

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE SUELOS
ARCILLOSOS DE BAJA PLASTICIDAD MEDIANTE EL USO DEL CEMENTO
PARA CAPA DE RODADURA EN VÍAS Terciarias**



STEWART CAMARGO VASQUEZ
JUAN SEBASTIAN DURAN VERGARA

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS

2018

**EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE SUELOS
ARCILLOSOS DE BAJA PLASTICIDAD MEDIANTE EL USO DEL CEMENTO
PARA CAPA DE RODADURA EN VÍAS Terciarias**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOTECNIA MATERIALES, VÍAS Y TRANSTITO
(GEOMAVIT)**

LINEA DE INVESTIGACION: MATERIALES Y VÍAS

INVESTIGADORES:

STEWART CAMARGO VASQUEZ

JUAN SEBASTIAN DURAN VERGARA

**Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de
INGENIERO CIVIL**

**Director.
ING. RAMON TORRES**

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

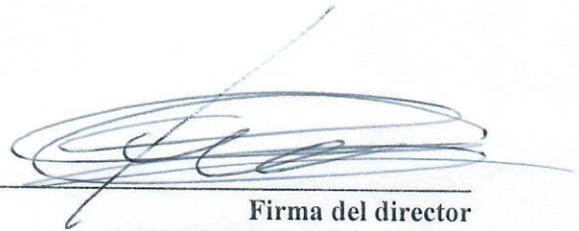
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

CARTAGENA DE INDIAS

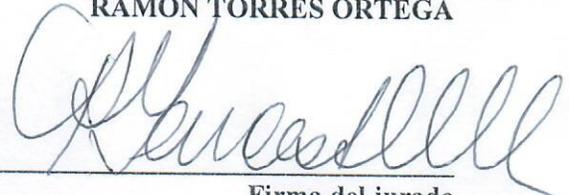
2018

Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias

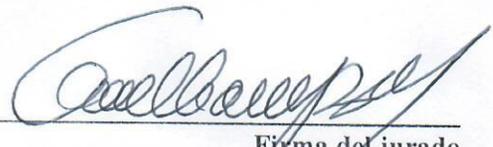
NOTA DE ACEPTACION



Firma del director
RAMON TORRES ORTEGA



Firma del jurado
**PATRICIA ISABEL GARCÉS DEL
CASTILLO**



Firma del jurado
**GUILLIAM RAFAEL BARBOZA
MIRANDA**



TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
LISTA DE TABLAS	6
TABLA DE ILUSTRACIONES.....	8
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	14
1. MARCO DE REFERENCIA	18
1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	18
1.2 MARCO TEORICO.....	23
1.2.1 El suelo.....	23
1.2.1.1 Formación del suelo	23
1.2.1.2 Propiedades químicas del suelo	23
1.2.1.3 Propiedades físicas del suelo.....	24
1.2.1.4 Propiedades mecánicas del suelo	26
1.2.2 Clasificación del suelo	27
1.2.2.1 Clasificación de los suelos según el SUCS	28
1.2.2.2 Clasificación de los suelos según la AASHTO.....	30
1.2.3 Análisis del suelo	32
1.2.3.1 Humedad natural	32
1.2.3.2 Limites de Atterberg	34
1.2.3.2.1 Limite líquido.....	34
1.2.3.2.2 Limite plástico.....	35
1.2.3.2.3 Compactación.....	36
1.2.3.3 CBR.....	37
1.2.3.3.1 Correlación del CBR con la resistencia a la compresión inconfiada	39



Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias



1.2.4 Estabilización de suelos	40
1.2.5 Cemento Portland.....	41
1.2.5.1 Composición química del cemento Portland.....	41
1.2.5.2 Fraguado.....	42
1.2.5.3 Elementos que influyen en el fraguado	43
1.2.5.4 Resistencia del cemento	44
1.2.6 Suelo-cemento.....	44
1.2.6.1 Fenómenos químicos entre el suelo y el cemento Portland	45
1.2.6.2 Ventajas del suelo cemento.....	45
1.2.6.3 Suelos aptos para mezclas de suelo-cemento.....	46
1.2.7 Resistencia a la compresión inconfiada de cilindros.....	48
1.2.8 Estructura de pavimento.....	48
1.2.8.1 Subrasante constituida por limos plásticos y arcillas.....	50
2. OBJETIVOS	51
2.1 OBJETIVO GENERAL	51
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	51
3. ALCANCE.....	52
4. METODOLOGÍA	55
4.1 Análisis de la muestra para la clasificación del suelo típico de Membrillar	57
4.1.1 Análisis granulométrico del suelo por tamizado	58
4.1.2 Determinación del contenido de agua, humedad natural de los suelos.....	59
4.1.3 Determinación del límite líquido de los suelos.....	60
4.1.4 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos	61
4.2 Análisis y determinación de densidad máxima seca y humedad optima	62
4.3 Determinación de la expansividad del suelo.....	63
4.4 Análisis y cálculo de la relación de soporte de California CBR	64



4.5 Análisis comparativo y bibliográfico para la obtención del porcentaje de cemento óptimo en peso	65
4.6 Obtención de la cantidad de agua para la mezcla de suelo-cemento	65
4.7 Cálculo de la resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento	66
4.9 Análisis de precio unitario comparativo para una capa de rodadura estabilizada con suelo-cemento y un pavimento flexible	68
4.10 Preparación de resultados y análisis comparativo.....	69
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
5.1 Clasificación y propiedades mecánicas del suelo	70
5.2 Determinación de la densidad seca máxima y la humedad óptima del suelo	74
5.3 Evaluación de la expansividad del suelo.....	76
5.4 Determinación Relación de Soporte de California CBR.....	77
5.5 Cálculo de la cantidad de óptima de agua para la mezcla de suelo-cemento.....	84
5.6 Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de suelo-cemento .	86
5.7 Correlación CBR suelo-cemento en base a la resistencia a la compresión inconfina.....	88
5.8 Calculo de desgaste de cilindros de suelo-cemento	90
5.9 Análisis de precios unitarios y económicos de estructuras de pavimentos.....	90
6. CONCLUSIONES	94
7. RECOMENDACIONES	97
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	100



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tamaños de las partículas de un suelo	25
Tabla 2. Símbolos de grupo (SUCS).....	28
Tabla 3. Tipología de suelos (SUCS).....	29
Tabla 4. Clasificación de suelos método AASHTO.....	32
Tabla 5. Clasificación de riesgo potencial de expansividad de un suelo.	38
Tabla 6. Límites de composición aproximados para cemento Portland (Tipo 1).	42
Tabla 7. Clasificación de suelos aptos para las mezclas de suelo cemento.	47
Tabla 8. Contenidos de cemento aproximados para proyectar las mezclas de suelo-cemento	47
Tabla 9. Humedad natural de muestra secada en el horno.	70
Tabla 10. Granulometría de la muestra de suelo.	71
Tabla 11. Cálculo del límite líquido para la muestra de suelo.	72
Tabla 12. Cálculo del límite plástico para la muestra de suelo.	73
Tabla 13. Datos tabulados de pesos del material y cálculo de densidades.	74
Tabla 14. Porcentaje contenido de humedad de compactación.....	75
Tabla 15. Porcentaje contenido de humedad óptima y densidad máxima.	76
Tabla 16. Porcentaje de expansión máxima del suelo.	77
Tabla 17. Lectura de Penetración CBR de Suelo Arcilloso a 56 Golpes.....	78
Tabla 18. Relación Densidad Máxima vs CBR máximo	78
Tabla 19. Lectura de Penetración CBR de Suelo Arcilloso a 26 Golpes.....	79
Tabla 20. Relación Densidad Máxima vs CBR máximo	80
Tabla 21. Lectura de Penetración CBR de Suelo Arcilloso a 12 Golpes.....	81
Tabla 22. Relación Densidad Máxima vs CBR máximo	81
Tabla 23. Promedios de CBR y Densidad máxima seca.....	82
Tabla 24. Clasificación y uso de suelo según el valor de CBR.....	83
Tabla 25. Datos tabulados de pesos y cálculo de densidad.....	84
Tabla 26. Porcentaje contenido de humedad de compactación.....	85
Tabla 27. Porcentaje contenido de humedad óptima y densidad máxima.	86
Tabla 28. Resistencia de los cilindros de suelo cemento estabilizado al 10%	87
Tabla 29. Resistencia de los cilindros de suelo cemento estabilizado al 12%	88
Tabla 30. Resistencia de los cilindros de suelo cemento estabilizado al 14%	88



Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias



Tabla 31. APU Capa de rodadura Suelo-Cemento.....	91
Tabla 32. APU de tratamiento superficial simple con emulsión CRR-2	92
Tabla 33. Análisis de Precio Unitario Pavimento Flexible	93



TABLA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Perfilado y compactación de motoniveladora	22
Ilustración 2. Composición del suelo	24
Ilustración 3. Reacción del suelo ante cargas aplicadas.....	26
Ilustración 4. Carta de Casagrande para suelos cohesivos.....	30
Ilustración 5. Límites de Atterberg.	34
Ilustración 6. Cazuela de Casagrande.	35
Ilustración 7. Martillos utilizados en las pruebas Proctor estándar y modificada.....	36
Ilustración 8. Principios de compactación	37
Ilustración 9. Aparato para determinar el CBR.....	39
Ilustración 10. Estructura convencional del pavimento flexible.....	49
Ilustración 11. Estructura convencional del pavimento rígido.....	49
Ilustración 12. Localización de Membrillal.	52
Ilustración 13. Área de estudio de Membrillal.....	53
Ilustración 14. Esquema de la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto. .	56
Ilustración 15. Zona de extracción de muestras	57
Ilustración 16. Extracción de suelos típicos de Membrillal	58
Ilustración 17. Estufa con muestra en el recipiente.....	59
Ilustración 18. Serie de tamices para granulometría.	59
Ilustración 19. Horno de secado con muestras en los recipientes.....	60
Ilustración 20. Cazuela de Casagrande usado en el laboratorio.....	61
Ilustración 21. Muestra tamizada, humedecida y lista para compactación.....	62
Ilustración 22. Muestra compactada en el molde lista para enrasar.....	63
Ilustración 23. Moldes con sus contrapesos y piscina de inmersión.....	64
Ilustración 24. Mezclado de suelo-cemento.....	66
Ilustración 25. Especímenes de Suelo - Cemento	67
Ilustración 26. Pantalla de máquina universal WizardBasic Fuente: Autores, 2018	68
Ilustración 27. N° de Golpes Vs Humedad (%).....	72
Ilustración 28. Contenido de humedad (%) VS Densidad seca o Peso seco (Lb/pie ³)...75	
Ilustración 29. Gráfica de Carga (PSI) vs Penetración (in).....	79
Ilustración 30. Gráfica de Carga (PSI) vs Penetración (in).....	80
Ilustración 31. Gráfica de Carga (PSI) vs Penetración (in).....	82



Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias



Ilustración 32. Densidad seca máxima vs CBR	83
Ilustración 33. Contenido de humedad (%) VS Densidad seca o Peso seco (Lb/pie3)...	85
Ilustración 34. Prueba de compresión de cilindros con maquina universal.	87



RESUMEN

Los pavimentos son los elementos estructurales vitales que intervienen en la construcción de carreteras. En este proyecto emplearemos el suelo-cemento como alternativa para una capa de rodadura en vías de tercer orden. El proyecto investigativo se desarrolló en la Ciudad de Cartagena, Bolívar. La zona estudiada fue en Membrillal, perteneciente al corregimiento de Pasacaballos, esta vereda presenta vías en malas condiciones de transitabilidad, situación que empeora con el tránsito vehicular y épocas de lluvias.

El presente proyecto tiene como objetivo evaluar las propiedades mecánicas del suelo en la vereda de Membrillal, en donde, se realizaron diferentes ensayos y diferentes estudios de las variables que se relacionan para determinar la clasificación del suelo como lo son el contenido de agua, granulometría, límites de Atterberg.

Los límites de Atterberg permiten obtener los límites del rango de humedad dentro del cual el suelo se mantiene en estado plástico, estos se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos para el cálculo de estas variables, se realizaron diferentes ensayos de límites de Atterberg en donde se emplea la cazuela de Casagrande y el método para el cual el suelo se fractura al ser amasado en bastoncitos de 3mm. En ese orden de ideas se obtiene un límite líquido de 33.19%, un límite plástico de 18% y un índice de plasticidad de 15.19%. Con estos datos se realiza la clasificación granulométrica que consta de una serie de mediciones y graduaciones que tiene como fin la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas del suelo, en ese orden de ideas, el presente proyecto de grado clasifica el suelo según la ASSHTO como un suelo tipo A-6 y según la SUCS es un tipo de suelo CL que significa que es una arcilla de baja plasticidad, por factores de diseño se utilizara como referencia la clasificación según la ASSHTO.

En ese orden de ideas se analizan otras variables como la determinación del contenido de agua, determinación de la densidad seca, expansividad. Los análisis de estas variables fueron trascendentales al momento de realizar el ensayo de Relación de Soporte de California (CBR) del suelo estudiado, obteniendo un CBR de 6.22% clasificándolo generalmente como un suelo muy pobre a regular. Antes de aplicar la tecnología de suelo-cemento se debía conocer tanto la cantidad de cemento y agua que debía llevar el suelo,



Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias



para la cantidad de cemento fue menester un análisis de información bibliográfica en donde se establece un rango de suelo cemento de 10% a 15%. A partir de esto se realizaron 3 cantidades de cemento: 10%, 12% y 14% para así obtener un porcentaje óptimo de suelo cemento, estableciendo un 12% de cemento en peso. A su vez la mezcla alcanzaba una máxima densidad seca cuando se llevaba a una humedad del 18%. Con esta estabilización se logró un aumento de la capacidad de soporte de 30.00% utilizando una correlación estadística encontrada a partir de fuentes bibliográficas, la cual permite calcular el CBR en estado saturado a partir de la resistencia a la compresión inconfiada. En ese sentido se obtiene una resistencia a la compresión de los cilindros de 74.87 PSI, estos valores fueron bajos, debido al gran contenido de arcilla presente en el suelo y se pueden aumentar colocando una capa granular de aproximadamente 15 cm como mínimo y agregando sobre esta un tratamiento superficial simple con emulsión asfáltico CRR-2 de gradación 13 que tiene por objetivo proteger la capa de rodadura contra el efecto abrasivo de los neumáticos y proteger la estructura vial contra las acciones climáticas en invierno garantizando una mayor durabilidad.

Por último se evaluara el suelo-cemento como una alternativa más favorable desde el aspecto económico para las comunidades rurales, en ese orden de ideas se compara una alternativa utilizando los análisis de precios unitarios con un pavimento flexible contra una alternativa de capa de rodadura con suelo-cemento, los costos iniciales obtenidos para cada tipo de pavimento son \$ 287.663,7 por m³, respecto a un costo de pavimento flexible de \$ 566.618,20 por m³, respectivamente, observando que un suelo-cemento es mucho más viable económicamente.



ABSTRACT

The pavements are the vital structural elements that intervene in the construction of roads. In this project, we will use soil-cement as an alternative for a third-order road course. The research project was developed in the City of Cartagena, Bolívar. The area studied was in Membrillal, belonging to the district of Pasacaballos, this road has roads in poor conditions of traffic, a situation that worsens with vehicular traffic and rainy seasons.

The present project aims to evaluate the mechanical properties of the soil in the village of Membrillal, where different tests and different studies of the related variables were carried out to determine the classification of the soil such as water content, granulometry, Atterberg limits.

Atterberg's limits allows to obtain the limits of the humidity range within which the soil is kept in a plastic state, these are used to characterize the behavior of the fine soils for the calculation of these variables, different tests were carried out in which a liquid limit of 33.19%, a plastic limit of 18% and a plasticity index of 15.19%. With these data the granulometric classification is made that consists of a series of measurements and graduations that has as purpose the quantitative determination of the distribution of sizes of particles of the soil, in that order of ideas, the present project of degree classifies the soil according to the ASSHTO as a soil type A-6 and according to the USCS is a type of soil CL which means that it is a clay of low plasticity. by design factors, the classification according to ASSHTO will be used as a reference.

In this order of ideas, other variables are analyzed, such as the determination of water content, determination of dry density, expansiveness. The analysis of these variables was transcendental now of performing the California Support Ratio (CBR) test of the studied soil, obtaining a CBR of 6.22%, classifying it generally as a very poor soil to be regulated. Before applying soil-cement technology, it was necessary to know the amount of cement and water that the soil had to carry, for cement it was necessary to analyze bibliographic information where a range of soil cement of 10% was established. Fifteen%. From this, 3 quantities of cement were made: 10%, 12% and 14% in order to obtain an optimum percentage of cement soil, establishing 12% cement by weight. At the same time, the mixture reached a maximum dry density when it was brought to a humidity of 18%. With



Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias



this stabilization, an increase of the support capacity of 30.00% was achieved using a statistical correlation found from bibliographic sources, which allows calculating the CBR in saturated state from the unconfined compressive strength. In this sense, a resistance to the compression of the cylinders of 74.87 PSI was obtained these values are low, can be increased by placing a granular layer of at least 15 cm and adding on this simple surface condition with asphalt emulsion CRR-2 gradation 13 which aims to protect the tread against the abrasive effect of tires and protect the road structure against climatic actions in winter, guaranteeing greater durability.

Finally, soil-cement is evaluated as a more favorable alternative from the economic point of view for rural communities. In this order of ideas, an alternative is compared using the unit price analysis with a flexible pavement against an alternative layer of tread with soil. -sure, the initial costs obtained for each type of pavement are \$ 287.663,7 per m³, compared to a flexible pavement cost of \$ 566,618.20 per m³, respectively, noting that a soil-cement is much more economically viable.



INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico alcanzado por las sociedades modernas en las últimas décadas ha brindado la posibilidad de producir continuamente toda una serie de nuevos materiales que les permiten satisfacer sus incesantes requerimientos de construcción. Uno de esos materiales que han logrado tener un amplio uso a partir de la década de los cuarenta es el producto endurecido de la mezcla compactada de suelo con cemento y agua, llamado suelo-cemento, cuyas bondades ingenieriles se han demostrado en la construcción de pequeñas y grandes obras en todo el mundo. El tratamiento del suelo con cemento ha sido considerado en las notas históricas de la ingeniería como un aporte importante al desarrollo tecnológico, principalmente porque permite ampliar de manera considerable la utilización de casi todos los suelos como materiales de construcción.

El suelo-cemento es un material producto de una mezcla apropiada de suelo, cemento y agua, que se compacta y construye con determinadas técnicas y tiene un campo de aplicación muy amplio (Eduardo, 2014). En este proyecto será empleado como capa de rodadura para vías de tercer orden; es menester aclarar que la implementación de esta tecnología es relativamente fácil de usar y los materiales que lo componen son económicos, ya que los costos de transporte de materiales se disminuiría, abundantes en su producción y comercialización como es el caso del cemento y sostenibles debido a que se emplea suelo local, evitando así, que se exploten nuevos yacimientos de agregados o que se reduzca las reservas de los existentes.

Es por esto que durante la implementación de proyectos en vías de tercer orden se presentará frecuentemente la posibilidad de que mediante la aplicación de un tratamiento adecuado se logre cumplir con las normas especificadas y con ello se puedan aprovechar los mismos suelos donde se realiza el proyecto. Todas estas investigaciones relacionadas con la implementación del suelo-cemento se derivan de la necesidad de hacer frente a los problemas de ingeniería relacionados con la estabilización de suelos. Los fenómenos de la expansividad y baja resistencia de los suelos arcillosos, ha pasado, en los últimos años, al primer plano de la actualidad geotécnica, debido a las múltiples investigaciones que se hacen año tras año sobre los riesgos y consecuencias que trae un nulo tratamiento de los



suelos arcillosos sobre las estructuras, representando así, un mayor reto y cuidado para los profesionales de la construcción.

En América Latina, las primeras experiencias de implementación de la tecnología suelo cemento fueron realizadas en Argentina y El Salvador una vez terminada la segunda guerra mundial. En el caso del país suramericano cuenta con un amplio recorrido en la utilización de suelo-cemento para la estabilización de sus suelos, tanto en obras viales donde se han construido más de 1.500 km de bases y subbases de suelo cemento, como en los diferentes tipos de estructura, tales como urbanizaciones rurales.

A comienzos del siglo XXI se presentó otro caso en Latinoamérica y fue el de República Dominicana que se vio obligado a hacer uso de la tecnología de suelo-cemento debido a que el gobierno carecía de muy pocos recursos para el desarrollo de infraestructura que era necesaria para suplir necesidades básicas de la población isleña. En esa época el país no contaba con un esquema de normas que rijan este tipo de construcciones viales, lo que implica falta de uniformidad en el uso del cemento en infraestructuras de este tipo (ADOCEM, 2013).

En Colombia la implementación de la tecnología suelo-cemento se ha llevado a cabo en el interior del país, un caso de este se presenta en la zona rural de Rionegro, en donde se están construyendo aproximadamente 144 kilómetros de vías aplicando la estrategia del suelo-cemento, que busca mejorar la movilidad de las vías rurales del municipio de Antioquia, y la calidad de los habitantes de las diferentes veredas. Este es un claro ejemplo de soluciones factibles para zonas rurales, debido a que la implementación de la tecnología reduce el contenido de humedad del suelo, permitiendo una adecuada compactación en menor tiempo, reduce costos por volumen, permite sostener las estructuras de pavimento con mantenimientos superficiales menos costosos e invasivos que las estructuras tradicionales.

Partiendo de los antecedentes planteados, se pueden analizar diversas razones de la aplicación de los tratamientos con cemento a los suelos arcillosos en vías de tercer orden y estas consisten, en primer lugar, las poblaciones rurales, un claro ejemplo es la Vereda de Membrillal, son comunidades de muy bajos recursos económicos, es una zona prácticamente abandonada por el gobierno, en donde, no invierten en soluciones de infraestructura ni movilidad, es por esto que una implementación de suelo-cemento como



capa de rodadura en estas vías sería muy factible y económico. En segundo lugar, Las fases de construcción para la ejecución de estos proyectos son muy sencillos de realizar, adicional a esto, se utilizan maquinarias simples, permitiendo reducir substancialmente el tiempo de construcción y los costos.

Membrillal es una vereda jurisdicción del corregimiento de Pasacaballos de Cartagena de Indias, donde se encuentran la presencia de suelos arcillosos y la carencia de una infraestructura vial optima que le garantice una buena movilidad a la comunidad, ocasionando así problemáticas de diversas índoles como lo son los atrasos económicos, sociales, ambientales y de salud, por ende, la necesidad de afrontar las problemáticas de presencia de suelos arcillosos y la falta de estructuras viales de una manera óptima y oportuna. A los problemas mencionados anteriormente se suma el incremento acelerado de la población y el desplazamiento rural que han llevado a esta población a vivir en condiciones inadecuadas, invadiendo y refugiándose en terrenos no aptos para la urbanización, ni pavimentación.

