de alta plasticidad tratados con materiales cementantes. Finalmente, muestra un análisis comparativo entre los resultados del suelo no tratado y aquel mezclado en diferentes proporciones con el material propuesto.

Este libro hace parte de los trabajos desarrollados por el grupo de Investigación en Construcción, Geotecnia y Medio Ambiente – GIGMA, en la línea de mejoramiento de suelos. Dirigido a estudiantes, docentes, profesionales e investigadores en el área de la ingeniería relacionada con geotecnia, específicamente a lo que compete con el mejoramiento de suelos y desarrollo de proyectos que presenten esta necesidad.



Universidad Francisco de Paula Santander
Ocaña - Colombia
Vigilada Mineducación



GIGMA
Grupo de Investigación en Construcción
Geotecnia y Medio Ambiente

Incluye

- ▶ Guía para realizar un diseño experimental en proyectos de investigación con características similares.
- ▶ Resultados que pueden ser aplicados en proyectos de ingeniería, en particular, proyectos relacionados con mejoramiento de subrasantes.
- ▶ Análisis del comportamiento de mezclas con cementantes estableciendo el efecto, en el tiempo que estos se producen cuando son adicionados a suelos con deficiente comportamiento ingenieril.

Romel Jesús Gallardo Amaya

Ingeniero Civil de la Universidad Industrial de Santander UIS, Especialista en Práctica de Docencia Universitaria de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Especialista en Ingeniería Ambiental y Magister en Geotecnia de la Universidad Industrial de Santander. Director del grupo de investigación GIGMA y coautor del libro *Inestabilidad de laderas. Procesos constructivos de estabilización* (2012).

Luis Eduardo Gómez Pérez

Ingeniero Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, investigador del grupo GIGMA y profesional de apoyo técnico sub-oficina ACNUR Cúcuta, Norte de Santander.

William Ferney Guillín Acosta

Ingeniero Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, investigador del grupo GIGMA e ingeniero residente de proyectos de ingeniería.

ISBN 978-958-771-691-7



9 789587 716917