Bajo el conocimiento de las problemáticas a las que se enfrenta el país en cuanto a bajo desarrollo de vías de tercer orden y la problemática presentada en la población de Membrillal, la importancia del desarrollo de este proyecto radica en la implementación de la tecnología de suelo-cemento, modificando las características del suelo natural y su utilidad como capa de rodadura, esto sería fundamental para el medio ambiente evitando explotar nuevos yacimientos, asimismo, estructuralmente elevando la resistencia y conformando así una superficie uniforme que permita la circulación de vehículos, beneficiando a la población de Membrillal y al distrito con proyectos de ingeniería de vías con menores recursos económicos y así mejorar la malla vial del distrito, departamento y país.

La zona a estudiar exactamente es Membrillal, cerca de la zona Industrial de Mamonal y pertenece al corregimiento de Pasacaballos que a su vez hace parte del municipio de Cartagena de Indias, al Sureste (SE) de la Ciudad. Con una latitud: 10° 20' 40" N y longitud: 75° 28' 16" W.

De acuerdo a todo lo que se expuso anteriormente, el presente proyecto de investigación se pretendió estudiar la viabilidad de la implementación de la tecnología de suelo-cemento como agente estabilizante y capa de rodadura en vías de tercer orden en la vereda



Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias



de Membrillal mediante el uso de procesos experimentales del suelo local, que permitan una superficie uniforme y resistente ante la acción de las cargas del tránsito y la acción de los efectos producidos por el medio ambiente, teniendo en cuenta las condiciones geotécnicas de la zona y su mejoría con el porcentaje óptimo de cemento, así como la clasificación y las propiedades mecánicas del suelo en estado natural. Este escenario permite ampliar las bases conceptuales referentes a nuevos proyectos a futuros en cualquier zona rural del país, generando un aporte la investigación fomentada por el grupo de investigación Geotecnia, Materiales, Vías y Transito (GEOVAMIT), el cual contempla la línea de investigación en Materiales del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena, promoviendo proyectos rurales con una implementación de una tecnología muy económica y duradera, proyectando a la Universidad de Cartagena en su labor de liderazgo en procesos de carácter económico, ambiental, constructivo e investigativo.



1. MARCO DE REFERENCIA

En esta sección se profundizará en la teoría aceptada acerca de la estabilización de suelos arcilloso mediante el suelo-cemento y su viabilidad como capa de rodadura en vías de tercer orden. También se hará descripción de investigaciones recientes sobre el tema, por sobre todo aquellas referentes al uso del suelo-cemento como capa de rodadura en construcción de estructuras viales, complementando como material estabilizante de suelos arcillosos de investigaciones a nivel nacional e internacional. La sección estará constituida entre una primera parte de antecedentes y estado del arte, y una segunda parte sobre el marco teórico.

1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Los análisis de la información relacionada con la estabilización de suelos arcillosos usando la tecnología del suelo-cemento y utilizados como capa de rodadura para la solución de vías terciarias en la vereda de Membrillal, es una herramienta fundamental para la comprensión del problema que concierne al proyecto de investigación, lo cual implica una investigación y análisis de la literatura referente a la problemática y las soluciones que fueron planteadas. En ese orden ideas se presentan aspectos fundamentales de estudios realizados a nivel nacional e internacional en torno al uso de suelo-cemento como capa base de rodadura para la implementación en vías terciarias, debido a la falta de factores económicos, sociales y ambientales en las zonas rurales.

Esta idea surge de la necesidad que tiene la población rural para una mejor calidad de vida, desde los ámbitos sociales, culturales, ambientales y por último los económicos. Estas investigaciones son menesteres para llevar a cabo todos los ámbitos mencionados anteriormente, y así abrir nuevos enfoques a la ciencia aplicadas en la comunidad, uno de estos enfoques a las comunidades rurales, se puede observar en un estudio muy reciente que se realizó en Rionegro-Antioquia, el cual se recuperaron más de 140 kilómetros de vías rurales implementado la tecnología del suelo-cemento, haciendo suelos más durable y que permiten soportar los cambios de clima sin deteriorarse con facilidad. También que el costo



es cuatro veces menor que la pavimentación, por ende, este es uno de los factores más viables para aplicar en vías de tercer orden (Gomez, 2011).

El punto de partida comienza en el sistema de carreteras del imperio romano, donde se construyó muchos de sus trayectos con la estabilización de los suelos con cementantes hidráulicos, con el paso del tiempo las civilizaciones más avanzadas emplearon nuevas técnicas de construcción para mejorar sus vías de comunicación, convirtiéndose la calidad de las mismas en un indicador de desarrollo. (Gomez, 2011). Desde hace más de 80 años, en diversas partes del mundo, aunque no de forma masiva y generalizada, el suelo-cemento, se viene empleando en la construcción de base y sub-base de carreteras, caminos, aeropuertos, calles y en la ejecución de edificaciones de viviendas. Durante los últimos años la mezcla de suelo cemento se ha empleado en la construcción de canales y otras obras relacionadas con la rama hidráulica. (Corral, 2008)

El hombre ha implementado la tierra como material para llevar a cabo sus construcciones; diversas técnicas constructivas se han experimentado, pasando por adobe, tapia y bahareque, y actualmente la combinación de la tierra con otros materiales ha permitido mejorar sus propiedades, así como la durabilidad de los mismos. Respectivamente, (Corral, 2008) afirma que debido a la abundancia del suelo es totalmente justificable su utilización por su amplia disponibilidad y bajo costo. De igual forma las técnicas de construcción en las que se emplean los suelos son sencillas y no requieren de grandes equipos, lo que facilita su autoconstrucción y empleo.

El suelo-cemento es simplemente la mezcla de tierra con cemento y agua, que compactado y curado, sirve para obtener un material con buena resistencia a la compresión, prácticamente impermeable, estable en el tiempo y muy económico. Su aplicación, comenzó entre 1910 y 1920. Donde Brooke Bradley lo empleo con gran éxito en la construcción de carreteras inglesas en 1917. Sin embargo, la técnica no fue utilizada regularmente en los años posteriores. Por lo contrario, en los EEUU, ese mismo año, Joseph Amies patento una mezcla de suelo con cemento llamada "Soilamies". (Quintanilla, 2006)

En los ámbitos internacionales se tiene que (Halsted, 2006) afirmo que la estabilización de suelos y agregados para propósitos de vías ha existido por más de un siglo, las bases tratadas con suelo cemento se utilizaron en 1935 para mejorar la vía de la carretera estatal



41 cerca de Johnsonville, Carolina del Sur. Hoy en día, hay miles de kilómetros de pavimentación de suelo tratados con cemento en cada estado de los Estados Unidos y en todas las provincias canadienses están proporcionando un buen servicio con bajos costos de mantenimiento, todo está da lugar a que la tecnología suelo cemento fue utilizado como base para un pavimento asfáltico o rígido, mas no como una capa de rodadura.

En España y Latinoamérica, las primeras experiencias de implementación de la tecnología suelo cemento comenzaron en 1945, luego de concluida la segunda guerra mundial, teniendo Argentina y El Salvador más de 50 años de experiencia en la construcción de caminos que usan suelo-cemento como material. A partir de 1970 a la fecha, se ha generalizado su uso alrededor del mundo. (Quintanilla, 2006)

En Argentina, se han construido más de 1.500 km de bases y subbases de suelo cemento, ejecutados con pavimentadoras. Si bien el país tiene una larga tradición en el empleo de suelo cemento como material de uso vial, a fines de los años 1970, a la par de la disminución de protagonismo de los pavimentos como alternativa estructural, comienza también a perder vigor la utilización de bases cementadas, en la construcción de carreteras. Esta discontinuación en la ejecución de suelo cemento, sumado a la carencia general de capacitación y entrenamiento en la especialidad vial, han generado una marcada necesidad de conocimientos e instrucción de técnicos y operadores de equipamiento relacionado con esta actividad. (Instituto del Cemento Portland Argentino, 2015)

Una investigación de campo realizada en octubre del 2000, en el College Station condado de Texas, plantea un enfoque diferente, el cual busca minimizar la cantidad de agrietamiento por encogimientos en bases de suelo-cemento. Este enfoque se denomina microfisuración, en donde se demuestra que tres calles de la ciudad mencionada anteriormente, son sometidas a diferentes pruebas empleando la tecnología suelo-cemento con microfisuración, arrojando resultados de una resistencia de 500 psi a los 7 días de curados, y un contenido de cemento del 6% al 8%, así también se obtienen datos negativos, donde se observó fisuras de contracciones considerables. (Scullion, 2001). Para mitigar estos problemas la investigación de Texas, se basa en unas pruebas realizadas en Austria, donde compactan el suelo con un máximo de cuatro pasadas con un rodillo vibratorio mecánico, que introduce una red de grietas en la base temprana con la idea de



minimizar la contracción de fisuras de la base de suelo-cemento. (Pennsylvania Transportation Institute, 1995). Esta investigación finalmente dio resultados a los 21 días de fraguado, donde se registró la máxima rigidez y se controló la deflexión. Esto da a conocer que la implementación de suelo-cemento como capa de rodadura si es posible, mitigando las fisuras del suelo con máquinas vibratorias, alcanzando su grado máximo de compactación y eficiencia. (Scullion, 2001)

Por último, en el ámbito internacional, se encuentra República Dominicana quienes en los años 2000 emplean la tecnología suelo cemento para materiales de construcción, debido a la crisis de índole social impuesta por las limitaciones económicas de una amplia porción de la población mundial. (Mas & Kirschbaum, 2010) Posteriormente ellos afirman que las mezclas de suelo-cemento como material de construcción de elementos estructurales para edificaciones de cualquier tipo, deben cumplir varios requisitos, entre ellos ser económicas y tener la suficiente durabilidad y laborabilidad. Para esto se hace principalmente una clasificación de suelos mediante ensayos físicos de laboratorios que son más precisas que cualquier otro método. Esta primera parte debe ser la de mayor utilización debido a que con una debida clasificación prácticamente se garantiza la calidad requerida de la mezcla con un mínimo consumo de cemento. En otras palabras, con una correcta clasificación del suelo, se determina el porcentaje óptimo para aplicar la tecnología de suelo-cemento, así evitando desperdicios de materiales o un incorrecto mejoramiento de las propiedades de este. (Corral, 2008).

Se concluyó que los suelos aptos para implementar la tecnología suelo-cemento eran aquellos cuyos consumos de cemento en peso se encuentren entre 5 y 12% con respecto al peso del suelo, Donde este debe ser estable en la contracción, también tener una absorción de agua adecuada y alcanzar las resistencias necesarias en el menor tiempo, Por último su plasticidad debe ser tal que aporte una determinada cohesión a la mezcla, lo que mejora la laborabilidad y aumenta el aislamiento térmico sin que se produzcan agrietamientos por contracción, estos ensayos se realizan con límites de Atterberg que permiten hallar la plasticidad del suelo, que es la característica de un suelo por medio de la cual se puede moldear, modelar, manipular y deformar sin sufrir cambios de volúmenes y sin agrietarse. (Valparaiso, Laboratorios mecanica de suelos, 2004).



En el ámbito nacional, Antioquia, el municipio de Rionegro lleva a cabo un plan de recuperación de vías rurales mediante la tecnología de suelo-cemento, con la que se intervendrán 144 kilómetros, donde la primera etapa inicia en la vereda Ojo de Agua, aquí se realizaron las primeras pruebas para poner en marcha el proyecto, que cuenta con la asesoría de Cementos Argos. (Pereira, 2017)

Ilustración 1. Perfilado y compactación de motoniveladora



Fuente: (Pereira, 2017)

Este proyecto en donde se da la implementación de la tecnología suelo-cemento en el municipio de Rionegro, es muy similar a la estabilización de suelos arcillosos mediante el uso del suelo-cemento para capa de rodadura en vías terciarias, en la vereda Membrillal, con el fin de obtener un nuevo material con mejores y nuevas características estructurales, de modo que se pueda aprovechar su mejoramiento de cualidades, obteniendo una capa firme, estable y duradera, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones climáticas más severas, lo que lo convierte en una alternativa viable para la estabilización y uso como capa de rodadura en vías de tercer orden.



1.2 MARCO TEORICO

1.2.1 El suelo

El vocablo “suelo”, a lo largo del tiempo, ha sido definido de muchas formas dependiendo de la especialidad que lo utilice. Entre las más resaltantes podemos encontrar las explicaciones de los geólogos y los ingenieros civiles (Crespo Villalaz, 2004).

El geólogo -según N. J. Chioffi- define al suelo como el material resultante de la descomposición y desintegración de la roca por el ataque de los agentes atmosféricos (Crespo Villalaz, 2004).

El ingeniero civil –según Braja M. Das– define al suelo como una delgada capa sobre la corteza terrestre de material que es resultado del intemperismo. La meteorización (intemperismo) se puede desarrollar mediante procesos físicos o químicos. Si el suelo permanece en su lugar de origen, se le denomina suelo residual; en caso contrario, suelo transportado (Crespo Villalaz, 2004).

Para los fines académicos de esta investigación, se adoptará la definición del ingeniero Braja M. Das.

1.2.1.1 Formación del suelo

El aumento de la temperatura genera en las rocas un gradiente de calor, lo que ocasiona que la superficie se dilate más que el centro. La diferencia de expansión genera esfuerzos grandes que se traducen en la fractura (grietas) de la capa superficial de la roca. En estas penetra el agua, aumenta su volumen y produce que las grietas aumenten su ancho, lo que conllevará a que se desprendan fragmentos de diversos tamaños. A estas acciones, hay que añadir el efecto del viento que transporta pequeñas partículas de arena, las cuales al ser arrastradas sobre la superficie de la roca hacen que se desgaste y fomente su desintegración. Es importante destacar que los fragmentos de roca generados tendrán la misma composición de la roca de la cual fueron originados (roca madre). Los procesos descritos en el presente párrafo se denominan intemperismo físico (Valdivia Cariat, Octubre 2016).

1.2.1.2 Propiedades químicas del suelo

El suelo es un sistema complejo formado por partículas sólidas orgánicas e inorgánicas, aire, agua y microorganismos. Estos elementos conocidos como fases gozan de gran



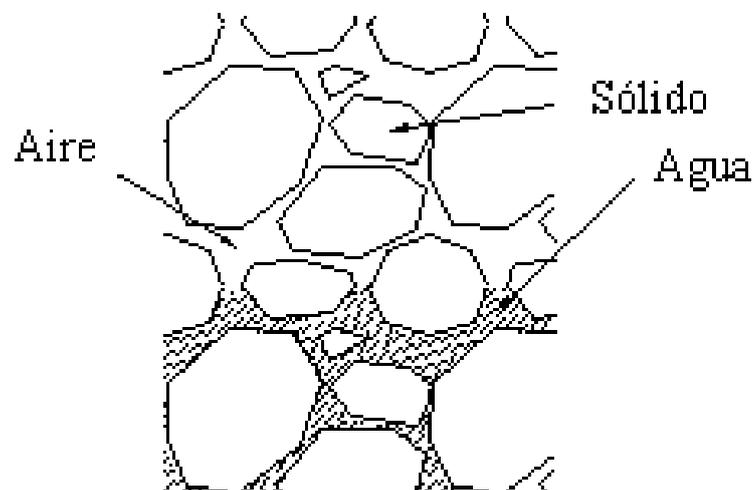
interacción, debida a la enorme cantidad de reacciones químicas que sufren, por ejemplo: aire y agua intemperiza las partículas sólidas, y los microorganismos se encargan de catalizar estas reacciones (Cepeda Dovala, 1991).

Para los ingenieros (Torrente & Sagüés, 1974) el suelo es un sistema multifase formado por: una fase sólida, una fase líquida y una fase gaseosa.

Debido a la naturaleza, las condiciones variables en las que se encuentra el suelo (variaciones en el contenido de agua, cambios de temperatura, entre otras), jamás se encontrarán en un perfecto equilibrio entre las fases.

La arcilla es una asociación de silicatos complejos hidratados de aluminio de fino tamaño de partícula que, húmeda, es plástica, esto significa, que cambian fácilmente de forma cuando una fuerza es aplicada; y seca, es dura y quebradiza. Se encuentra en abundancia en la naturaleza y es constituyente importante de la corteza terrestre (de Pablo, 1964). Las partículas de arcilla son pequeñísimos granos capaces de retener en su superficie una cantidad muy grande de agua en relación a su volumen.

Ilustración 2. Composición del suelo



Fuente: (Braja Das, 2002)

1.2.1.3 Propiedades físicas del suelo

Las propiedades físicas de un suelo permiten identificarlo y clasificarlo dentro de una amplia gama de posibilidades que existen en la naturaleza. Estas propiedades dependen



además de la posición geográfica del suelo, la profundidad y espesor del estrato. Entre las propiedades físicas y mecánicas de un suelo se pueden enumerar:

- La densidad y porosidad.
- El tamaño y forma de las partículas.
- La consistencia y el contenido de humedad.
- La permeabilidad y capilaridad.
- La capacidad portante.
- La retracción y expansión.

Estas propiedades físicas son clasificadas según su tamaño, cuyos límites varían según las organizaciones que los definen. En la Tabla 1 se presentan los criterios de cuatro instituciones reconocidas.

Tabla 1. Tamaños de las partículas de un suelo

Nombre de la organización	Tamaño del grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 3	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
Asociación Americana de Funcionarios del Transporte y Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema unificado de clasificación de suelos (U.S. Army Corps of Engineers)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas)	

Fuente: (Braja Das, 2002)

El suelo adquiere una cohesión cuando consigue una densidad determinada, por consiguiente, una resistencia. En el caso de las arcillas, debido a su poco espacio intramolecular, la fuerza cohesiva es muy fuerte y recibe el nombre de cohesión real. Para ambos casos, es necesario que el agua esté dentro de unos límites. Pasados estos límites, el suelo se deshace.

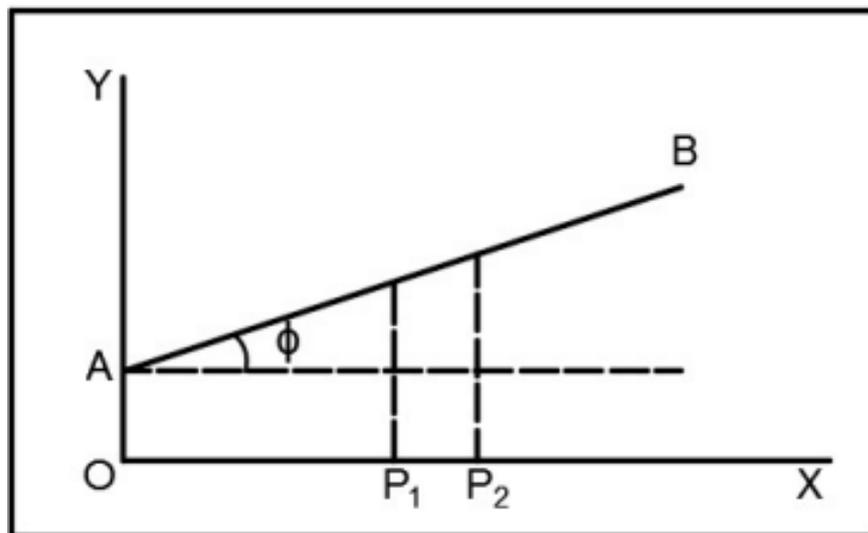


1.2.1.4 Propiedades mecánicas del suelo

Terzaghi dijo: La mecánica de suelos es la aplicación de las leyes de la mecánica y la hidráulica a los problemas de ingeniería que tratan con sedimentos y otras acumulaciones no consolidadas de partículas sólidas, producidas por la desintegración mecánica o la descomposición química de la roca, independiente que tengan o no materia orgánica. La mecánica de suelos incluye:

1. Teoría sobre el comportamiento de los suelos sujetos a cargas, basada en simplificaciones necesarias, dado el estado actual de la teoría.
2. Investigación de las propiedades físicas de los suelos.
3. Aplicación del conocimiento teórico y empírico de los problemas prácticos (Duque Escobar, 2016).

Ilustración 3. Reacción del suelo ante cargas aplicadas



Fuente: (Torrente & Sagüés, 1974).

Del gráfico anterior se observa que la cohesión interna siempre existe, aun si no se le aplica carga alguna. Asimismo, la reacción del suelo aumenta proporcionalmente al aumento de presión ejercida.

En la mecánica de suelos es importante el tratamiento de las muestras (inalteradas – alteradas). La mecánica de suelos desarrolló los sistemas de clasificación de suelos donde se caracteriza el suelo a partir de propiedades como color, olor, textura, distribución de tamaños, plasticidad (Casagrande, 1948).



1.2.2 Clasificación del suelo

Dada la gran variedad con que los suelos se presentan en la naturaleza, la Mecánica de Suelos desarrolló en principio sistemas de clasificación basados en fundamentos descriptivos, debido al insuficiente conocimiento que se tenía sobre estos.

La clasificación de los suelos es la división de estos en grupos, donde los suelos incluidos en el grupo presentan características o comportamientos semejantes. El propósito principal es estimar en forma fácil las propiedades de un suelo por comparación con otros del mismo tipo, cuyas características son conocidas. Los sistemas de clasificación de suelos más comúnmente utilizados son: el sistema AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el USCS (Unified Soil Classification System).

El sistema AASTHO creado en 1943, se utiliza principalmente para la evaluación cualitativa de la conveniencia de un suelo como material para la construcción de explanadas de carreteras. Estudios realizados por el Dr. Arturo Casagrande en la Universidad de Harvard en el año 1942, ayudaron en gran parte para que se pudiera establecer un sistema de clasificación de suelos que satisficiera los distintos campos de aplicación de la Mecánica de Suelos. Estos estudios dieron origen al llamado Sistema de Clasificación de Aeropuertos, que fue utilizado para la construcción de aeropuertos durante la segunda guerra mundial.

Diez años más tarde, el sistema de clasificación fue ligeramente modificado por el Bureau of Reclamation, para dar origen al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) en el año de 1952, que fue adoptado por el cuerpo de ingenieros del ejército de los Estados Unidos y posteriormente por muchas otras organizaciones del país y del resto del mundo, entre ellas la ASTM (American Society of Testing Materials), que lo adoptaron como parte de sus métodos normalizados (Bañon & Beviá, 2000).

El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se basa en la distribución de tamaños de las partículas del suelo (determinación de la composición granulométrica) y de la plasticidad del suelo, es decir como el agua lo afecta. La distribución de tamaños de partículas que forman el suelo se analiza mediante una curva granulométrica, que es una representación gráfica de la distribución de diámetros de las partículas presentes en una muestra de suelo. Dicha distribución se lleva a cabo mediante el uso de mallas o tamices,



los cuales tienen aberturas estandarizadas que van usualmente desde 76.2 mm hasta 0.074mm.

1.2.2.1 Clasificación de los suelos según el SUCS

Según el SUCS, los suelos se pueden clasificar en tres grandes grupos:

- Suelos de grano grueso o granulares (SGG): Formados por gravas y arenas con menos del 50% de contenido en finos, es decir suelos con tamaños superiores a 0.074mm.
- Suelos de grano fino (SGF): Formados por limos y arcillas con más del 50% de contenido de finos, corresponde a suelos con tamaños inferiores a 0.074mm. Dentro de este grupo, las arcillas son conocidas como suelos cohesivos y los limos como suelos no cohesivos.
- Suelos orgánicos: compuestos por materia orgánica descompuesta o en estado de descomposición. Estos suelos generalmente son de grano fino (United States Bureau of Reclamation, 1998).

El SUCS se basa en un grupo de símbolos, que consisten en un prefijo que designa la distribución granulométrica del suelo y un sufijo que matiza sus propiedades

Tabla 2. Símbolos de grupo (SUCS)

TIPO DE SUELO	PREFIJO	SUBGRUPO	SUFIJO
Grava	G	Bien gradado	W
Arena	S	Pobrementemente gradado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	De alta plasticidad	L
Turba	Pt	De baja plasticidad	H

Fuente: (Bañon & Beviá, 2000)

En función de estos símbolos, pueden establecerse diferentes combinaciones que definen los diferentes tipos de suelo, según el SUCS.



Tabla 3. Tipología de suelos (SUCS).

Divisiones mayores		Simbolo de grupo	Nombres típicos	Criterios de clasificación para suelos granulares			
Suelos de grano grueso (más del 50% del material es mayor en tamaño que el tamiz N° 200)	Gravas (más de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz N° 4)	GW	Gravas bien gradada, mezclas granosas, pocos o ningún fino	$C_u = D_{60}/D_{10} > 4$ $C_c = 1 < D_{30}^2/D_{10} \times D_{60} < 3$			
		GP	Gravas pobremente gradadas, mezclas grava-arena, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para GW			
		GM	d/u	Gravas limosas, mezclas grava-arena-limo	Limites de Atterberg por debajo de la línea A ó $Ip < 4$	A los materiales sobre la línea a con $4 < Ip < 7$ se considera de frontera y se les asigna doble símbolo	
		GC	Gravas arcillosas, mezclas grava-arena-arcillosas	Limites de Atterberg por encima de línea A ó $Ip > 7$			
	Arenas (más del 50% de la fracción gruesa es menor que el tamiz N° 4)	Arenas limpias (pocos o ningún fino)	SW	Arenas bien gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	$C_u = D_{60}/D_{10} > 6$ $C_c = 1 < D_{30}^2/D_{10} \times D_{60} < 3$		
			SP	Arenas pobremente gradadas, arenas gravosas, pocos o ningún fino	No cumplir todos los requisitos de gradación para SW		
		Arenas con limos (cantidad apreciable de limos)	SM	d/u	Arenas limosas, mezclas arena-limo	Limites de Atterberg por debajo de la línea A ó $Ip < 4$	Si el material está en la zona sombreada con $4 \leq Ip \leq 7$ se considera de frontera y se le asigna doble símbolo
			SC	Arenas arcillosas, mezclas arena-arcilla	Limites de Atterberg por encima de línea A ó $Ip > 7$		
Suelos de grano fino (más del 50% del material pasa el tamiz N° 200)	Limos y arcillas (Limite líquido < 50)	ML	Limos inorgánicos y arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas, o limos arcillosos con poca plasticidad	1. Determinar el porcentaje de arenas y gravas de la curva de granulometría. 2. Dependiendo del porcentaje de fino (fracción menor que el tamiz N° 200) los suelos gruesos se clasifican como sigue: Menos del 5%- GW, GP, SW, SP Más del 12%- GM, GC, SM, SC de 5 a 12% - casos de frontera que requieren doble símbolo			
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, arcillas magras				
		OL	Limos orgánicos, arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad				
	Limos y arcillas (Limite líquido > 50)	MH	Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos micáceos o diatomáceos, suelos elásticos				
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas				
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad media a alta, limos orgánicos				
	Suelos altamente orgánicos	PT	Turba y otros suelos altamente orgánicos				

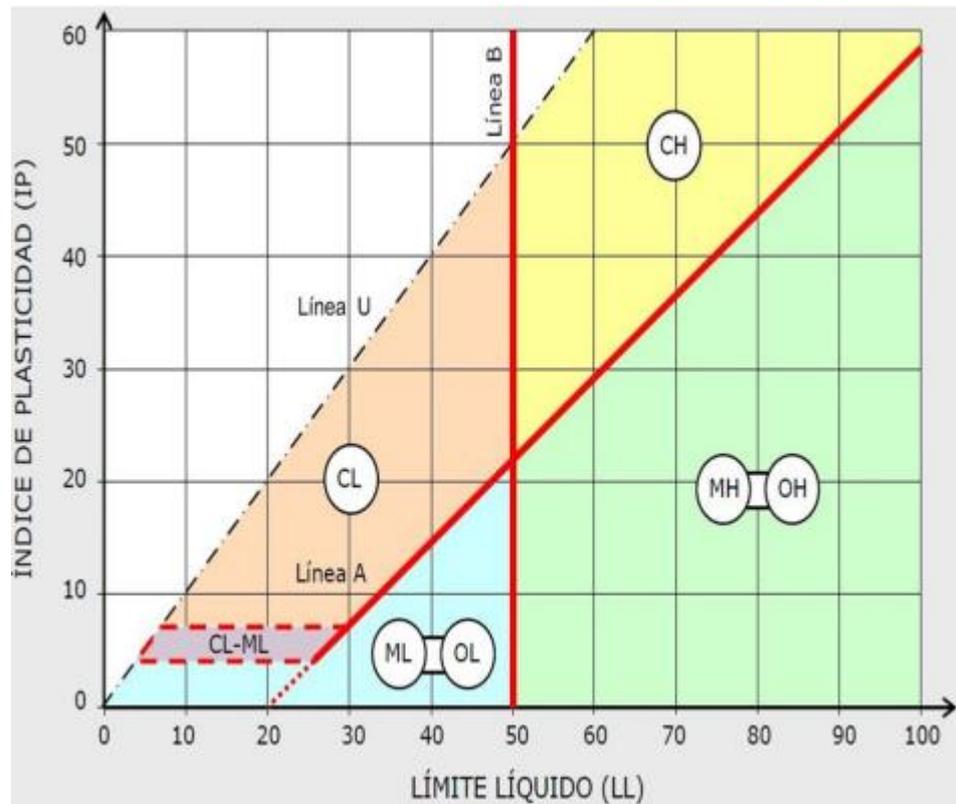
Fuente: (Bowles, 1980).

Tras un estudio experimental de diferentes muestras de grano fino, Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la carta de plasticidad de Casagrande.

La línea inclinada A traza la frontera entre limos y arcillas. La línea vertical B separa un material de alta plasticidad con uno de baja plasticidad. La línea inclinada U representa el límite superior, se puede decir que hasta el momento no se han encontrado suelos con coordenadas superiores a las determinadas por dicha línea.



Ilustración 4. Carta de Casagrande para suelos cohesivos.



Fuente: (Braja Das, 2002).

1.2.2.2 Clasificación de los suelos según la AASHTO

De acuerdo con este sistema y con base en su comportamiento, los suelos están clasificados en ocho grupos designados por los símbolos del A-1 al A-8. En este sistema de clasificación los suelos inorgánicos se clasifican en siete grupos que van del A-1 al A-7. Estos a su vez se dividen en un total de doce subgrupos. Los suelos con elevada proporción de materia orgánica se clasifican como A-8.

Descripción de los grupos de clasificación:

a) Suelos granulares: Son aquellos que tienen 35% o menos, del material fino que pasa el tamiz No. 200. Estos suelos forman los grupos A-1, A-2 y A-3.

Grupo A-1: El material de este grupo comprende las mezclas bien graduadas, compuestas de fragmentos de piedras, grava, arena y material ligante poco plástico. Se incluyen también en este grupo mezclas bien graduadas que no tienen material ligante.



Subgrupo A-1a: Comprende aquellos materiales formados predominantemente por piedra o grava, con o sin material ligante, estos materiales son bien graduados.

Subgrupo A-1b: Incluye aquellos materiales formados predominantemente por arena gruesa bien graduada, con o sin ligante.

Grupo A-2: Comprende una gran variedad de material granular que contiene menos del 35% del material fino.

Subgrupo A-2-4 y A-2-5: Pertenecen a estos subgrupos aquellos materiales cuyo contenido de material fino es igual o menor del 35% y cuya fracción que pasa el tamiz número 40 tiene las mismas características de los suelos A-4 y A-5 respectivamente.

Subgrupo A-2-6 y A-2-7: Los materiales de estos subgrupos son semejantes a los anteriores, pero la fracción que pasa el tamiz número 40 tiene las mismas características de los suelos A-6 y A-7.

Grupo A-3: En este grupo se encuentra incluidas las arenas finas, de playa y aquellas con poca cantidad de limo que no tengan plasticidad. Este grupo incluye, además, las arenas de río que contengan poca grava y arena gruesa.

b) Suelos finos: Contienen más del 35% del material fino que pasa el tamiz número 200. Estos suelos constituyen los grupos A-4, A-5, a-6, y A-7.

Grupo A-4: Pertenecen a este grupo los suelos limosos poco o nada plásticos que tienen un 75% o más del material fino que pasa el tamiz número. Además, se incluye en este grupo las mezclas de limo con grava y arena hasta en un 64%.

Grupo A-5: Los suelos comprendidos en este grupo son semejantes a los del anterior, pero contienen material micáceo o diatomáceo. Son elásticos y tiene un límite líquido elevado.

Grupo A-6: El material típico de este grupo es la arcilla plástica. Por lo menos el 75% de estos suelos debe pasar el tamiz número 200, pero se incluyen también las mezclas arcillo-arenosas cuyo porcentaje de arena y grava sea inferior al 64%. Estos materiales presentan, generalmente, grandes cambios de volumen entre los estados seco y húmedo.



Grupo A-7: Los suelos de este grupo son semejantes a los suelos A-6 pero son elásticos. Sus límites líquidos son elevados. Subgrupo A-7-5: Incluye aquellos materiales cuyos índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos.

Subgrupos A-7-6: Comprende aquellos suelos cuyo índice de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos y que, además experimentan cambios de volumen extremadamente grandes. Las características de los diferentes grupos se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4. Clasificación de suelos método AASHTO

Clasificación General	Materiales granulares (35% o menos de la muestra total pasa por la malla No. 200)						Materiales granulares (Mas del 35% de la muestra total pasa por la malla No. 200)			
	A - 1		A - 3	A - 2			A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
Clasificación del grupo	A - 1a	A - 1b	A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5* A - 7 - 6**
Cribado por mallas (% que pasa)										
Malla No. 10	50 max	--	--	--	--	--	--	--	--	--
Malla No. 40	30 max	50max	51min	--	--	--	--	--	--	--
Malla No. 200	15 max	25max	10 max	35 max	35 max	35 max	35 max	36 min	36 min	36 min
Para la fracción que pasa la malla No. 40										
Límite líquido (LL)	--	--	--	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max	41 min	40 max
Índice de plasticidad (IP)	6 max	--	NP	10 max	10 max	11 min	11 min	10 max	10 max	11 min
Tipo de material más común	Fragmentos de roca grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosas o arcillosas			Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación de la subrasante	Excelente a buena						Regular a pobre			

Fuente: (Rivera W. , 2013).

1.2.3 Análisis del suelo

El suelo es un material muy variable. Por esta razón, se debe analizar detalladamente para poder identificar sus propiedades físicas y mecánicas. Por tanto, el análisis del suelo implica una extracción de una muestra del mismo; se hacen agujeros lo suficientemente profundos para asegurar que la muestra sea la correspondiente a ese suelo en estudio. Estas muestras son analizadas ya se en campo o en laboratorio.

1.2.3.1 Humedad natural

La humedad natural es una propiedad física del suelo es de gran utilidad en la construcción civil y se obtiene de una manera sencilla, pues el comportamiento y la resistencia de los suelos en la construcción están regidos, por la cantidad de agua que contienen.



El contenido de humedad es una relación de fase de uso continuo en obras relacionadas con suelos y pavimentos para determinar posibles cambios volumétricos en un suelo, o para evaluar la adherencia entre capas asfálticas por mencionar algunas.

Existen tres importantes relaciones de volumen: porosidad, relación de vacíos y grado de saturación. La porosidad es la relación entre el volumen de huecos y el volumen total, mientras que la relación de vacíos es el cociente entre el volumen de los huecos poros o vacíos y el de partículas sólidas. La porosidad se suele multiplicar generalmente por 100, dándose así los valores en porcentajes.

Tanto la porosidad como la relación de vacíos indican el porcentaje relativo del volumen de poros en una muestra de suelo. Este volumen de poros en una muestra de suelo. Este volumen de vacíos está lleno de un fluido, gaseoso o líquido, pero en general se trata de agua.

La relación entre pesos de las fases más empleadas es el contenido de humedad, que es el peso de agua dividido por el peso de las partículas sólidas en un elemento del suelo. La humedad de una muestra de suelo se obtiene directamente por el siguiente método: se pesa el suelo natural; se seca en una estufa; se pesa el suelo seco y por último se calcula el porcentaje de humedad como se muestra en la ecuación:

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde W es la humedad, W_w es el peso del agua y W_s es el peso del material seco.

Este método supone que el agua es el único producto evaporable del suelo, lo cual es razonable excepto cuando se trabaja con suelos orgánicos o suelos que contienen volátiles como el asfalto. Para un suelo saturado, la humedad y la relación de los vacíos están directamente relacionados, como puede verse examinando las expresiones de ambos términos. Como es más fácil obtener pesos que calcular volúmenes, se utiliza bastante la variación de humedad de un suelo saturado para medir deformaciones volumétricas (Badillo, 2005).



1.2.3.2 Límites de Atterberg

La consistencia de un suelo es la relativa facilidad con la que puede ser deformado y depende de un contenido de humedad determinado. Para los suelos cohesivos se definen cuatro estados de consistencia: sólido, semisólido, plástico y líquido.

Ilustración 5. Límites de Atterberg.



Fuente: (Valparaíso, Laboratorios mecánica de suelos, 2004)

En el estado sólido la masa es volumen del suelo, es decir, prácticamente cero cantidades de agua; en el semisólido el suelo está aparentemente sólido (percepción del hombre); en el estado plástico el suelo se deja moldear manipular sin agrietarse (resistente a pequeñas cargas) y por último en el estado líquido el suelo se comporta como un líquido viscoso (no resiste cargas), es decir, su contenido de agua es mucho mayor.

Los límites de consistencia o también llamados límites de Atterberg permite hallar la plasticidad del suelo, que es la característica de un suelo por medio de la cual se puede moldear, modelar, manipular y deformar sin sufrir cambios de volúmenes y sin agrietarse (Valparaíso, Laboratorios mecánica de suelos, 2004).

1.2.3.2.1 Límite líquido

Es uno de los límites propuestos por Atterberg. Brinda un punto de referencia para poder aclarar si un suelo se encuentra en un estado líquido o plástico.

$$L.L = \frac{\omega}{1.419 - [0.3 * \log N]} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde w es la humedad del suelo y N el número de golpes proporcionado a la cazuela de Casagrande (INV E-125-07).



Ilustración 6. Cazuela de Casagrande.



Fuente: (Autores, tomado en la UdeC).

1.2.3.2.2 Limite plástico

Entre los límites de Atterberg también encontramos el límite de plasticidad o limite plástico, este nos indica el contenido de humedad por encima del cual, el suelo se puede manipular, moldear sin agrietarse ni cambiar su volumen. Se encuentra en el laboratorio arbitrariamente como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro de éste, se rompe o resquebraja al amasado presentando un diámetro de aproximadamente 3 mm, es decir, el limite plástico se puede definir como la cantidad de humedad que presente el suelo en ese momento. (Valparaiso, Escuela de ingeniería en construcción)

$$L_p = \frac{\text{peso del agua}}{\text{peso del material seco}} * 100 \quad (\text{Ec.3})$$

El límite plástico corresponde a la humedad, en porcentaje, que permite la formación del rollito. En el caso de que sea muy difícil conseguirlo, se debe modificar la humedad (Valdivia Cariat, Octubre 2016).

Con los datos obtenidos anteriormente, se procede a hacer el cálculo del índice de plasticidad, que está dado en la siguiente ecuación

$$I_p = \text{Limite liquido} - \text{Limite plástico} \quad (\text{Ec.4})$$



1.2.3.2.3 Compactación

En general, la compactación es la consolidación del suelo por la eliminación de aire, lo que requiere energía mecánica. El grado de compactación de un suelo se mide en términos de su peso unitario seco. Cuando se añade agua a la tierra durante la compactación, ésta actúa como agente suavizante sobre las partículas del suelo. Éstas se deslizan una sobre la otra y se mueven en una posición densamente empaquetadas (Braja Das, 2002).

El Ensayo Proctor es una prueba de laboratorio que sirve para determinar la relación entre el contenido de humedad y el peso unitario seco de un suelo compactado. El primer método en relación a esta técnica es conocido como prueba Proctor Estándar (Braja Das, 2002). El más empleado actualmente es la denominada prueba Proctor Modificado en donde se aplica mayor energía de compactación que el estándar, ya que es más adecuado a las solicitaciones de las estructuras que se construyen actualmente.

Ilustración 7. Martillos utilizados en las pruebas Proctor estándar y modificada

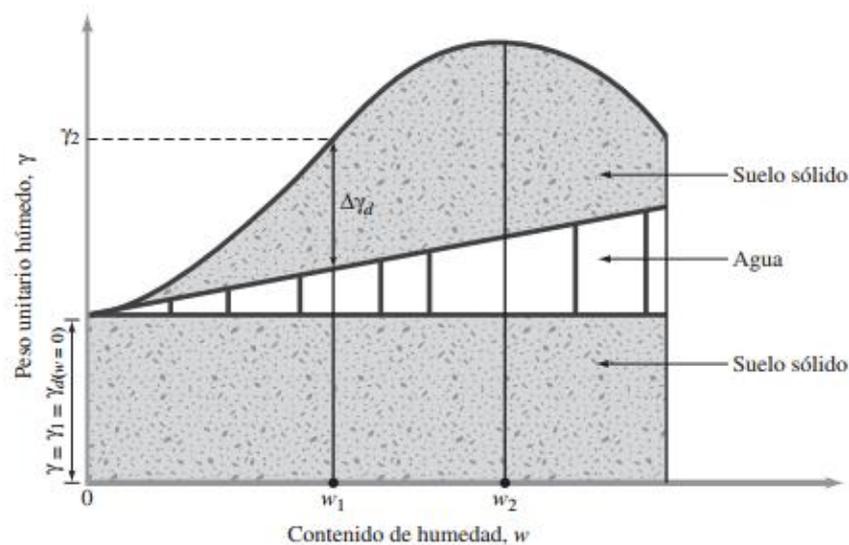


Fuente: (Braja Das, 2002).

El peso unitario seco después de la compactación primero aumenta a medida que se incrementa el contenido de humedad (Ilustración 8). Hay que tener en cuenta que cuando el contenido de humedad $w = 0$, la unidad de peso húmedo (γ) es igual a la unidad de peso seco (γ_d).



Ilustración 8. Principios de compactación



Fuente: (Braja Das, 2002).

Para cada prueba, el peso unitario húmedo de compactación γ se puede calcular como.

$$\gamma = \frac{W_m}{V_m} \quad (\text{Ec.5})$$

Donde W_m es el peso del suelo compactado en el molde y V_m volumen del molde estandarizado (943.3cm^3).

Para cada muestra, se determina el contenido de humedad del suelo en el laboratorio. Ya una vez conocido el contenido de humedad, el peso unitario seco (γ_d) puede calcularse como.

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + w(\%)} \times 100 \quad (\text{Ec.6})$$

Donde $w(\%)$ es porcentaje de contenido de humedad.

1.2.3.3 CBR

Este método de prueba se emplea para evaluar la resistencia potencial de materiales de subrasante, subbase y base, incluyendo materiales reciclados para empleo en pavimentos de carreteras y pistas de aterrizaje. El valor de CBR obtenido en esta prueba forma parte integral de varios métodos de diseño de pavimentos flexibles (INV E-148-07).



El procedimiento de esta prueba es similar al de Proctor, primero se compacta la muestra aplicándole energía a través de una aplicación de cierto número de golpes por capa y luego se lleva a la prensa que es similar a las usadas en ensayos de compresión, utilizada para forzar la penetración de un pistón en la muestra.

$$CBR\ 0.1" = \frac{Carga * 100}{1000 * 3.09} \qquad CBR\ 0.2" = \frac{Carga * 100}{1500 * 3.09} \qquad (Ec.7)$$

Donde L_{dial} es la lectura dial de carga a una penetración de 0.100 in y 0.200 in.

En esta misma norma describe el procedimiento para la prueba de expansión. Esta cualidad negativa de los suelos se produce únicamente en suelos arcillosos. Consiste en dejar sumergido los cilindros de suelos compactados durante 72 horas en agua. Se debe tomar una lectura antes y después de la inmersión y se calcula la expansividad.

$$Expansión = \frac{L_{final} - L_{inicial}}{5} \times 0.1 \qquad (Ec.8)$$

La siguiente tabla propone una gradación del riesgo potencial de hinchamiento en función de los resultados de los ensayos.

Tabla 5. Clasificación de riesgo potencial de expansividad de un suelo.

RIESGO DE POTENCIAL DE HINCHAMIENTO	EXPANSIÓN (%)	INDICE DE PLASTICIDAD
BAJO	< 10	< 18
MEDIO	10 – 20	15 - 28
ALTO	20 – 30	25 - 41
MUY ALTO	> 30	> 35

Fuente: (Braja Das, 2002).



$$CBR(\%) = \log^{-1} \left(-0.027 + 0.287 * \text{compresión incofinada} \frac{kg}{cm^2} \right) \quad (\text{Ec.9})$$

1.2.4 Estabilización de suelos

La estabilización de suelos se practica con el objetivo de variar propiedades del suelo en estado natural para mejorar su respuesta frente a las acciones mecánicas y los factores climáticos en forma perdurable. Las propiedades que generalmente se modifican son: resistencia, estabilidad volumétrica, permeabilidad, y durabilidad (Sagüés, 2008). Los principales procesos de estabilización se clasifican en: mecánicos, físicos, químicos. Los métodos prácticos de estabilización pueden involucrar uno o más procedimientos (Arría & Aiassa, 2007).

La estabilización mecánica consiste en la manipulación y compactación de los suelos para obtener su densificación. Al aplicar energía mecánica se reducen los vacíos que se encuentran con aire en la masa de suelo lo que aumenta su peso unitario. De esta forma se logra un aumento en la resistencia, en la rigidez, una mejora en la estabilidad volumétrica y una disminución de la permeabilidad del suelo (Sagüés, 2008).

La estabilización física más practicada es la granulométrica. Esta persigue la obtención de una adecuada granulometría, mediante el agregado de materiales granulares o cohesivos o ambos a la vez. Las partículas más gruesas suministran fricción y dureza, resistencia al impacto y al desgaste. Las más finas, con la humedad que las rodea, el medio ligante o cohesivo. Con granulometrías más cerradas se obtiene un mayor número de contactos entre partículas lo que aumenta la capacidad portante del suelo y se reduce la permeabilidad (Serigos, 2009).

La estabilización química se logra mediante el intercambio iónico entre los granos del suelo y el producto estabilizante. Un ejemplo es el uso de sales neutras (cloruro de sodio, cloruro de calcio, etc.) que varían la tensión superficial y la presión de vapor de las soluciones de estos productos respecto del agua sin ellos, para mantener la humedad de compactación. Otros productos de estabilización química son ácidos inorgánicos, como el fosfórico o el fluorhídrico, ácidos y sales orgánicas, algunos polímeros, resinas combinadas y algunos desechos obtenidos de la fabricación del papel u otros productos industriales (Serigos, 2009).



Al estabilizar el suelo, reaccionan los minerales arcillosos del suelo con los agentes estabilizantes proporcionados por el material cementante formando nuevos compuestos generando un material que contribuye a la unión de las partículas de suelo y a estas con el cemento endurecido. Esto da como resultado un material dotado de mejor rigidez, resistencia mecánica, con una mayor estabilidad volumétrica y durabilidad que el suelo en estado natural.

1.2.5 Cemento Portland

Es un material que se obtiene por la pulverización del Clinker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el Clinker (Rivera G. , 2006).

1.2.5.1 Composición química del cemento Portland

El cemento Portland es producto de una compleja dosificación de ingredientes calcinados a grandes temperaturas. La materia prima se puede clasificar en tres grandes grupos:

Calizas: es una roca sedimentaria constituida principalmente por carbonato de calcio ($CaCO_3$). La cantidad de este material disponible en la naturaleza es abundante. Las calizas representan el 75% a 80% en peso de la materia prima. Entre las principales podemos encontrar a la creta, la calcita y la carbonatita.

Arcillas: los minerales de arcilla se originan a través de la meteorización de feldespatos, piroxenos y micas. Estas arcillas contienen diversos compuestos entre los cuales podemos destacar los siguientes: sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y óxido férrico (Fe_2O_3). Estos compuestos se funden con las calizas para obtener el clinker.

Materiales correctores: en el caso que las materias primas disponibles no contengan la cantidad necesaria para la producción del Clinker, se le agregan los materiales correctores. Entre los principales podemos encontrar a las diatomeas, bauxitas y mineral de hierro.



Tabla 6. Límites de composición aproximados para cemento Portland (Tipo 1).

ÓXIDO	CONTENIDO (%)
<i>CaO</i>	60-67
<i>SiO₂</i>	17-25
<i>Al₂O₃</i>	3-8
<i>Fe₂O₃</i>	0,5-6
<i>MgO</i>	0,1-4
<i>Álcalis</i>	0,2-1,3
<i>SO₃</i>	1-3

Fuente: (Rivera G. , 2006)

1.2.5.2 Fraguado

El término fraguado hace referencia al cambio de un estado fluido-plástico a un estado sólido. Es importante remarcar la diferencia que existe con el endurecimiento. Este último está referido al incremento de resistencia de una pasta de cemento.

El fraguado se debe a la hidratación progresiva de algunos componentes del cemento. Los primeros en reaccionar son la alita y la felita. Si bien la felita tiene una mayor velocidad de fraguado que la alita, el proceso se retrasa debido a la presencia del yeso. Por tal motivo, el primer componente en fraguar es la alita.

La temperatura influye drásticamente en el tiempo de fraguado, pues su aumento disminuye el tiempo de fraguado, aunque se puede observar que a partir de los 30°C se produce el efecto inverso. Análogamente, para temperaturas bajas, el tiempo de fragua aumenta. Existe un suceso que es importante destacar acerca del fraguado. Cuando se produce una rigidez prematura y anormal del cemento (durante los primeros minutos), ocurre lo que se denomina falso fraguado. En este, no se emite calor en forma apreciable, y si se vuelve a mezclar la pasta sin adición de agua, se restablecerá su plasticidad y fraguará normalmente sin pérdida de resistencia (Neville & Brooks, 1987)



1.2.5.3 Elementos que influyen en el fraguado

El fraguado es un suceso de suma importancia en la vida del concreto. Por tal motivo, es pertinente identificar los principales elementos que influyen en él:

Finura del cemento: se puede representar con lo que se denomina módulo de finura. Es la relación que existe entre el área de la superficie total, en centímetros, y el peso en gramos. Este cociente indica la cantidad de superficie que un gramo puede cubrir. Mientras mayor área pueda cubrir, mayor será la finura de un determinado cemento. Se concluye entonces que mientras mayor sea la finura de un cemento, estará más expuesto a la acción del agua. Esta mayor exposición generará que el cemento genere resistencia a una tasa mayor.

Aluminato tricálcico: si se tiene un porcentaje excesivo de este compuesto, es muy probable que no baste el tiempo para que se disuelvan la cal y el yeso en el agua. Esto generará que se produzca un falso fraguado. Por lo que se recomienda que el porcentaje esté comprendido entre el 8 y 12% del total. De esta forma se asegura una reacción a una velocidad normal.

Álcalis: ciertos compuestos influyen indirectamente en el fraguado. Por ejemplo, la potasa y el amoníaco reaccionan con el yeso y reducen la cantidad disponible para controlar el C_3A .

Temperatura: la reacción del cemento con el agua es una reacción exotérmica, lo cual implica que cuando aumenta la temperatura, incrementa la velocidad de fraguado. En primera instancia, esto parece una ventaja, pues se genera una resistencia temprana más rápido. Lo que no se toma en consideración es que este fenómeno propicia que se formen “granos microscópicos” (endurecimientos) de forma muy desordenada. Esto ocasiona que la pasta de cemento sea muy porosa, lo que a los concretos adultos les baja la resistencia a los 28 días, cerca del 10%.

Ácidos orgánicos: Atacan el cemento por su avidez por los iones de calcio que sustraen a las sales de calcio (silicatos y aluminatos) con lo cual el cemento se descompone perdiendo su condición de aglomerante (Torrente & Sagüés, 1974).



1.2.5.4 Resistencia del cemento

La resistencia del cemento endurecido es la propiedad mecánica más importante en lo que se refiere a los requisitos estructurales. Esta resistencia es producto de la hidratación de los componentes del cemento, los cuales con el paso del tiempo generan una masa estable y dura. Esta masa firme recibe el nombre de cemento endurecido. Se pueden identificar tres etapas:

Primera: Dura cinco minutos aproximadamente. Se le denomina endurecimiento inicial.

Segunda: Dura aproximadamente dos horas. Se produce un endurecimiento lento.

Tercera: Durará mientras exista agua disponible para ser absorbida. La resistencia adquirida tiende a un límite (Valdivia Cariat, Octubre 2016).

1.2.6 Suelo-cemento

El suelo-cemento es un material elaborado a partir de la mezcla de suelo, cemento Portland y agua, la cual es dosificada, compactada y curada de modo de obtener un material endurecido que satisface ciertas propiedades.

Con el agregado de cemento Portland se busca aumentar la resistencia y disminuir la deformabilidad, la permeabilidad y la sensibilidad al agua. Estas mejoras estructurales y de durabilidad crecen con el tiempo y con el incremento del porcentaje de cemento.

El suelo-cemento se utiliza principalmente en la construcción de carreteras; también es utilizado como revestimiento impermeabilizante, en la estabilización de taludes, estabilización de suelo de fundaciones, construcción de ladrillos, y otras aplicaciones menos frecuentes.

El contenido de cemento en la mezcla dependerá de las propiedades buscadas en la estabilización del suelo y del tipo de suelo utilizado. Se define “suelo mejorado o modificado con cemento” cuando el porcentaje de cemento utilizado en la mezcla es bajo (menor al 2%). Estas dosificaciones se aplican generalmente cuando se busca mejorar la estabilidad volumétrica del suelo, no mejorar la resistencia. Para suelos finos plásticos, es recomendable usar cal en lugar de cemento ya que esta es más efectiva y económica para controlar su inestabilidad volumétrica.



Cuando se utilizan cantidades de cemento superiores, generalmente de 5 a 35%, esta metodología se define como “suelo estabilizado con cemento”. Al utilizar estas cantidades de cemento se consigue un material dotado de cierta rigidez y resistencia, prácticamente insensible al agua (Serigos, 2009).

En el concepto, el fluido de suelo-cemento debe poder soportar la acción de su propio peso, de manera análoga a los hormigones autocompactantes que, deben ser fluidos sin presencia de los fenómenos de segregación y exudación (Alcantara, Nunes, Rio, & de Lima, 2017), y tener un mejor comportamiento al accionar de las cargas producidas por el tránsito.

1.2.6.1 Fenómenos químicos entre el suelo y el cemento Portland

Los fenómenos químicos que ocurren entre el suelo y el cemento Portland, con el apropiado contenido de agua, no están del todo comprendidos y dependen en gran medida del suelo en cuestión y del tipo y proporción de minerales de arcilla que posea. Básicamente y con un enfoque general, los fenómenos químicos en suelos finos, los fenómenos son más complejos. En primer lugar, se produce un efecto primario en el que la hidratación del cemento produce silicatos y aluminatos de calcio hidratados, hidróxidos de calcio e iones de calcio, que elevan la concentración de electrolitos del agua intersticial, aumentando su pH.

Luego sucede un segundo proceso que se divide en dos fases. En la primera se produce un intercambio iónico entre los iones de calcio y otros absorbidos por los minerales de arcilla, lo que tiende a flocular las partículas de arcilla. En la segunda fase se producen reacciones puzolánicas, compuestos silícicos y alumínicos reactivos del suelo reaccionan con compuestos cálcicos de la hidratación del cemento formando elementos cementantes. Durante esta segunda etapa se consume hidróxido de calcio que a la vez se repone por el proceso primario de hidratación del cemento (se libera entre un 12% y 18% de hidróxido de calcio). En las superficies expuestas al aire se produce un efecto de cementación adicional entre las arcillas debido a la carbonatación del calcio (Rodríguez & Castillo, 1977).

1.2.6.2 Ventajas del suelo cemento

Algunas de las ventajas asociadas al suelo-cemento consisten en que:



- Mejora notablemente las propiedades físicas y mecánicas de un determinado suelo, lo que hace que sea un material con un enorme potencial para ser usado en la construcción de diversas estructuras.
- Comparado con el suelo natural, tiene un mejor desempeño (durabilidad) ante condiciones adversas.
- Implica un proceso constructivo versátil y sencillo de realizar.
- Posee un bajo costo de implementación.
- Presenta un reducido impacto ambiental.

(Valdivia Cariat, Octubre 2016).

1.2.6.3 Suelos aptos para mezclas de suelo-cemento

La mayoría de suelos pueden ser empleados para la producción de suelo-cemento. Sin embargo, cuando se requiere de un diseño con un consumo mínimo de cemento, la cantidad de suelos aptos se reduce.

Los suelos arenosos y suelos con grava con un contenido aproximado de 10% de limo y 35% de arcilla tienen las propiedades más favorables, y requieren de una pequeña cantidad de cemento para un endurecimiento adecuado. Los suelos limosos y arcillosos con alta plasticidad, debido a su baja resistencia y alta plasticidad, necesitan de contenidos elevados de cemento para brindar una mezcla satisfactoria. Mientras que los suelos orgánicos, por sus propiedades expansivas y su baja capacidad portante no permite realizar una mezcla satisfactoria (Valdivia Cariat, Octubre 2016).

De esta forma, estudiar el comportamiento y propiedades de los suelos se hace de suma importancia para la identificación de la cantidad porcentual óptima de cemento que se debe agregar a cada tipo de suelo, perfeccionando así la utilización del suelo-cemento como material para la construcción de estructuras del pavimento (Milani & Barboza, 2016).

Una forma general de clasificar a los suelos aptos para las mezclas de suelo-cemento consiste en dividirlos en dos tipos: suelos eficientes y suelos deficientes.



Tabla 7. Clasificación de suelos aptos para las mezclas de suelo cemento.

SUELO EFICIENTE	SUELO DEFICIENTE
Suelos arenosos y suelos con grava	Suelos limosos y arcillosos con alta plasticidad
Suelos arenosos con deficiencia de partículas finas	Suelos orgánicos
Suelos limosos y arcillosos con baja plasticidad	

Fuente: (Valdivia Cariat, Octubre 2016).

La PCA propone según la composición granulométrica de los suelos, el porcentaje requerido de cemento en peso para estabilizar dicho suelo.

Tabla 8. Contenidos de cemento aproximados para proyectar las mezclas de suelo-cemento

GRUPO DE SUELO SEGUN LA AASHTO Y (SUCS)	% EN PESO DE CEMENTO REQUERIDO
A-1-a (GW,GP,SW,SP)	3-5
A-1-b (SW,SP,GM,SM,GP)	5-8
A-2 (GM,SM,GC,SC)	5-9
A-3 (SP)	7-11
A-4 (ML,OL,CL,SM,SC)	7-12
A-5 (OH MH,ML OL)	8-13
A-6	9-15
A-7	10-16

Fuente: (Portlad Cement Association, 1971)



1.2.7 Resistencia a la compresión inconfiada de cilindros

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de concreto reforzado, la forma de expresarla es, en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm^2 y con alguna frecuencia lb/pulg^2 (PSI). La equivalencia que hay entre los dos es que 1 psi es igual a 0.07kg/cm^2 . Aunque hoy en día se ha acogido expresarla en MPa de acuerdo con el (SI, 2012).

La forma de evaluar la resistencia del concreto es mediante pruebas mecánicas que pueden ser destructivas, las cuales permiten probar repetidamente la muestra de manera que se pueda estudiar la variación de la resistencia u otras propiedades con el paso del tiempo. Para las primeras se utilizan tres tipos de muestras: cilindros, cubos y prismas. Para las segundas hay diferentes sistemas. El ensayo de compresión es meramente lo contrario del de tensión con respecto a la dirección o el sentido del esfuerzo aplicado. Las razones generales para la elección de uno u otro tipo de ensayo se establecieron. Asimismo, un número de principios generales se desarrolló a través de la sección sobre el ensayo de tensión sobre los cuales son igualmente aplicables al ensayo de compresión. Existen, sin embargo, varias limitaciones especiales del ensayo de compresión a las cuales se debe dirigir la atención: La dificultad de aplicar una carga verdaderamente concéntrica o axial. El carácter relativamente inestable de este tipo de carga en contraste con la carga tensiva, Existe siempre una tendencia al establecimiento de esfuerzos flexionantes y a que el efecto de las irregularidades de alineación accidentales dentro de la probeta se acentúa a medida que la carga prosigue. La fricción entre los puentes de la máquina de ensayo o las placas de apoyo y las superficies de los extremos de la probeta debido a la expansión lateral de esta. Esto puede alterar considerablemente los resultados que se obtendrían si tal condición de ensayo no estuviera presente. Las áreas seccionales, relativamente mayores de la probeta para ensayo de compresión para obtener un grado apropiado de estabilidad de la pieza. (Blanco, 2017)

1.2.8 Estructura de pavimento

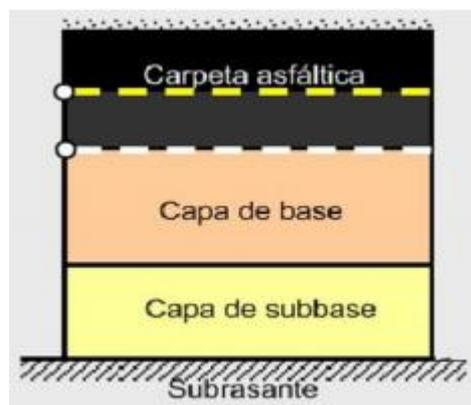
Un pavimento se puede definir como una estructura constituida por varias capas de materiales seleccionados, diseñada y construida técnicamente con el objetivo de brindar el tránsito de vehículos de una manera cómoda, segura, eficiente y económica. (Montejo, 2002).



Una estructura de pavimento está conformada por capas de diferente espesor y calidad, las cuales se apoyan sobre la capa de suelo natural conocida como subrasante. Convencionalmente las capas que forman la estructura del pavimento son subbase, base y carpeta asfáltica para pavimentos flexibles; y subbase y losa de concreto hidráulico para pavimentos rígidos (Bañon & Beviá, 2000).

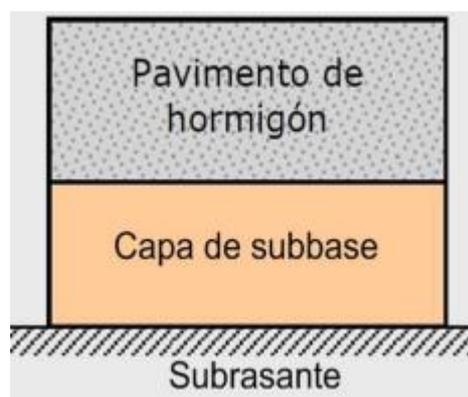
La subrasante es la capa encargada de soportar la estructura de pavimento, las características de resistencia y deformabilidad de ésta, influyen directamente en el tipo y espesor de la estructura de pavimento que se utilice.

Ilustración 10. Estructura convencional del pavimento flexible.



Fuente: (Rivera W. , 2013)

Ilustración 11. Estructura convencional del pavimento rígido.



Fuente: (Rivera W. , 2013)

Cada capa que conforma la estructura del pavimento tiene como función disipar esfuerzos, para que los que lleguen a la subrasante sean mínimos. En algunos proyectos



específicos se suelen incrementar capas adicionales con el fin de mejorar la capacidad de la estructura de pavimento, garantizar adherencia entre capas y/o reducir los esfuerzos transmitidos a la subrasante (Coronado, 2002).

1.2.8.1 Subrasante constituida por limos plásticos y arcillas

La compresibilidad en suelos es la disminución del volumen de éstos cuando sobre ellos se aplican fuerzas externas. En los terrenos de fundación constituidos por limos plásticos y arcillas se pueden distinguir dos casos diferentes:

- Subrasantes constituidas por suelos de baja compresibilidad

A este grupo pertenecen las arcillas, limos y material orgánico de baja plasticidad (CL, ML, OL). En este caso no suelen presentarse problemas que influyan de forma negativa en el comportamiento de la estructura del pavimento, los asentamientos son absorbidos por toda la estructura y el terreno de fundación es capaz de soportar los esfuerzos aplicados en grandes cambios de volúmenes.

- Subrasantes constituidas por suelos de alta compresibilidad

A este grupo pertenecen las arcillas, limos y material orgánico de alta plasticidad (CH, MH, OH). Para este caso, los suelos de alta plasticidad presentan problemas de falta de resistencia y compresibilidad, ocasionando asentamientos considerables que se producen sobre estos al aplicar la sobrecarga de la estructura vial (Arenas, 2000).



2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad, mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Caracterizar el suelo arcilloso del sitio de estudio estableciendo la clasificación del suelo de la AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo SUCS y determinando las propiedades mecánicas del suelo en estado natural según (INV E-148-07).

Establecer la cantidad optima de cemento a agregar para la estabilización del suelo arcilloso y su uso como capa de rodadura con ayuda de las propiedades mecánicas del suelo natural.

Determinar la resistencia, capacidad de soporte y durabilidad del suelo arcilloso ya estabilizado con la cantidad optima de cemento para luego ser comparado con las propiedades mecánicas del suelo en estado natural y ver su mejoría.

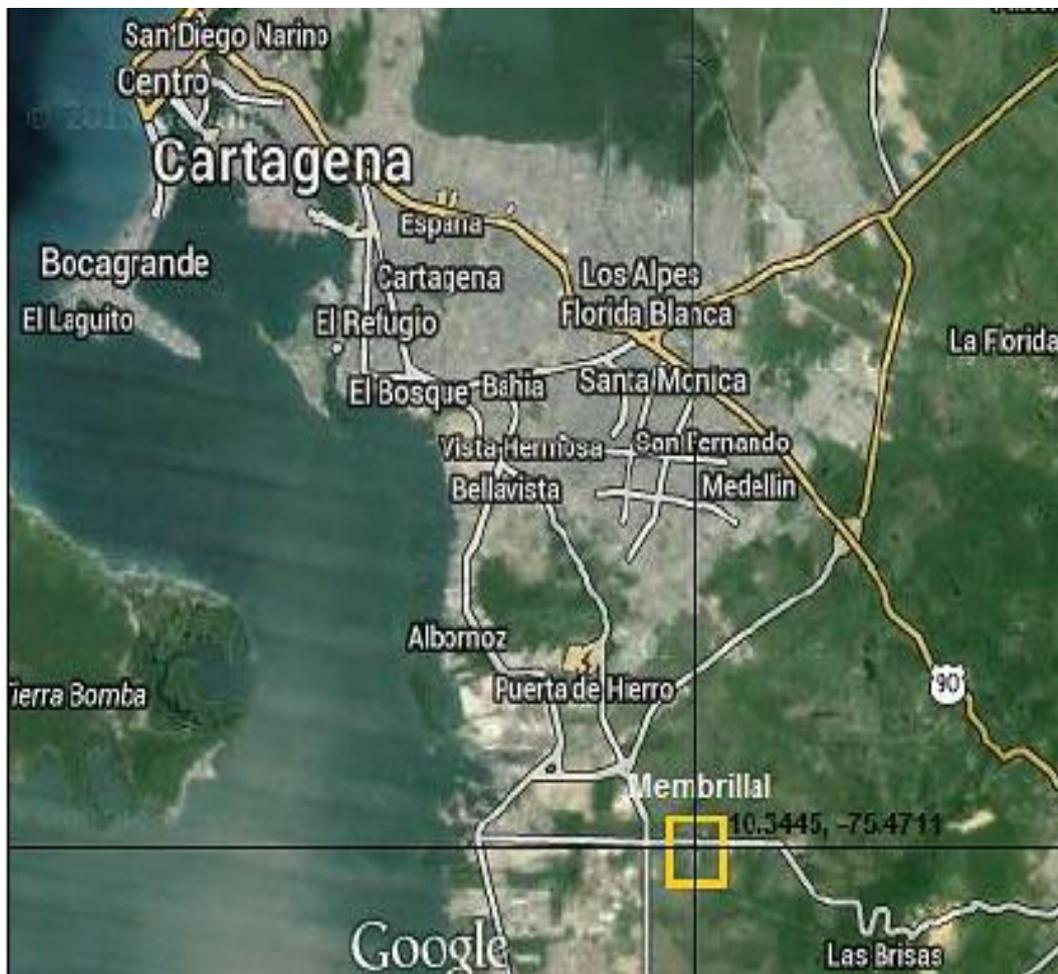
Analizar económicamente la alternativa suelo-cemento en suelos arcillosos con otros casos de estudios, suponiendo una estructura de tráfico de vías de bajo flujo, analizando el comportamiento que tiene la capa de rodadura.



3. ALCANCE

El proyecto investigativo se desarrolló a cabo en la Ciudad de Cartagena de Indias, Capital del departamento de Bolívar, ubicada en la región del Caribe Colombiano. La zona estudiada fue en Membrillal, cerca de la parte Industrial de Mamonal al Sureste (SE) de Cartagena. Con una latitud: $10^{\circ} 20' 40''$ N y longitud: $75^{\circ} 28' 16''$ W. Membrillal pertenece al corregimiento de Pasacaballos que a su vez hace parte del municipio de Cartagena de Indias, Distrito Turístico y Capital; Ver ilustración 12 y 13.

Ilustración 12. Localización de Membrillal.



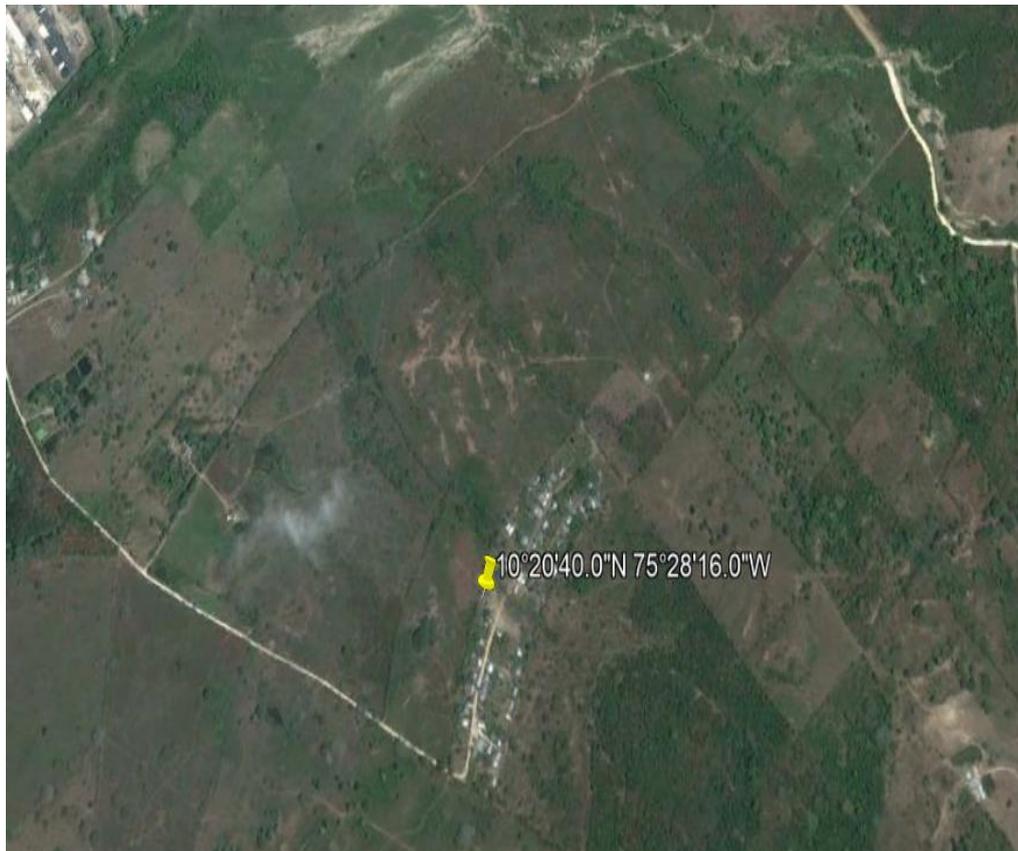
Fuente: (Google Maps, tomada por autores).

La investigación del presente trabajo se llevó a cabo en el primer semestre académico de 2018, el cual empezó con la realización de una serie de pruebas para determinar



características geotécnicas de una muestra del suelo de la zona, en base a una recopilación de toma de muestras in situ, libros, artículos científicos, trabajos de grado y consultas al personal capacitado en lo que a estabilización de suelos y estructuras viales se refiere.

Ilustración 13. Área de estudio de Membrillal



Fuente: (Google Earth, tomada por autores).

Debido a la carencia de los elementos constitutivos, características y propiedades físicas y químicas de los suelos arcillosos de la vereda de Membrillal, Se realizó una categorización del suelo empleando las normas AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo SUCS.

Para saber la plasticidad del suelo, fue necesario realizar ensayos de laboratorio como lo fue los límites de Atterberg, que es la característica de un suelo por medio de la cual se puede moldear, modelar, manipular y deformar sin sufrir cambios de volúmenes y sin agrietarse. (Valparaiso, Laboratorios mecanica de suelos, 2004), se procedió a calcular la densidad máxima seca y con esto hacer el cálculo de CBR y la expansividad del suelo.



Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias



Haciendo uso del recurso de la información secundaria, se estableció la cantidad de cemento de acuerdo al tipo de suelo, ya conocido este valor se realiza el ensayo de densidad seca máxima de la mezcla de suelo-cemento para poder obtener la cantidad óptima de agua a agregar. Luego se desarrolló una serie de ensayos como resistencia a la compresión, humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento y por último y no menos importante conocer económicamente su valor y hacer comparaciones con otro tipo de estructuras de pavimentación.

Las principales limitaciones que se consideraron en el proyecto fueron de carácter práctico-instrumental, es decir, para obtener mejores resultados con las muestras era menester aplicar otros tipos de ensayos, tales como, CBR y expansividad una vez estabilizado el suelo para comparar las mejorías después de aplicado el tratamiento. Este tipo de ensayo no eran recomendables hacerlos en los laboratorios que disponíamos debido a la dificultad que acarrea estos ensayos en los moldes de dichos laboratorios.

Por último, es importante mencionar que el proyecto realizado pretende servir como base para investigaciones relacionadas y/o paralelas al tratamiento de suelos arcillosos y suelos en condiciones inestables, así también, al estudio de las vías de tercer orden del país, buscando implementar una tecnología muy económica y asequible a las poblaciones rurales, con un material que sea durable, con una buena distribución a las cargas aplicadas al suelo, con una mayor rigidez, sea muy resistente, reduzca el impacto ambiental empleando los materiales in situ.



4. METODOLOGÍA

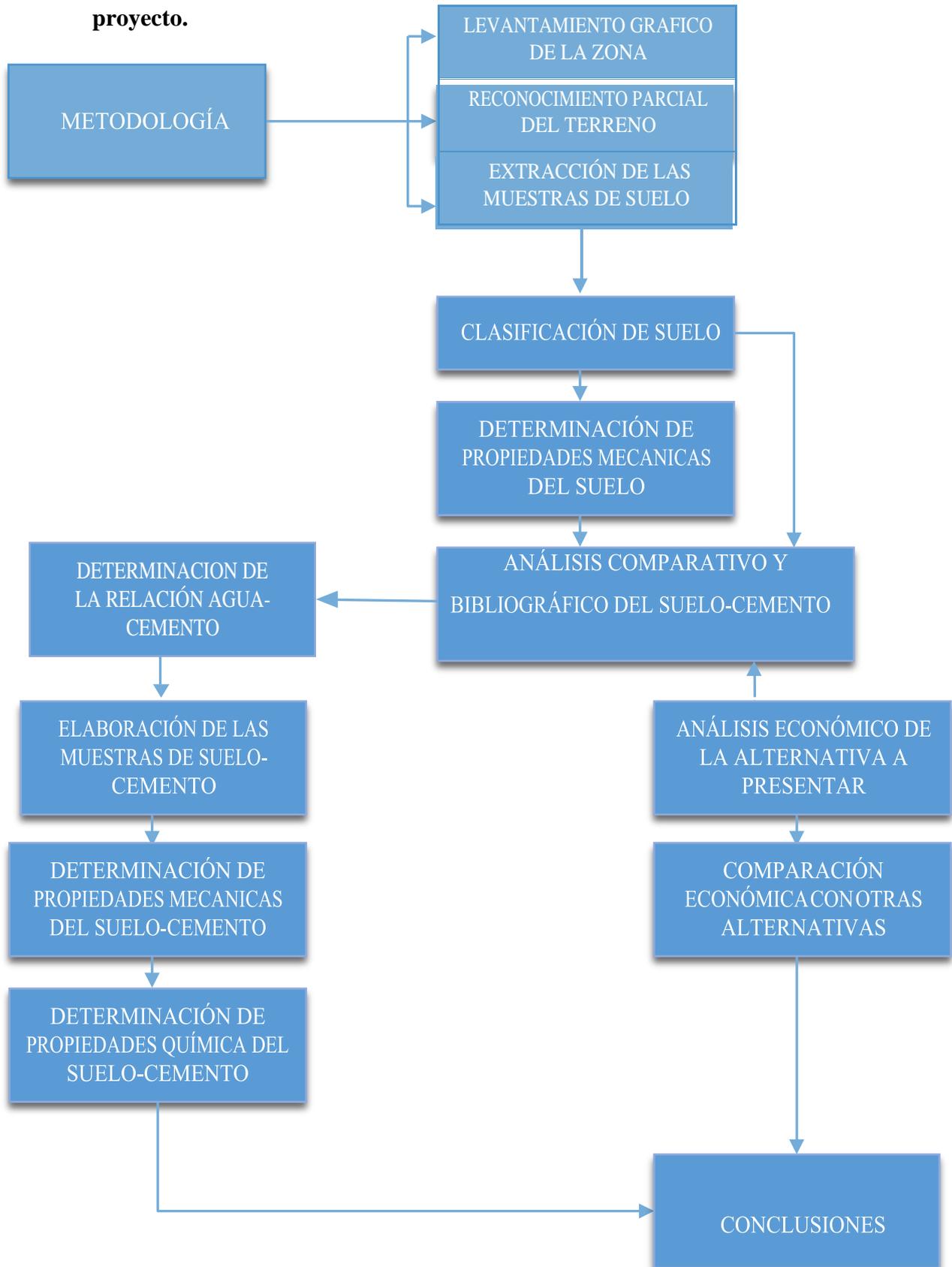
El tipo de investigación planteada en el proyecto es de carácter experimental, teniendo en cuenta que se realizó un análisis de datos obtenidos de ensayos a muestras representativas de la realidad. Con base en los datos derivados de los experimentos del suelo arcilloso de baja plasticidad en estado natural, se empleó técnicas estadísticas, bibliográficas, y comparativas para establecer el porcentaje óptimo de cemento que requiere para su estabilización con la tecnología de suelo-cemento que permitan su uso adecuado como capa de rodadura para vías de tercer orden en Cartagena de Indias, más específicamente en la vereda de Membrillal jurisdicción del corregimiento de Pasacaballos.

La investigación posee un enfoque cuantitativo, puesto que se analizó y se obtuvo valores medibles a través de diferentes procedimientos experimentales, como los son: el análisis granulométrico (INV E-123-07), determinación del contenido de agua (INV E-122-07), Cálculo de los límites de Atterberg (INV E-125-07), (INV E-126-07), y determinación de la relación de soporte de California (INV E-148-07) en el suelo típico de Membrillal. Una vez terminado de analizar el suelo en estado natural, se ensayó la mezcla para determinar la humedad óptima, y con esto así, se analizó la cantidad de agua óptima para la mezcla de suelo-cemento (INV E-611-13), además prueba de resistencia a la compresión confinada (INV E-614-13) y humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento (INV E-612-13) para el suelo típico ya estabilizado con la cantidad óptima de cemento, esto junto con la comparación de análisis de precios unitarios con un tipo de pavimento para vías de bajo flujo del tránsito.

Como se hizo mención en el alcance del estudio la búsqueda y análisis de la información se realizó durante el primer semestre del año 2018.



Ilustración 14. Esquema de la metodología propuesta para el desarrollo del proyecto.





4.1 Análisis de la muestra para la clasificación del suelo típico de Membrillar

Como se ha dicho anteriormente, el suelo es un material que tiene múltiples características, difiriéndolos entre sí. Por esta razón, se analizó detalladamente para poder identificar sus propiedades físicas y mecánicas. El análisis del suelo implicó una extracción de una muestra del mismo; haciendo agujeros de 90 cm de profundidad y no muy separados entre sí, una distancia aproximadamente de 2m, para asegurar que la muestra sea la correspondiente a ese suelo en estudio, se extrajo aproximadamente 100kg de suelo. Estas muestras fueron analizadas en laboratorio. Una vez obtenidos los datos de los diferentes ensayos, se hizo el análisis y la clasificación del suelo según la AASHTO y el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo SUCS.

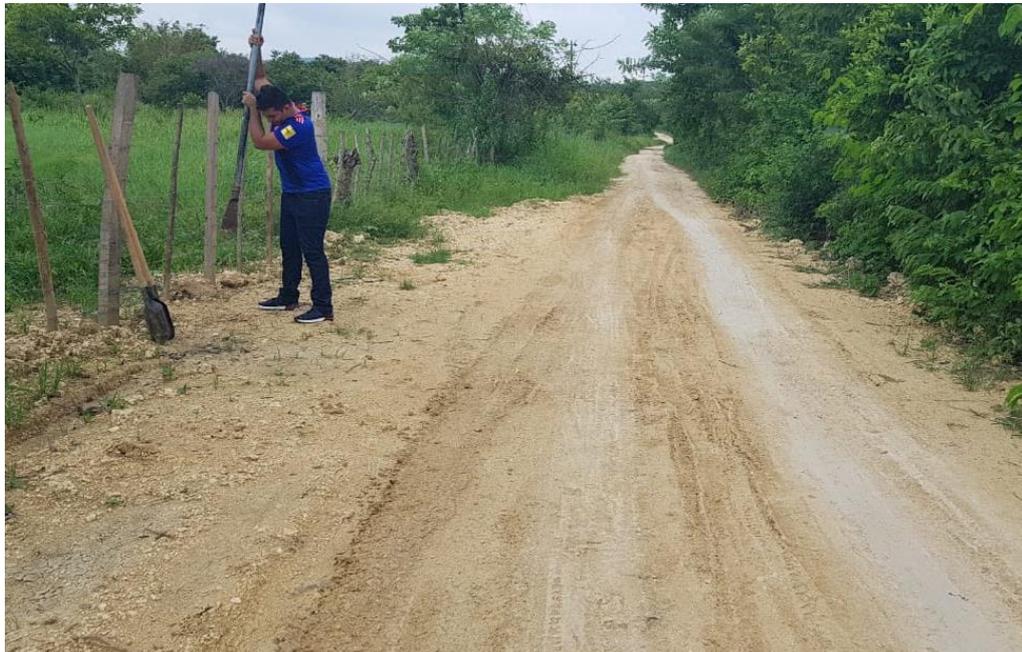
Ilustración 15. Zonas de extracción de muestras



Fuente: Autores, Extraído de Google Earth.



Ilustración 16. Extracción de suelos típicos de Membrillal



Fuente: **Autores.**

4.1.1 Análisis granulométrico del suelo por tamizado

El análisis granulométrico tiene como fin la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo, se tomó una muestra de suelo y se colocó en un recipiente apropiado, cubriéndola con agua y se dejó en remojo hasta que todos los terrones se ablandaron luego se lavó sobre el tamiz de $75\ \mu\text{m}$ (No.200) con abundante agua, sin frotarla contra el tamiz y teniendo mucho cuidado de que no se pierda ninguna partícula de las retenidas en él, posteriormente se recogió lo retenido en un recipiente, se secó en el horno a una temperatura de 110°C y se pesó, luego se hizo pasar por una serie de tamices moviéndolos, de un lado a otro y recorriendo circunferencias de forma que la muestra se mantenga en movimiento sobre la malla, las partículas apresadas en la malla, se separaron con un pincel y se reunió con lo retenido en el tamiz. Por último, se determinó el peso de cada fracción en una balanza para su posterior análisis, esta prueba se rige bajo la norma (INV E-123-07).



Ilustración 17. Estufa con muestra en el recipiente.



Fuente: Autores.

Ilustración 18. Serie de tamices para granulometría.



Fuente: Autores, 2018.

4.1.2 Determinación del contenido de agua, humedad natural de los suelos

El contenido de agua del material se define como la relación, expresada en porcentaje, entre la masa de agua que llena los poros o "agua libre", en una masa de material, y la masa de las partículas sólidas de material (INV E-122-07). Esto se logró, tomando una muestra representativa de la perforación, las cuales fueron guardadas en recipientes herméticos y analizados tan pronto fue posible. Ya obtenidas las muestras, en el laboratorio, con la ayuda de una balanza digital se calculó el peso de un recipiente vacío,



limpio y seco de peso conocido; se colocaron las muestras húmedas y se pesaron. Posteriormente se introdujo en el horno de secado las muestras húmedas, y se dejaron en el proceso de secado durante 24 horas, luego el material y el recipiente se enfriaron a la temperatura ambiente, o hasta que el recipiente pudo ser manejado fácilmente con ambas manos. Se determinó el peso del recipiente y de la muestra secada en el horno usando la misma balanza que su usó para pesar la muestra húmeda. La normativa a seguir para el ensayo fue (INV E-122-07).

Ilustración 19. Horno de secado con muestras en los recipientes.



Fuente: Autores, 2018.

4.1.3 Determinación del límite líquido de los suelos

El ensayo consistió en colocar una muestra sobre un recipiente mientras poco a poco se le fue adicionando agua de 1 a 3 ml aproximadamente hasta llegar de 15 a 20 ml se fue agitando, amasando y cortándola con una espátula en forma alternada y repetida hasta adquirir una consistencia tal que, al ser divididas en dos porciones estas comenzaron a fluir y se procedió a accionar la cazuela elevando la manija y contando los golpes necesarios para que la muestra se junte nuevamente. Luego se pesó y se puso el suelo dentro del recipiente en el horno a 110°C hasta obtener peso constante y se volvió a pesar



tan pronto como se enfrió, pero antes de que pueda haber absorbido humedad. Una vez terminado el ensayo se transfirió el suelo sobrante en la cazuela de bronce a un recipiente, mientras se fue lavando y secando la cazuela y el ranurador, se armó de nuevo el aparato del Límite Líquido para repetir el ensayo. El objeto de este procedimiento es obtener muestras de tal consistencia que al menos una de las determinaciones del número de golpes requeridos para cerrar la ranura del suelo se halle en cada uno de los siguientes intervalos: 25-35; 20-30; 15-25, de manera que la oscilación entre las 3 determinaciones sea de, por lo menos, 10 golpes (INV E-125-07).

Ilustración 20. Cazuela de Casagrande usado en el laboratorio.



Fuente: Autores, 2017.

4.1.4 Determinación del límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

El procedimiento experimental para la obtención del límite plástico e índice de plasticidad se basó en tomar una muestra representativa del material extraído en la perforación realizada, ya humedecida, se mezcló con un poco de agua hasta obtener una consistencia plástica que permitió moldear pequeñas esferas sin adherirse a las manos. Una parte de esta mezcla se hizo rodar con las palmas de las manos sobre un vidrio, dándole la forma de pequeños cilindros, haciendo una pequeña presión sobre los rodillos con el fin de obtener el mismo diámetro a lo largo de toda su longitud. Este procedimiento se continuo hasta cuando los rodillos se fisuraron y agrietaron al lograr un diámetro de 3mm



aproximadamente. Los pequeños cilindros fueron colocados en unos recipientes se pesaron y posteriormente fueron llevados a secar al horno por un lapso de 24 horas.

Los valores obtenidos de este procedimiento experimental indican el contenido más bajo de agua, en el cual el suelo permanece en estado plástico y además el tamaño del intervalo de contenido de agua, expresado como un porcentaje de la masa seca de suelo, dentro del cual el material está en un estado plástico (INV E-126-07).

4.2 Análisis y determinación de densidad máxima seca y humedad optima

Se preparó nueve moldes, cada uno con diferentes números de golpes, tres con 56, otros tres con 26 y los últimos con 12 golpes. Se pesó cada uno de los moldes, en tanto se fue organizando cada uno de los moldes, adicionándoles el fondo con su papel y el collar, al igual que ponerlo en su soporte, se calculó cuánta agua necesita para llegar al porcentaje de humedad deseado, una vez calculado, se preparó el suelo y se humedece para luego así, dividir en 5 partes y vaciar en los moldes para ser compactada capa por capa, se terminó de compactar las 5 capas, se quitó el collar, el papel del fondo, el soporte del molde y se enrazó, de ahí nuevamente se pesó el molde con la muestra enrazada. Este proceso fue igual para los nueve moldes con sus diferentes números de golpes, ya antes mencionado.

Ilustración 21. Muestra tamizada, humedecida y lista para compactación.



Fuente: Autores, 2018.



Ilustración 22. Muestra compactada en el molde lista para enrasar.



Fuente: Autores, 2018.

4.3 Determinación de la expansividad del suelo

Una vez terminado de compactar todos los moldes se colocaron las placas perforadas con vástago, y, sobre esta, los anillos necesario o pesas para que se completara la sobre carga tal, que produjo una presión equivalente a la de una capa de rodadura. Con la aplicación de contrapesos se calculó la lectura inicial para medir la expansión colocando el trípode de medida con sus patas sobre los bordes del molde, haciendo coincidir el vástago del extensómetro con el de la placa perforada. Se anotaron todas las lecturas de los 9 moldes, el día y la hora. Se sumergieron los moldes en una piscina con agua en su totalidad, este proceso de remojo se dio en un espacio de 72 horas, al final del periodo de inmersión se tomaron las lecturas de expansión final, con el trípode y el extensómetro. Pasado este periodo, se sacaron los moldes del agua, dejándolos escurrir durante 15 minutos en su posición normal, se retiraron las sobrecargas y las placas perforadas y se registró los pesos en cada condición.



4.4 Análisis y cálculo de la relación de soporte de California CBR

La prueba de CBR, se efectuó bajo condiciones controladas de humedad y densidad, por lo tanto, se realizó el ensayo de compactación para obtener los datos de humedad y así poder calcular la máxima densidad seca de nuestra muestra aleatorizada, dicho procedimiento experimental estará regido con la normativa (INV E-142-07).

Posteriormente a la inmersión de 72 horas explicada anteriormente se colocó sobre los moldes las mismas sobrecargas que tuvo durante el periodo de inmersión. Para evitar el empuje hacia arriba del suelo arcilloso dentro del agujero de las pesas de sobrecarga, se asentó el pistón luego de poner la primera sobrecarga sobre la muestra. Se montó el dial medidor para medir la penetración del pistón, seguido a esto se situó el dial medidor en cero, se aplicó cargas axiales a las probetas con la prensa con una velocidad uniforme de penetración, temporizando a 30 s, 1 min, 1.5 min, 2 min, 3 min, 4 min, 6 min, 8 min, 10 min, y registrando la penetración, y cargas. Este procedimiento de ensayo se describe con la norma (INV E-148-07).

Ilustración 23. Moldes con sus contrapesos y piscina de inmersión.



Fuente: Autores, 2018



4.5 Análisis comparativo y bibliográfico para la obtención del porcentaje de cemento óptimo en peso

Para establecer la cantidad optima de cemento a agregar en la estabilización del suelo arcilloso, se realizó un análisis comparativo y bibliográfico, para esto, en primera instancia se necesitaron los resultados arrojados por el análisis granulométrico, en ese orden de ideas, se ingresó a la tabla 8 donde se explica cuáles son los suelos aptos para mezclas de suelo-cemento. Esta tabla esta denominada contenidos de cemento aproximados para proyectar las mezclas de suelo-cemento según la (Portlad Cement Association, 1971), en donde se explica que los suelos limosos y arcillosos debido a sus bajas resistencia, necesitan contenidos moderados de cemento para brindar una mezcla satisfactoria. (Valdivia Cariat, Octubre 2016). Ya establecido un rango de porcentaje de cemento según el tipo de suelo, se procedió a realizar la determinación de la cantidad de agua para la mezcla, así como las pruebas de cálculo de la resistencia a la compresión confinada con cada porcentaje del rango obtenido del análisis bibliográfico y resistencia de la mezcla al desgaste.

4.6 Obtención de la cantidad de agua para la mezcla de suelo-cemento

Para el cálculo de nuestra última proporción para la mezcla, se determinó por medio del ensayo de Proctor estándar la cantidad de agua necesaria para llegar a la densidad máxima de la mezcla de suelo-cemento. Primeramente, se calculó la humedad natural del suelo para luego si saber que tanta cantidad de agua necesitaba la mezcla para llevar a la densidad máxima, mientras tanto se determinó que tanto suelo se necesitará para el ensayo y con esa medida se obtuvo la cantidad optima de cemento. Se pesó cada uno de los moldes, en tanto se fue organizando cada uno de los moldes, adicionándoles el fondo con su papel y el collar, al igual que ponerlo en su soporte Se mezcló hasta que se visibilizó un color homogéneo y una vez así, se fue adicionando el agua calculada para ir conociendo a que porcentaje de humedad de la mezcla de suelo-cemento se encontraba la densidad máxima. Una vez esa mezcla se dividió en tres partes para compactar por capa con 26 golpes cada una, se quitó el collar, fondo y el soporte del molde, se enrazó, de ahí nuevamente se pesó el molde con la muestra enrazada. Este proceso fue igual para los tres moldes. Esta norma la rige (INV E-611-13).



4.7 Cálculo de la resistencia a la compresión de cilindros moldeados de suelo-cemento

Para la estabilización del suelo típico de Membrillar y su uso como capa de rodadura se realizaron probetas de suelo-cemento con un diámetro de 101.6mm (4”) y una altura de 203.2mm (8”), con un total de 9 probetas con 12% de cemento para hacer el ensayo a 7, 14 y 28 días. A su vez se realizaron ensayos con cemento tipo III que da su resistencia máxima a los 7 días para porcentajes de 10% y 14%. Se realizaron los procesos de mezclado del material arcilloso previamente compactado y pasado por el tamiz número 4, con la cantidad optima de cemento y la cantidad optima de agua. Se procedió con la aplicación de una capa delgada de aceite en las paredes interiores de los moldes con el fin de que el suelo-cemento no se pegue en el interior de las paredes y sea de fácil retirado.

Se colocó una masa uniforme de suelo-cemento dentro de los moldes, los cuales fueron compactados con una varilla apisonadora en forma firme y con poco impacto. Esta operación se realizó de manera cuidadosa para evitar vacíos en las mezclas arcillosas de suelo-cemento.

Ilustración 24. Mezclado de suelo-cemento



Fuente: Autores, 2018.



En primera instancia se determinó su peso en gramos con ayuda de una balanza eléctrica y haciendo uso de un pie de rey se determinan las medidas de las probetas como lo fueron su longitud y el diámetro. Se tomaron tres medidas del diámetro, una cerca de cada uno de los extremos y una en la parte central de la longitud de la muestra, esto para encontrar las áreas con las distintas medidas y con esto, establecer un área neta, la cual era una medida más representativa y acercada a la realidad. Los especímenes creados son mostrados en la ilustración No 25.

Ilustración 25. Especímenes de Suelo - Cemento



Fuente: Autores, 2018.

Subsiguientemente se llevó a la prensa, la cual aplicó determinadas cargas que quedaron registradas en la pantalla de la misma, junto con las deformaciones correspondientes. La aplicación de la carga fue aplicada por la prensa a una velocidad baja y de forma controlada hasta que la muestra falló; en este punto se anotó la carga mostrada en la pantalla de la maquina universal para la cual sucede lo dicho anteriormente y mostrado en la ilustración No 26.



Ilustración 26. Pantalla de maquina universal WizardBasic



Fuente: Autores, 2018

Los datos obtenidos del ensayo fueron la carga última y el área neta, y con esto se calculó el esfuerzo último. Esto con el objeto de conocer lo resistente a acciones de cargas producidas por el flujo del tránsito. La normativa a seguir es (INV E-614-13).

4.9 Análisis de precio unitario comparativo para una capa de rodadura estabilizada con suelo-cemento y un pavimento flexible

Para analizar económicamente la alternativa suelo-cemento en suelos arcillosos con otros casos de estudios, se realizaron dos (APU) análisis de precio unitario, en este caso la comparación se dio entre la capa de rodadura ya estabilizada con la tecnología suelo-cemento y un pavimento flexible, es menester aclarar que las estructuras se encuentran en igualdad de condiciones de carga, debido a que estarán con flujos de tránsito bajo, siendo objetos de comparación de vías rurales. En ese orden de ideas los precios unitarios para un pavimento flexible y para la capa de rodadura fueron calculados mediante tablas



en Excel, con sus respectivos costos como transporte, equipos y herramientas, materiales y mano de obra, todos estos rubros serán extraídos del (Instituto Nacional de Vías, 2017).

4.10 Preparación de resultados y análisis comparativo

Por último, después de haber cumplido con todos los ensayos requeridos para evaluar las propiedades mecánicas de un suelo arcilloso de baja plasticidad mediante el uso de suelo-cemento para ser utilizado como capa de rodadura en vías de tercer orden, se procedió a preparar el informe definitivo donde se evalúan estas propiedades, dando así una mejor alternativa para las comunidades rurales.



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo contiene los resultados y su análisis detallado, obtenidos luego de tomar como punto de partida la revisión bibliográfica realizada y el desarrollo del procedimiento descrito en el capítulo anterior, para así crear la metodología que permite obtener los mejores resultados para una capa de rodadura de suelo-cemento en vías de tercer orden. Se muestran los resultados de las variables obtenidas a partir de los diferentes ensayos realizados en laboratorio, ubicados en Cartagena de Indias, Colombia.

5.1 Clasificación y propiedades mecánicas del suelo

A partir de la búsqueda y extracción de muestras de suelo se realizaron estudios para determinar las propiedades mecánicas del suelo, tales como su resistencia, al igual se hicieron estudios de las variables que se relacionan para determinar la clasificación del suelo como lo son el contenido de agua, granulometría, límites de Atterberg. Como se ha dicho anteriormente el suelo fue clasificado según la AASHTO y SUCS.

Cabe recalcar que, en la extracción de muestras de suelo, se realizaron 3 apiques a un costado de la carretera que conduce hacia el cabildo indígena Zenú con distancia entre ellos de aproximadamente 2m y una profundidad de 90cm en donde se empezó a tomar la muestras, aproximadamente se tomaron 100kg de suelo local. Luego se llevaron a laboratorio diferentes tipos de suelo, denotados por su color y textura, esto con el fin de reconocer que tipo de suelo es el peor y hacer los estudios pertinentes para el cumplimiento de los objetivos establecidos en este documento. Una vez se extrajo el suelo, se guardó en recipientes herméticos para ser lo más preciso posible en cuanto a la humedad natural del suelo utilizando la ecuación 1. En la tabla 9 se presentan los datos de secado por horno durante 24 horas.

Tabla 9. Humedad natural de muestra secada en el horno.

HUMEDAD NATURAL			
Muestra	Peso húmedo	Peso seco	Humedad
1	530	460.3	15.14%

Fuente: (Autores, 2018)



Para la granulometría, se tomó una muestra de 102 g para ser lavada en el tamiz#200, hasta que la muestra quedó sin resto de limos y contenido orgánico. La muestra libre de material orgánico y limos se secó en la estufa y se procedió a ser gradada obteniendo el peso retenido en una serie de tamices presentados en la tabla 10. El peso de la muestra utilizado para realizar la granulometría corresponde a la masa seca retenida en el tamiz#200, libre de limos y contenido orgánico. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la cantidad de material retenido en el fondo corresponde a la muestra que paso por el tamiz#2 luego al ser lavada la muestra.

Tabla 10. Granulometría de la muestra de suelo.

GRANULOMETRÍA				
Peso de la muestra 1				101.16
Tamiz	P. Ret.(g)	% P. Ret.	% P. Ret. Acum.	% pasa
3/4 “	0.00	0.00	0.00	100.00
1/2 “	0.00	0.00	0.00	100.00
3/8”	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 4	0.00	0.00	0.00	100.00
No. 10	4.02	3.97	3.97	96.03
No. 40	9.54	9.43	13.40	86.60
No. 100	30.38	30.03	43.44	56.56
No. 200	19.51	19.29	62.72	37.28
Fondo	37.71	37.28	100.00	0.00

Fuente: (Autores, 2018)

Para hallar el límite líquido se tomaron los siguientes datos, tabulados en la siguiente tabla.



Tabla 11. Cálculo del límite líquido para la muestra de suelo.

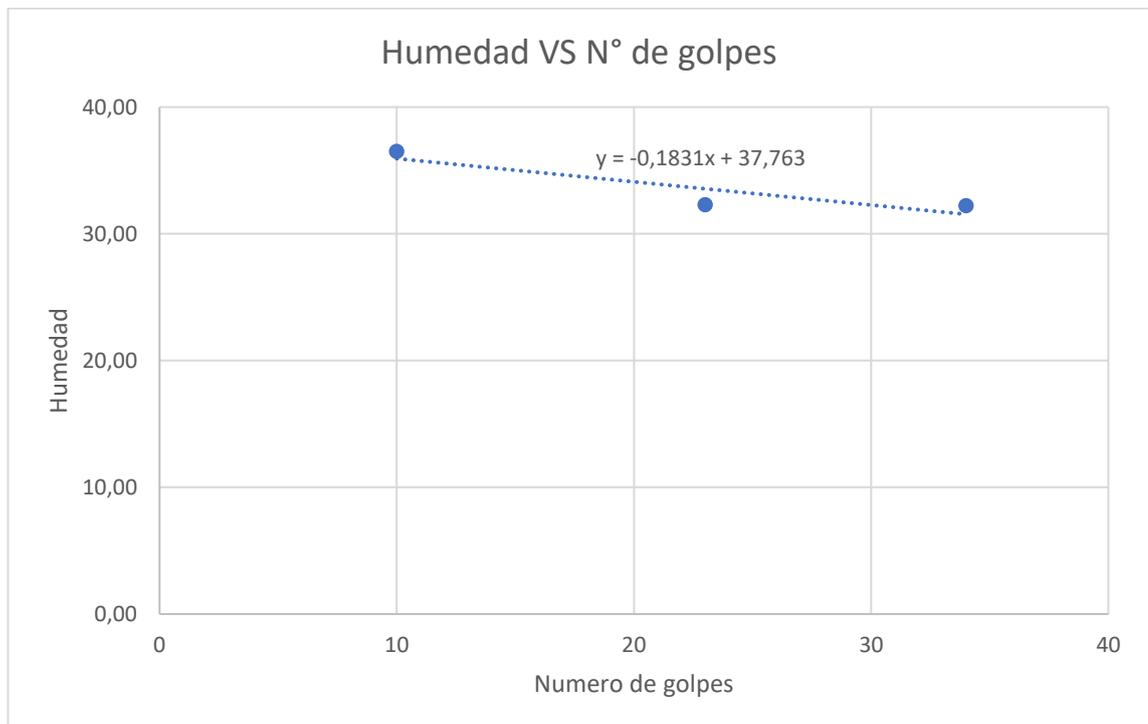
LIMITE LIQUIDO MUESTRA 1			
N° Recipiente	53	7	19
N° Golpes	34	23	10
Peso recipiente + material húmedo	31.14	35.64	34.98
Peso recipiente + material seco	26.33	29.6	28.46
Peso del Agua	4.81	6.04	6.52
Peso del recipiente	11.4	10.9	10.6
Peso Material Seco (g)	14.93	18.7	17.86
%ω	32.22	32.30	36.51
L.L.	33.57	31.96	32.62

Fuente: Autores, 2018.

Gracias al resultado obtenido se calculó el límite líquido del suelo con la ecuación 2, sacando un promedio de los límites líquidos calculados anteriormente para las tres muestras del mismo material, se tiene que: $L.L = 33.19\%$

Con los datos anteriores se graficó humedad Vs el número de golpes.

Ilustración 27. N° de Golpes Vs Humedad (%)



Fuente: (Autores, 2018)



De acuerdo con la ilustración número 27, se observa una relación inversamente proporcional entre el número de golpes y el porcentaje de humedad del suelo, es decir, a mayor contenido de agua en la muestra de suelo menor es el número de golpes necesarios para unir las dos mitades.

Para hallar el límite plástico se usó la ecuación 3 y se tomaron los mismos datos que en el caso anterior, los cuales se encuentran tabulados en la tabla 12.

Tabla 12. Cálculo del límite plástico para la muestra de suelo.

LIMITE PLÁSTICO MUESTRA 1			
N° Recipiente	13	27	61
Peso recipiente + material húmedo	12.94	13.59	11.52
Peso recipiente + material seco	12.64	13.29	11.19
Peso del Agua (g)	0.3	0.3	0.33
Peso del recipiente	11	11.6	9.2
Peso Material Seco	1.64	1.69	1.99
$\% \omega = L.P$	18.29%	17.75%	16.58%

Fuente: Autores, 2018

Promediando los resultados de las muestras de los recipientes se obtiene que:

$$L.P = 17.54\%$$

Como dice la norma (INV E-126-07), si el límite plástico tiene decimales se aproxima al número entero más cercano, por lo tanto:

$$L.P = 18\%$$

Ya con los datos completamente calculados se procede a determinar el índice de plasticidad que no es más que la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

$$I.P = 33.19 - 18$$

$$I.P = 15.19$$



Con un Índice de Plasticidad de 15.19 % según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos es un tipo de suelo CL que significa que es una arcilla de baja plasticidad y según la ASSHTO como un suelo tipo A-6.

5.2 Determinación de la densidad seca máxima y la humedad óptima del suelo

La densidad seca máxima del suelo es una de las más importantes variables de estudio y control de calidad de la compactación del terreno. Se hizo en base a la relación que tiene dicha variable con el grado humedad y la aplicación de una energía determinada, la norma que rige dicho ensayo es (INV E-142-07).

La tabulación de los datos inicia con las referencias de los moldes y sus números de golpes, estos fueron compactados, pesados y saturados para trabajar en las condiciones más desfavorables. Se calculó la densidad humedad con la relación de masa sobre volumen, se determinó un volumen del molde de 2316.7 cm³, con el cual se procedió a calcular la humedad seca con la ecuación 6:

$$\gamma_d = \frac{\gamma_m}{100 + w(\%)} \times 100$$

Estos datos fueron tabulados en la tabla 13.

Tabla 13. Datos tabulados de pesos del material y cálculo de densidades.

N° Golpes									
DENSIDAD	56			26			12		
Molde N°	12	3H	3	25	9	65	2D	1	2
Peso Molde+suelo Comp. (Gr)	8000	8982	10086	9202	9778	8150	9610	9754	9796
Peso Molde (Gr)	3650	4230	5318	4890	5130	3558	5250	5230	5270
Peso Suelo Comp. (Gr)	4350	4752	4768	4312	4648	4592	4360	4524	4526
Densidad Húmeda (Gr/Cm ³)	1,88	2,05	2,06	1,86	2,01	1,98	1,88	1,95	1,95
Densidad Seca (Gr/cm ³)	1,67	1,78	1,76	1,61	1,70	1,65	1,59	1,64	1,61
Densidad Seca (Lb/Pie ³)	104,4	111,0	109,8	100,4	105,9	102,9	99,3	102,2	100,6

Fuente: (Autores, 2018)



En cada cilindro se tomó una muestra de suelo compactado que se puso a secar y con base a eso se realizaron los respectivos cálculos del porcentaje de humedad de compactación utilizando la ecuación 1:

$$w = \frac{W_w}{W_s} * 100$$

Estos datos fueron tabulados en la tabla 14.

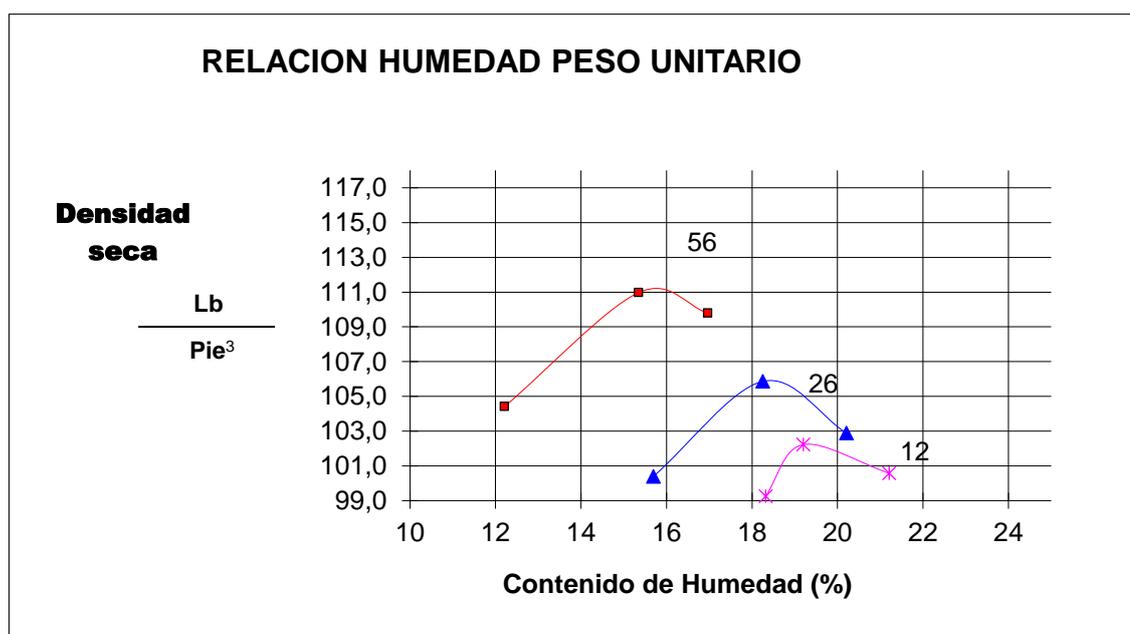
Tabla 14. Porcentaje contenido de humedad de compactación.

CONTENIDO DE HUMEDAD									
Molde No	12	3H	3	25	9	65	2D	1	2
Peso Recip + suelo Húmedo (Gr)	170,0	157,1	162,0	160,0	160,0	160,0	160,0	151,5	160,0
Peso Recip + Suelo seco (Gr)	151,5	136,2	138,5	138,3	135,3	133,1	135,2	127,1	132,0
Contenido de Humedad (%)	12,21	15,35	16,97	15,69	18,26	20,21	18,32	19,20	21,21

Fuente: Autores, 2018.

Tabulados todos los datos se procedió a realizar la gráfica No 27 de contenido de humedad (%) vs. Densidad seca o Peso seco (Lb/pie³).

Ilustración 28. Contenido de humedad (%) VS Densidad seca o Peso seco (Lb/pie³).



Fuente: Autores, 2018.



Una vez graficada la curva de humedad contra densidad seca se puede conocer la densidad seca máxima que vendrá siendo el vértice de la parábola en el eje de las ordenadas. Las densidades máximas secas correspondientes a cada número de golpes están tabuladas en la tabla 15.

Tabla 15. Porcentaje contenido de humedad óptima y densidad máxima.

Golpes/Capa	Humedad Optima	Densidad Máxima Lb/Pie3	Densidad Máxima Gr/Cm3
56	15.4 %	111.1	1.78
26	18.3 %	105.9	1.70
10	19.2 %	102.2	1.64

Fuente: Autores, 2018.

5.3 Evaluación de la expansividad del suelo

Dado que la expansividad se produce exclusivamente en suelos arcillosos, y que es precisamente en este tipo de suelo el correspondiente a este estudio, se le realizó la prueba de expansión a muestras de suelo compactadas en donde se tomaron lecturas antes y después de la sumersión de 72 horas como indica la norma correspondiente a este ensayo (INV E-148-07).

Los datos determinados de lectura inicial, final se encuentran en la tabla 16. Para el cálculo de la expansión total se utilizó la ecuación 8.



Tabla 16. Porcentaje de expansión máxima del suelo.

PRUEBA DE EXPANSION									
Molde No	12	3H	3	25	9	65	2D	1	2
Lectura Inicial Dial (PG)	234	25	188	42	152	54	15	43	22
Expansión Total (PT)	533	344	445	370	410	365	179	266	178
Expansión Máxima (%)	5.98	6.38	5.14	6.56	5.16	6.22	3.28	4.46	3.12

Fuente: Autores, 2018.

La expansión máxima en el suelo en estudio no es elevada y corrobora la información obtenida de los diferentes ensayos ya realizados. Entre más elevado sea el índice de plasticidad, será mucho mayor la expansión. Es un suelo arcilloso ubicado en una categoría media baja de expansividad de acuerdo con la tabla 5. Para corroborar estos datos se utiliza la tabla propuesta por (Seet et al, 1962) donde se ubica en la categoría media de expansividad.

5.4 Determinación Relación de Soporte de California CBR

En esta etapa se presentan todos aquellos resultados productos de los análisis realizados en campo y laboratorio. Para obtener la relación de soporte de California (CBR) de una muestra de suelo arcilloso sin alterar el cual fue saturado para trabajar en las condiciones más desfavorables. Primero se realizó un ensayo de compactación con base a la norma (INV E-142-07) el cual se registraron los valores de densidad seca máxima y densidad humedad y a su vez obtener la humedad óptima.

Posterior a estos ensayos se tabularon los datos de CBR, los cuales se basan en la relación de carga para una penetración de 0.1”, es menester aclarar que, si el valor de CBR a una penetración de 0.2” es mayor, este ensayo debe repetirse, pero si en un segundo ensayo se produce nuevamente un mayor valor de CBR de 0.2” de penetración, estos valores serán aceptados. (INV E-148-07)



El primer ensayo de CBR se realizó para 3 moldes de 56 golpes, donde primero se convirtieron las lecturas del Dial en carga (PSI), multiplicando por un factor de 0.66, posterior a esto se determina el CBR a 0.1" de penetración y CBR a 0.2" de penetración con la ecuación 7:

$$CBR\ 0.1" = \frac{Carga * 100}{1000 * 3.09} \qquad CBR\ 0.2" = \frac{Carga * 100}{1500 * 3.09}$$

Estos datos fueron tabulados en la tabla No 17.

Tabla 17. Lectura de Penetración CBR de Suelo Arcilloso a 56 Golpes

PENETRACION CBR							
MOLDES		12		3H		3	
GOLPES		56					
Tiempo	Penetración	Lectura	Carga	Lectura	Carga	Lectura	Carga
0 seg	0	0	0	0	0	0	0
30 seg	0,025	103	68,0	110	72,6	128	84,5
1 min	0,050	142	93,7	146	96,4	194	128,0
1.5 min	0,075	194	128,0	198	130,7	236	155,8
2 min	0,100	245	161,7	278	183,5	300	198,0
3 min	0,150	360	237,6	357	235,6	370	244,2
4 min	0,200	431	284,5	456	301,0	400	264,0
6 min	0,300	532	351,1	491	324,1	471	310,9
8 min	0,400	575	379,5	518	341,9	520	343,2
10 min	0,500	598	394,7	558	368,3	553	365,0
CBR 0.1=		5,2		5,9		6,4	
CBR 0.2=		6,1		6,5		5,7	

Fuente: Autores, 2018.

Se elige el CBR mayor y tabula junto con la densidad seca máxima para 56 golpes como se muestra a continuación:

Tabla 18. Relación Densidad Máxima vs CBR máximo

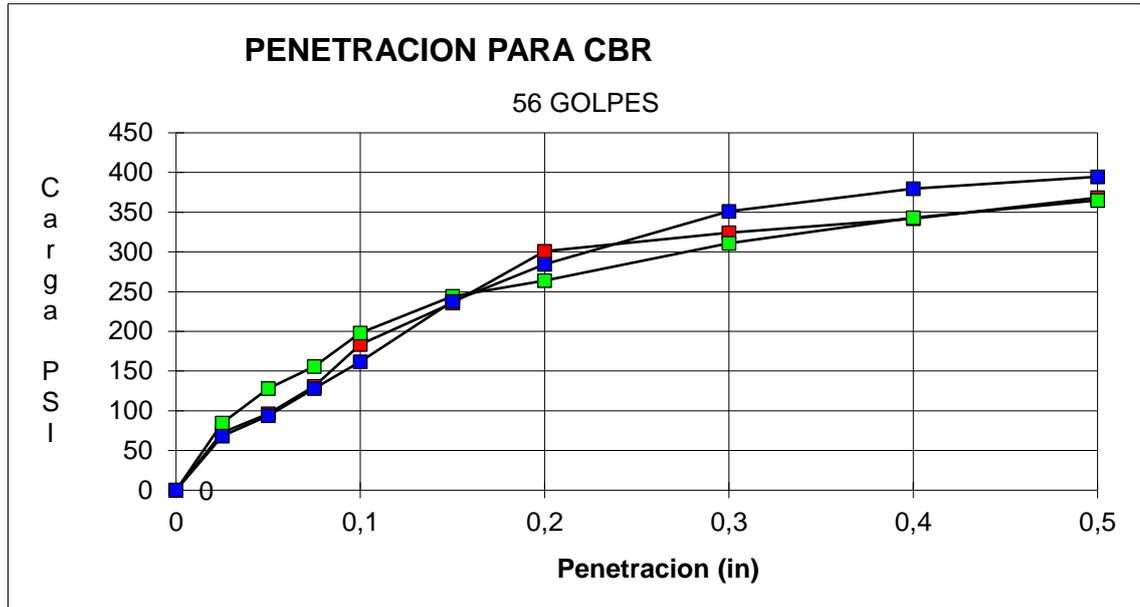
Densidad Maxima (lb/ pie3) =	104,4	111,0	109,8
Maximo CBR=	6,1	6,5	6,4

Fuente: Autores, 2018.

Se graficó la carga PSI vs la penetración mostrando cada línea un molde en la ilustración No. 29 mostrada a continuación.



Ilustración 29. Grafica de Carga (PSI) vs Penetración (in)



Fuente: Autores

Se realiza el mismo procedimiento de CBR para 3 moldes de 26 golpes, los cuales fueron tabulados en la tabla No 19.

Tabla 19. Lectura de Penetración CBR de Suelo Arcilloso a 26 Golpes

PENETRACION CBR							
MOLDES		25		9		65	
GOLPES		26					
Tiempo	Penetración	Lectura	Carga	Lectura	Carga	Lectura	Carga
0 seg	0	0	0	0	0	0	0
30 seg	0,025	95	62,7	125	82,5	74	49
1 min	0,050	134	88,4	173	114,2	114	75
1.5 min	0,075	173	114,2	214	141,2	165	109
2 min	0,100	215	141,9	261	172,3	201	133
3 min	0,150	275	181,5	316	208,6	250	165
4 min	0,200	343	226,4	365	240,9	310	205
6 min	0,300	414	273,2	441	291,1	388	256
8 min	0,400	467	308,2	494	326,0	414	273
10 min	0,500	524	345,8	536	353,8	456	301
CBR 0.1=		4,6		5,6		4,3	
CBR 0.2=		4,9		5,2		4,4	

Fuente: Autores, 2018.



Se elige el CBR mayor y tabula junto con la densidad seca máxima para 26 golpes como se muestra a continuación:

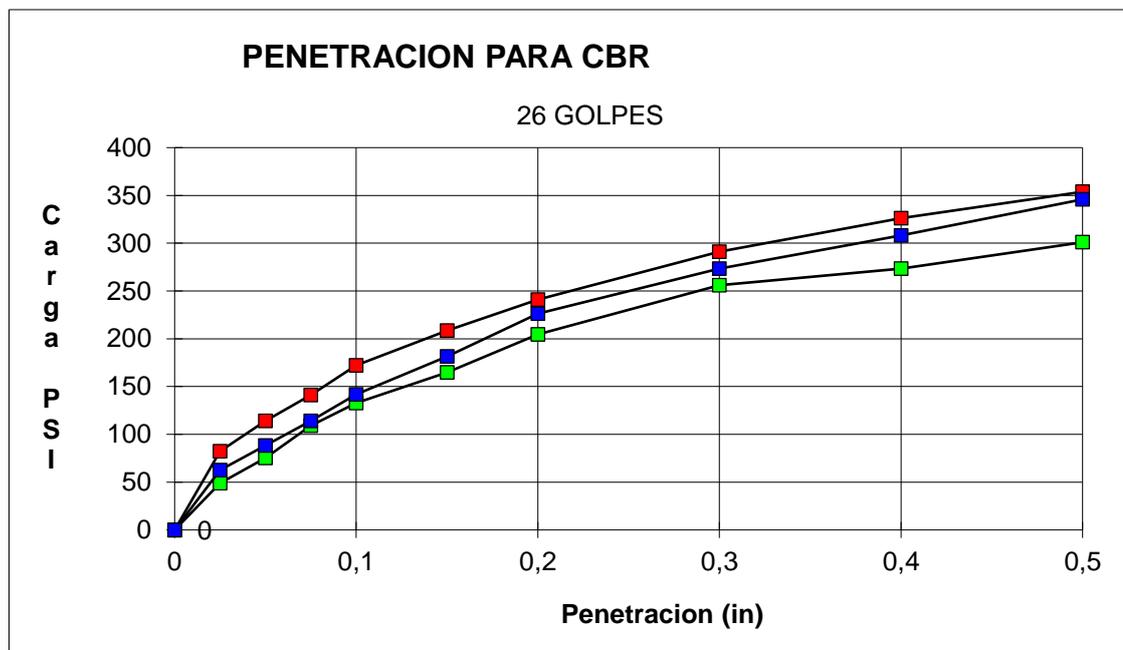
Tabla 20. Relación Densidad Máxima vs CBR máximo

Densidad Maxima =	100,4	105,9	102,9
Maximo CBR=	4,9	5,6	4,4

Fuente: Autores, 2018.

Se graficó la carga PSI vs la penetración mostrando cada línea un molde.

Ilustración 30. Grafica de Carga (PSI) vs Penetración (in)



Fuente: Autores, 2018.

Por último, se procedió de CBR para 3 moldes de 12 golpes, los cuales fueron tabulados en la tabla No 21.



Tabla 21. Lectura de Penetración CBR de Suelo Arcilloso a 12 Golpes

PENETRACION CBR							
MOLDES		2D		1	2		
GOLPES		12					
Tiempo	Penetración	Lectura	Carga	Lectura	Carga	Lectura	Carga
0 seg	0	0	0	0	0	0	0
30 seg	0,03	86	56,8	81	53,5	70	46,2
1 min	0,05	129	85,1	148	97,7	131	86,5
1.5 min	0,08	157	103,6	188	124,1	182	120,1
2 min	0,10	195	128,7	221	145,9	225	148,5
3 min	0,15	222	146,5	289	190,7	278	183,5
4 min	0,20	268	176,9	315	207,9	320	211,2
6 min	0,30	304	200,6	392	258,7	371	244,9
8 min	0,40	345	227,7	437	288,4	415	273,9
10 min	0,50	401	264,7	469	309,5	450	297,0
CBR 0.1=		4,2		4,7		4,8	
CBR 0.2=		3,8		4,5		4,6	

Fuente: Autores, 2018

Se elige el CBR mayor y tabula junto con la densidad seca máxima para 12 golpes como se muestra a continuación:

Tabla 22. Relación Densidad Máxima vs CBR máximo

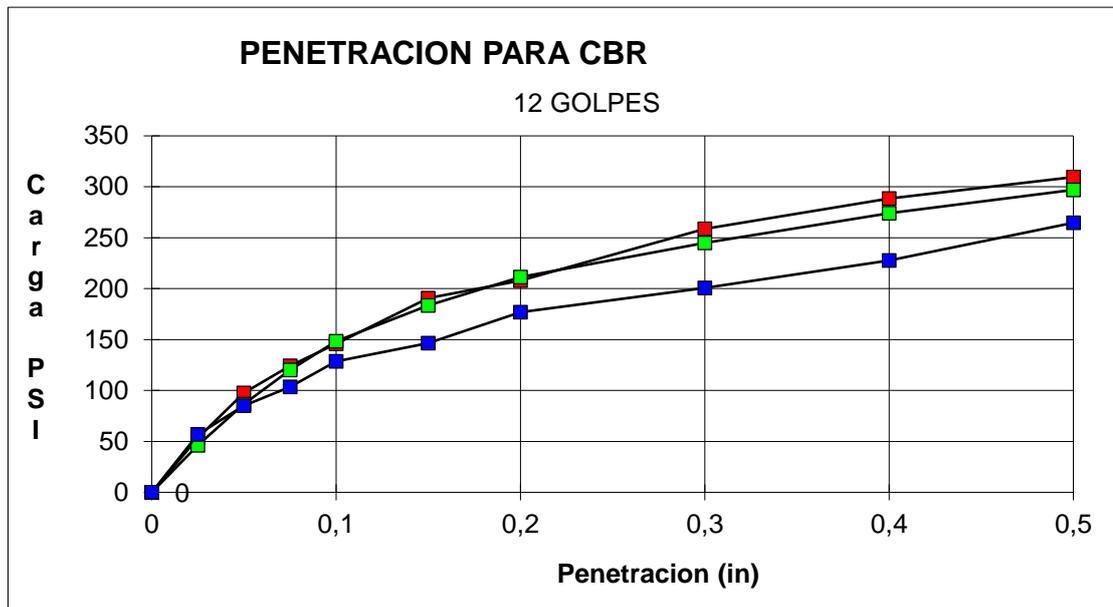
Densidad Maxima =	99,3	102,2	100,6
Maximo CBR=	4,2	4,7	4,8

Fuente: Autores, 2018.

Se graficó la carga en PSI vs la penetración, mostrando cada línea un molde en la ilustración No. 31.



Ilustración 31. Grafica de Carga (PSI) vs Penetración (in)



Fuente: Autores.

Se calcularon los promedios de CBR, así también como los promedios de densidad seca máxima, y se tabularon en la tabla No 23.

Tabla 23. Promedios de CBR y Densidad máxima seca

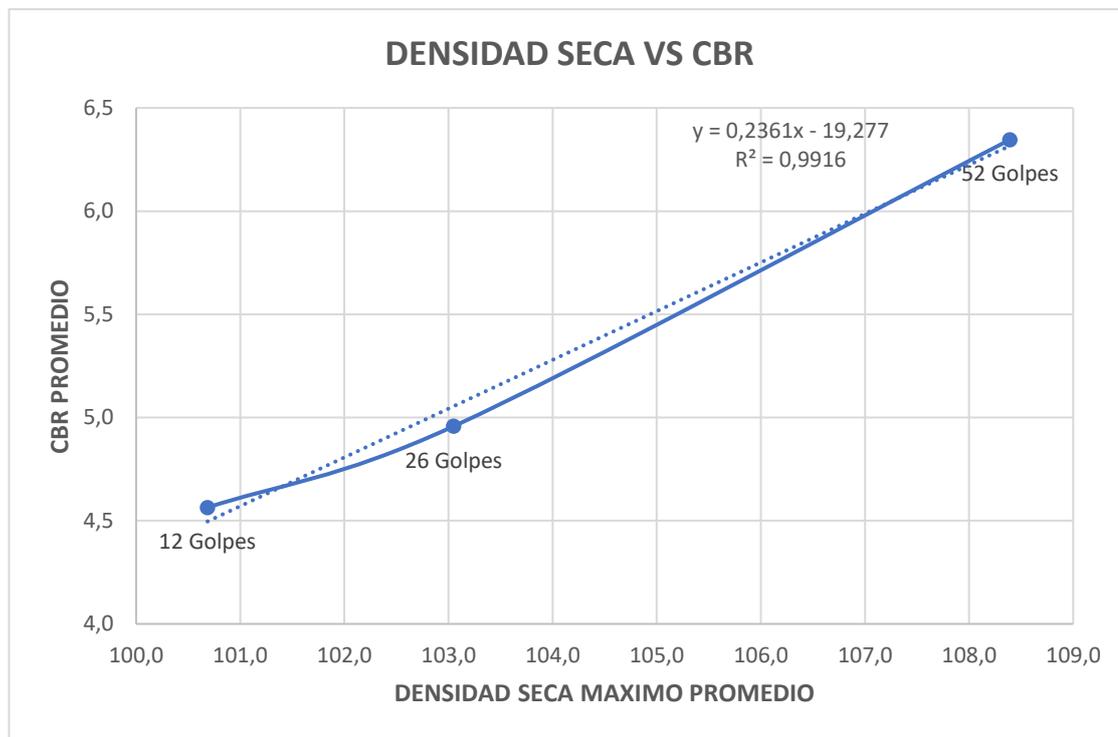
N° Golpes	Prom. Densidad seca	Prom. CBR
56	108,4	6,3
26	103,0	5,0
12	100,7	4,6

Fuente: Autores, 2018.

Con base a la tabla anterior se procedió a realizar la gráfica No 32 Densidad seca vs CBR



Ilustración 32. Densidad seca máxima vs CBR



Fuente: Autores, 2018.

Se puede observar que para una densidad seca máxima al 95% = 108.015 Lb/pie³ se obtiene un CBR de 6.22 del cual con la Tabla No 24 se obtiene un suelo de Calificación “mala” usada para Sub-rasante, este valor se encuentra por debajo de los estándares de debido al gran contenido de material arcilloso de baja plasticidad presentado en el suelo típico de Membrillar y por ende se aplicara la tecnología de suelo-cemento para aumentar el CBR.

Tabla 24. Clasificación y uso de suelo según el valor de CBR

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Sub-rasante
5 - 8	Mala	Sub-rasante
8 - 20	Regular – Buena	Sub-rasante
20 - 30	Excelente	Sub-rasante
30 - 60	Buena	Sub-base
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Fuente: (INVIAS, 2013).



5.5 Cálculo de la cantidad de óptima de agua para la mezcla de suelo-cemento

Cuando se agrega agua al suelo para la compactación, ésta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de apariencia más densa. La densidad seca después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua. Más allá de un cierto contenido de agua, cualquier incremento en el contenido de agua tiende a reducir la densidad seca, debido a que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas. El contenido de agua bajo el cual se alcanza la densidad máxima seca se llama contenido de agua óptimo. Cabe recalcar que la normativa a seguir fue (INV E-142-07).

Primeramente, se procedió al cálculo de humedades, pesos y organización de moldes y muestras de suelo para una vez así obtener la densidad seca de la muestra. Los datos se encuentran en la tabla 25.

Tabla 25. Datos tabulados de pesos y cálculo de densidad.

No Golpes			
DENSIDAD	25		
Molde No	1	2	3
Peso Molde + Suelo Comp. (Gr)	3414	3548	3455
Peso Molde (Gr)	1796	1796	1796
Peso Suelo Comp. (Gr)	1618	1752	1659
Densidad Húmeda (Gr/Cms ³)	1.59	1.72	1.63
Densidad Seca (Gr/cm ³)	1.59	1.72	1.63
Densidad Seca (Lb/Pie ³)	99.3	107.5	101.8

Fuente: (Autores, 2018).

Se calculó la humedad de compactación con los diferentes moldes y sus muestras de suelo compactado usando la ecuación 1.



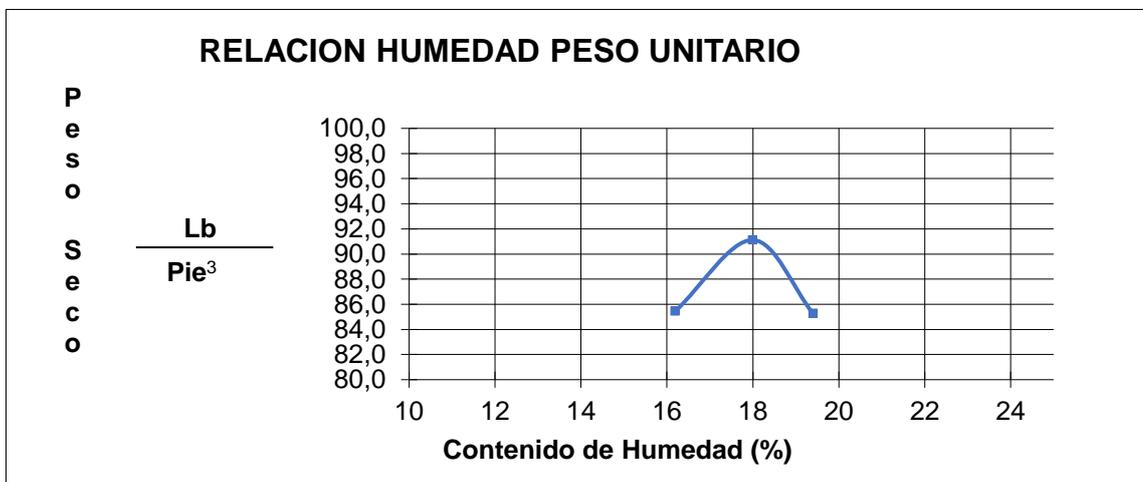
Tabla 26. Porcentaje contenido de humedad de compactación.

CONTENIDO DE HUMEDAD			
Molde No	1	2	3
Peso Recip + suelo Húmedo (Gr)	160.00	160.00	160.00
Peso Recip + Suelo seco (Gr)	137.70	135.60	134.00
Peso Recipiente	0.00	0.00	0.00
Contenido de Humedad (%)	16.19	17.99	19.40

Fuente: (Autores, 2018).

Ya una vez obtenidos los datos anteriores se realiza la gráfica de la curva contenido de humedad (%) vs. Densidad seca máxima (Lb/pie³).

Ilustración 33. Contenido de humedad (%) VS Densidad seca o Peso seco (Lb/pie³).



Fuente: (Autores, 2018).



Tabla 27. Porcentaje contenido de humedad óptima y densidad máxima.

Molde	Humedad Optima	Densidad Máxima Lb/Pie ³	Densidad Máxima Gr/Cm ³
1	16.2%	85.5	1.37
2	18%	91.1	1.46
3	19.4%	85.3	1.37

Fuente: (Autores, 2018).

Una vez conocida la humedad de compactación a la que debe llevarse la mezcla de suelo-cemento para obtener la máxima densidad seca, se puede obtener la cantidad de agua necesaria para que se obtenga la mezcla de suelo-cemento óptima.

5.6 Determinación de la resistencia a la compresión de cilindros de suelo-cemento

En esta etapa se procede a determinar la resistencia a la compresión del suelo-cemento con especímenes moldeados dentro del laboratorio, siguiendo con los lineamientos que establecen la norma de preparación y manipulación de los especímenes. Utilizando cilindros de ensayo de 101.6mm (4") de diámetro y 203.2mm (8") de largo, y el material arcilloso a emplear paso por su totalidad por el tamiz No 4.

En primera instancia se realizaron 9 moldes, que correspondían al 12% de cemento en este procedimiento se utilizó cemento tipo I y se procedió a ensayar los 3 primeros especímenes a los 7 días, luego 3 especímenes a los 14 días y por último a los 28 días, para los moldes de suelo cemento correspondientes a los porcentajes de 10% y 14% se utilizó cemento tipo III, y se calculó su resistencia máxima a los 7 días con la maquina universal como se muestra en la ilustración No 34.



Ilustración 34. Prueba de compresión de cilindros con maquina universal.



Fuente: Autores, 2018

Todos estos datos de la maquina universal son arrojados a un monitor equipado con un software para análisis de pruebas de compresión, en ese orden de ideas se tabularon los datos suministrados por la maquina universal, y tabulados en las siguientes tablas.

Tabla 28. Resistencia de los cilindros de suelo cemento estabilizado al 10%

ENSAYO DE RESISTENCIA DE LOS CILINDROS										
	Moldes	Diametro (in)	Largo (in)	Area Transv. (in ²)	Area Transv. (cm ²)	Carga de falla (kn)	Carga de falla (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia (psi)	Resistencia prom (psi)
RESISTENCIA MAXIMA	1	4	8	12.57	81.07	2.50	254.93	3.14	44.92	45.52
	2	4	8	12.57	81.07	2.60	265.12	3.27	46.72	
	3	4	8	12.57	81.07	2.50	254.93	3.14	44.92	

Fuente: Autores, 2018



Tabla 29. Resistencia de los cilindros de suelo cemento estabilizado al 12%

ENSAYO DE RESISTENCIA DE LOS CILINDROS										
	Moldes	Diametro (in)	Largo (in)	Area Transv. (in ²)	Area Transv. (cm ²)	Carga de falla (kn)	Carga de falla (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia (psi)	Resistencia prom (psi)
7 DIAS	1	4	8	12.57	81.07	3.00	305.91	3.77	53.90	57.50
	2	4	8	12.57	81.07	3.30	336.50	4.15	59.29	
	3	4	8	12.57	81.07	3.30	336.50	4.15	59.29	
14 DIAS	4	4	8	12.57	81.07	3.30	336.50	4.15	59.29	58.10
	5	4	8	12.57	81.07	3.10	316.11	3.90	55.70	
	6	4	8	12.57	81.07	3.30	336.50	4.15	59.29	
28 DIAS	7	4	8	12.57	81.07	4.20	428.27	5.28	75.47	74.87
	8	4	8	12.57	81.07	4.10	418.08	5.16	73.67	
	9	4	8	12.57	81.07	4.20	428.27	5.28	75.47	

Fuente: Autores, 2018

Tabla 30. Resistencia de los cilindros de suelo cemento estabilizado al 14%

ENSAYO DE RESISTENCIA DE LOS CILINDROS										
	Moldes	Diametro (in)	Largo (in)	Area Transv. (in ²)	Area Transv. (cm ²)	Carga de falla (kn)	Carga de falla (kg)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia (psi)	Resistencia prom (psi)
RESISTENCIA MAXIMA	1	4	8	12.57	81.07	5.00	509.85	6.29	89.84	89.84
	2	4	8	12.57	81.07	5.10	520.05	6.41	91.64	
	3	4	8	12.57	81.07	4.90	499.65	6.16	88.04	

Fuente: Autores, 2018

Para el cálculo del área transversal, se utilizó la fórmula de $A_t = \pi * \frac{D^2}{4}$, seguido a esto se convierte la carga de falla de KN a Kg multiplicándolo por un factor de 101.97, en ese orden de ideas se calculó la resistencia en kg/cm^2 y en psi, para esto se dividió la Carga de falla entre el área transversal y así obtener la resistencia, al final se promediaron los 3 especímenes correspondientes a cada día de realizado la prueba, el cual se obtiene que la máxima resistencia al 10% es de 45.52PSI, para el 12% es de 74.87 PSI y al 14% es de 89.84 PSI.

5.7 Correlación CBR suelo-cemento en base a la resistencia a la compresión inconfiada

Una vez realizado y obtenido los valores de las resistencias máximas de cada uno de los tres porcentajes de cemento utilizados para estabilizar el suelo, se promedia obteniendo



así unas resistencias de $3.19 \frac{kg}{cm^2}$, $5.24 \frac{kg}{cm^2}$ y $6.29 \frac{kg}{cm^2}$ para 10%, 12% y 14% respectivamente. Basado en la ecuación 9, se hace la correlación existente entre la compresión inconfiada y el valor de capacidad de soporte de California. Se debe tener en cuenta al momento de utilizar el modelo, las unidades que se establecen en la ecuación antes mencionada.

Para la resistencia obtenida con el 10% de cemento

$$CBR(\%) = \log^{-1} \left(-0.027 + 0.287 * \text{compresion incofinada} \frac{kg}{cm^2} \right)$$

$$CBR(\%) = \log^{-1} \left(-0.027 + 0.287 * 3.19 \frac{kg}{cm^2} \right)$$

$$CBR(\%) = 7.717 \approx 7.72$$

Para la resistencia obtenida con el 12% de cemento

$$CBR(\%) = \log^{-1} \left(-0.027 + 0.287 * \text{compresion incofinada} \frac{kg}{cm^2} \right)$$

$$CBR(\%) = \log^{-1} \left(-0.027 + 0.287 * 5.24 \frac{kg}{cm^2} \right)$$

$$CBR(\%) = 29.996 \approx 30.00$$

Para la resistencia obtenida con el 14% de cemento

$$CBR(\%) = \log^{-1} \left(-0.027 + 0.287 * \text{compresion incofinada} \frac{kg}{cm^2} \right)$$

$$CBR(\%) = \log^{-1} \left(-0.027 + 0.287 * 6.29 \frac{kg}{cm^2} \right)$$

$$CBR(\%) = 59.96$$

El CBR obtenido para el suelo ya estabilizado con el 10% de cemento es de 7.72%, con el 12% de cemento es de 30.00% y con el 14% de cemento es de 59.96% que de acuerdo con la tabla No. 24 respectivamente tiene un uso de subrasante y con un mal comportamiento, un uso de subrasante con un excelente comportamiento y por ultimo tiene un uso de subbase y además que tiene un buen comportamiento como dicha estructura de pavimento.



5.8 Calculo de desgaste de cilindros de suelo-cemento

Para la determinación de desgaste de un suelo-cemento es menester realizar ciclos de saturación y secado para luego ser sometidos al proceso de cepillado. Estos cálculos fueron nulos como resultados de la saturación, el molde de suelo-cemento no resistió este proceso y se desmorono completamente, esto sucede debido a la gran cantidad de suelo y poca cantidad de cemento, en ese orden de ideas es recomendable colocar una capa de material granular de 15 cm debidamente compactado y añadir sobre esta un tratamiento superficial el cual consiste en la aplicación de un riego de material bituminoso sobre la base granular, seguido por la extensión y compactación de una capa de agregado pétreo.

5.9 Análisis de precios unitarios y económicos de estructuras de pavimentos

Con el fin de poder comparar económicamente el costo de ambas alternativas de intervención se efectuó un análisis de precio por m³ de cada estructura, utilizando los precios de referencia del (Instituto Nacional de Vías, 2017), a su vez también los precios de (DataCauca, 2016). Para el análisis solo se consideraron que las estructuras estén en igualdad de condiciones de carga, debido a que estarán con flujos de tránsito bajo, siendo objetos de comparación de vías rurales, así también como se excluyeron los precios de AIU y materiales para subrasante, subbases, bases. Cabe recalcar que en el análisis de precio unitario de una capa de rodadura es menester agregar un tratamiento superficial simple para evitar los desgastes, como se muestra a continuación:



Tabla 31. APU Capa de rodadura Suelo-Cemento

 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL PRESUPUESTO DE INGENIERIA CIVIL ANALISIS DE PRECIO UNITARIO						
ITEM No.:	1	UNIDAD ITEM:	M3	HOJA No.:	1	
CAPTULO No.:			1,00	FECHA:	31/05/2018	
DESCRIPCION ITEM:						
CAPA DE RODADURA CON SUELO-CEMENTO						
EQUIPO Y HERRAMIENTAS		UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	RENDIMIENTO	VALOR PARCIAL
DESCRIPCION						
HERRAMIENTA MENOR		GLOBAL	1,00	350,00	1,00	350,00
VIBRO COMPACTADOR 10 TON		DÍA	1,00	123.200,00	8,00	15.400,00
MOTONIVELADORA VOLVO 18 TON		DÍA	1,00	195.000,00	8,00	24.375,00
CAMION CISTERNA 2000 GL		DIA	1,00	45.000,00	8,00	5.625,00
RECICLADORA DE PAVIMENTO RM300		DIA	1,00	250.000,00	8,00	31.250,00
SUBTOTAL HERRAMIENTA Y EQUIPOS						77.000,00
MATERIALES		UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO		VALOR PARCIAL
CEMENTO		KG	214,00	380,00		81.320,00
AGUA		LT	120,00	15,00		1.800,00
MATERIAL DE BASE GRANULAR DE GRADACION 3		M3	1,30	57.268,00		74.448,40
SUB-TOTAL MATERIALES						157.568,40
MANO DE OBRA (incluye prestaciones sociales)		UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	RENDIMIENTO	VALOR PARCIAL
CUADRILLA PARA VIBROCOMPACTADOR		DÍA	1,00	75.090,00	8,00	9.386,25
CUADRILLA CAMION CISTERNA		DIA	1,00	75.090,00	8,00	9.386,25
CUADRILLA PARA MOTONIVELADOR 10 TON		DÍA	1,00	121.644,00	8,00	15.205,50
CUADRILLA RECICLADORA DE PAVIMENTO		DIA	1,00	121.644,00	8,00	15.205,50
SUB-TOTAL MANO DE OBRA						49.183,50
OBSERVACIONES :						
COSTO DIRECTO TOTAL (ajustado al peso)						283.751,90

Fuente: Autores, 2018

En este análisis de precio unitario se utiliza 4 maquinarias, las cuales son usadas por un oficial en compañía de un ayudante cada una, y con un factor de prestación de 55.18% para un total de \$ 283.751.90 adicional a este APU se agregó un tratamiento superficial simple con emulsión CRR-2 en donde está contemplado en la tabla No 30 para un total de construcción de cada de rodadura con suelo-cemento con tratamiento superficial simple con emulsión CRR-2 de \$ 287.663,7 por m³.



Tabla 32. APU de tratamiento superficial simple con emulsión CRR-2

 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL PRESUPUESTO DE INGENIERIA CIVIL ANALISIS DE PRECIO UNITARIO					
ITEM No. :	2	UNIDAD ITEM:	M2	HOJA No.:	2
CAPITULO No. :			1,00	FECHA:	31/05/2018
DESCRIPCION ITEM:					
TRATAMIENTO SUPERFICIAL SIMPLE CON EMULSION CRR-2 GRADACION 13					
EQUIPO Y HERRAMIENTAS	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	RENDIMIENTO	VALOR PARCIAL
DESCRIPCION					
COMPRESOR DE BARRIDO Y SOPLADO	HORA	1,00	61.000,00	400,00	152,50
CARROTAQUE IRRIGADOR DE ASFALTO DE 1000 GL	HORA	1,00	102.000,00	400,00	255,00
COMPACTADOR NEUMATICO DE POTENCIA 70 HP, PESO 13TON	HORA	1,00	123.000,00	400,00	307,50
ESPARCIDOR DE GRAVILLA, ANCHO DE ESPARCIMIENTO 3100MM, VELOCIDAD DE TRABAJO 10 - 20 KWH	HORA	1,00	52.393,89	400,00	130,98
HERRAMIENTO MENOR	GLOBAL	1,00	4,08	1,00	4,08
SUBTOTAL HERRAMIENTA Y EQUIPOS					407,50
MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR UNITARIO		VALOR PARCIAL
EMULSION CRR - 2	LT	1,50	1.757,37		2.636,06
AGREGADO PARA TRATAMIENTO SUPERF. SIMPLE	M3	0,01	56.677,73		736,81
SUB-TOTAL MATERIALES					3.372,87
MANO DE OBRA (incluye prestaciones sociales)	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	RENDIMIENTO	VALOR PARCIAL
CUADRILLA 1X4	DÍA	1,00	262.815,00	2.000,00	131,41
SUB-TOTAL MANO DE OBRA					131,41
OBSERVACIONES :					
COSTO DIRECTO TOTAL (ajustado al peso)					3.911,80

Fuente: Autores, 2018.

En ese orden de ideas se elabora el análisis de precio unitario para un pavimento flexible, es menester aclarar que solo se utilizaron los precios para una capa de rodadura, exceptuando la construcción de subrasante, subbase y base. Por consiguiente, se realiza el análisis y se muestra a continuación en la tabla No 33.



Tabla 33. Análisis de Precio Unitario Pavimento Flexible

 UNIVERSIDAD DE CARTAGENA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL PRESUPUESTO DE INGENIERIA CIVIL ANALISIS DE PRECIO UNITARIO					
ITEM No.:	1	UNIDAD ITEM:	M3	HOJA No.:	3
CAPTULO No.:			1,00	FECHA:	31/05/2018
DESCRIPCION ITEM:					
PAVIMENTO FLEXIBLE					
EQUIPO , HERRAMIENTAS Y MATERIALES	UNIDAD	CANTIDAD		VALOR UNITARIO	VALOR PARCIAL
DESCRIPCION					
HERRAMIENTA MENOR	GLOBAL	1,00		350,00	350,00
FRESADO DE PAVIMENTO ASFALTICO HASTA 0.3 M DE PROF (INCLUYE CARGUE, TRANSPORTE Y DISPOSICION FINAL)	M3	1,00		30.742,00	30.742,00
RIEGO DE LIGA CON EMULSION ASFALTICO CRR-1 (INCLUYE SUMINISTRO, BARRIDO DE SUPERFICIE Y RIEGO)	M2	1,00		1.262,00	1.262,00
IMPRIMACION CON EMULSION ASFALTICA CRL-1 (INCLUYE SUMINISTRO, BARRIDO DE SUPERFICIE Y RIEGO)	M2	1,00		6.665,80	6.665,80
MEZCLA ASFALTICA DENSA EN CALIENTE TIPO MDC-2 INCLUYE SUMINISTRO, TRANSPORTE, COLOCACION Y COMPACTACION	M3	1,00		238.177,00	238.177,00
MEZCLA ASFALTICA DE ALTO MODULO (MAM), INCLUYE SUMINISTRO, TRANSPORTE, COLOCACION Y COMPACTACION	M3	1,00		238.177,00	238.177,00
GEOTEXTIL REPAV 450 O SIMILAR PARA PAVIMENTACION (INCLUYE SUMINISTRO E INSTACION)	M2	1,00		12.327,00	12.327,00
SUBTOTAL HERRAMIENTA Y EQUIPOS					527.700,80
MANO DE OBRA (incluye prestaciones sociales)	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	RENDIMIENTO	VALOR PARCIAL
CUADRILLA PARA FRESADORA	DÍA	1,00	75.090,00	8,00	9.386,25
CUADRILLA CAMION PARA RIEGO DE LIGA	DIA	1,00	75.090,00	8,00	9.386,25
CUADRILLA CAMION PARA IMPRIMACION ASFALTICA	DÍA	1,00	75.090,00	8,00	9.386,25
CUADRILLA CAMION MEZCLA ASFALTICA	DIA	1,00	121.644,00	8,00	15.205,50
SUB-TOTAL MANO DE OBRA					43.364,25
OBSERVACIONES :					
COSTO DIRECTO TOTAL (ajustado al peso)				571.065,10	

Fuente: Autores, 2018.

Se puede observar que la construcción de una capa de rodadura para pavimento flexible es de \$ 566.618,20 por m3 superando más del doble del costo de la construcción de una capa de rodadura utilizando suelo-cemento.



6. CONCLUSIONES

Luego de desarrollar la práctica concerniente al análisis y clasificación de suelo se puede afirmar que el suelo extraído de la perforación anteriormente realizada en Membrillal Bolívar presenta un límite líquido de 33.19%, un límite plástico de 18% y un índice de plasticidad de 15.19%. Por otra parte, de la figura No 27, se tiene que la humedad es inversamente proporcional al número de golpes, es decir, a mayor contenido de agua en la muestra de suelo menor es el número de golpes necesarios para unir las dos mitades, cumpliendo con la relación presentada por el experimento de Casagrande, para la determinación del límite líquido.

El suelo estudiado en el anterior proyecto de grado se clasifica según la ASSHTO como un suelo tipo A-6 y según la SUCS es un tipo de suelo CL que significa que es una arcilla de baja plasticidad, por ende se utilizó como referencia la clasificación según la ASSHTO justo la indicada para mejorar sus propiedades aplicándole cemento y utilizarla como capa.

En el ensayo de compactación se obtienen de acuerdo con el número de golpes las diferentes densidades secas máximas y además las humedades óptimas para llegar a dicha densidad. Para obtener una densidad seca máxima de 111.1 Lb/Pie³ se debe llevar a una humedad de 15.4% y aplicándole una energía determinada a través de 56 golpes, para 26 golpes se obtiene una densidad seca máxima de 105.9 Lb/Pie³ a una humedad de 18.3% y, por último, para una humedad de 19.2% y 12 golpes se obtiene una densidad seca máxima de 102.2 Lb/Pie³. De acuerdo con la figura 28 se observa que la relación de vacíos va disminuyendo hasta encontrar el punto óptimo y proporcionalmente con la porosidad, dándose de esta manera las relaciones esperadas para el ensayo de Proctor modificado. La finalidad de esta prueba es de suma importancia debido a que se si en el campo se reproducen las condiciones en las que se realiza la práctica en el laboratorio se pueden obtener resultados satisfactorios.

Respecto a la expansividad se puede concluir que se encuentra en un rango no tan elevado y esperado, debido a que ya se conocía el índice de plasticidad del suelo. Los valores porcentuales obtenidos en la expansividad no superan ni siquiera el 10%, pero aun así



nuestro índice de plasticidad se encuentra en el rango de grado de expansión medio, por lo tanto el suelo se encuentra en un rango de media-baja expansividad (Braja Das, 2002), afirmando aún más que es un suelo apto para la estabilización con cemento ya que no es un suelo totalmente malo y que con ayuda de dicho estabilizante se mejoraría las propiedades mecánicas del suelo.

Es evidente que la compactación en el diseño de una estructura de pavimento asegura su vida útil y su correcto funcionamiento; los resultados obtenidos en el ensayo de CBR se observa claramente que la muestra que fue compactada con el mayor número de golpes es el que mejor resultado arroja, debido a que se redujo la relación de vacíos que existe en la muestra y a eso se le suma que la densidad seca máxima es la mejor en comparación con las otras muestras compactadas con 26 y 12 golpes y eso conlleva a que el suelo se comporte de una manera más homogénea y resistente, en otras palabras la densidad seca es directamente proporcional a la relación del soporte de California, a medida que la densidad seca es mayor, mejor CBR obtendrá la muestra de suelo. Para una densidad seca máxima de 108.4 Lb/Pie^3 el CBR es de 6.3 lo que de acuerdo con el manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito se califica como un suelo malo y su uso como capa sub-rasante en una estructura de pavimento, por ende, se procede al cálculo del CBR utilizando con suelo-cemento.

Conocer el contenido de humedad es de suma importancia ya que es de gran utilidad a la hora de buscar soluciones para mejorar las propiedades resistentes del suelo o la mezcla de suelo-cemento en este caso. En cuanto a los resultados obtenidos para la cantidad óptima de agua que necesitó la mezcla de suelo-cemento, podemos decir que la mezcla alcanza su máxima compactación con un contenido de humedad de 18% y una densidad seca máxima de 91.1 Lb/Pie^3 indicando así que la mezcla de suelo-cemento necesita una humedad de 18% para que se comporte de la manera más resistente.

En cuanto a la resistencia y durabilidad que tendrá la mezcla de suelo-cemento estudiada anteriormente se afirma que, en cuanto a la capacidad de soporte, el 14% de cemento para este tipo de suelo fue bueno debido a que aumentó significativamente el CBR que pasó a ser de 59.96%, que para el manual de pavimentos descrito por INVIAS se utilizaría como subbase en una estructura de pavimento, es decir, la mezcla de suelo-cemento no es óptima como capa de rodadura. En ese orden de ideas, se concluye que la mezcla es



Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias



completamente vulnerable a las cargas producidas por el tránsito y para mejorar su resistencia se le debe adicionar una capa de base granular como mínimo de 15cm, además, no presenta un correcto comportamiento a la acción directa del agua, por lo que requiere adicionar un tratamiento superficial simple con emulsión asfáltica CRR- 2 de gradación 13, en donde nos permite elevar su durabilidad y evitar su desgaste.

Se infiere con el proyecto presente, que los ensayos de desgaste no son muy prácticos para cilindros de suelo-cemento, con el tipo de suelo estudiado, debido a que se presentaron inconvenientes como el desmoronamiento de los cilindros al ser sometidos por el proceso de saturación.

De acuerdo con las ideas planteadas anteriormente, se concluye que la estabilización del suelo arcilloso típico de Membrillal con la tecnología de suelo-cemento no puede ser usado como capa de rodadura de forma directa, debido a que no cumple las especificaciones establecidas por el INVIAS, sin embargo, no deja de ser una alternativa completamente realizable si se usa como cualquier otro elemento de la estructura del pavimento.

Por último, se observó que la construcción de una capa de rodadura utilizando suelo-cemento es muy factible económicamente, debido a que sus costos son demasiados bajos con un precio de \$ 287.663,70 por m³, respecto a un costo de pavimento flexible de \$ 571.065,10 por m³. Esta alternativa planteada de suelo-cemento es viable en todos sus aspectos económicos, siendo una opción viable para las comunidades rurales en donde sus recursos son limitados.



7. RECOMENDACIONES

Luego de lograr los objetivos, obtener los resultados y conclusiones establecidas en el presente trabajo de grado, se realizan las siguientes recomendaciones con el fin de ampliar la información para futuras investigaciones relacionadas con la implementación de la tecnología suelo-cemento en las vías de tercer orden como capa de rodadura en suelos similares al estudiado:

- Recopilación de información de campo actualizada y organizada, referente a las condiciones geotécnicas, hidrodinámicas e hidrológicas de la zona a estudiar, esto con el fin de lograr y acaparar muchas más variables que inciden en la obtención de resultados con una mayor precisión.
- A causa de la poca información existente concerniente a la aplicación de productos para mejorar el comportamiento de la mezcla de suelo-cemento, se recomienda hacer uso de aditivos encontrados en el mercado con el fin de verificar y/o corroborar si existen o puedan llegar a existir productos que ayuden a optimizar y complementar el análisis del presente trabajo. Gracias a los resultados de este trabajo de grado, las próximas investigaciones podrán validar sus resultados y manejar valores más exactos para encontrar la mejor resistencia de la mezcla de suelo-cemento.
- Teniendo en cuenta las características del suelo y la cantidad de cemento a utilizar para la estabilización de este mismo, se recomienda ampliar la información haciendo un análisis detallado, actualizado y completo de las proporciones de los elementos a mezclar, tales como: agua, suelo, cemento.
- Es menester aclarar que no es recomendable usar de forma directa la capa de arcilla con suelo-cemento, debido a que no garantiza una durabilidad óptima basándonos en las pruebas de laboratorios realizadas en el proyecto, razón por la cual se recomienda colocar una capa granular de 15 cm como mínimo y adicionar sobre esta un tratamiento superficial simple con emulsión CRR 2, el cual mejora y garantiza la durabilidad y el desgaste del suelo.
- En el proceso de mezclado de suelo-cemento que se utilizó, no resultó ser el más factible debido a la complejidad que tiene la mezcla en su manejabilidad cuando



no se cuenta con la información y experiencia necesaria en la temática dicha con anterioridad. Por esta razón, se recomienda el mezclado en menores cantidades así se es más eficiente y resulta una menor pérdida de la proporción de agua en la mezcla lo que conlleva a obtener resultados mucho más reales en cuanto a la resistencia a la compresión de los cilindros de suelo-cemento.

- Se recomienda seguir las consideraciones, especificaciones, condiciones y requerimientos descritos por las normas vigentes en el país que regulan la estabilización de suelos para evitar datos irreales y dispersos a los de la presente investigación y además el buen uso de los equipos para realizar los ensayos respectivos, ya sea con ayuda de un experto o con la utilización de los conocimientos adquiridos en la carrera.
- Se recomienda proyectar el uso de la alternativa de suelo-cemento en vías de tercer orden de todo el país por su fácil proceso constructivo, da la posibilidad de estabilizar los materiales de la zona, disminuyendo costos e impactos ambientales por menor demanda de equipos, materiales, transporte y disminuye el costo en las soluciones de rodadura gracias a que el suelo de soporte ya está mejorado.
- Una de las recomendaciones principales para próximos estudios en la temática abarcada, es la realización del ensayo de CBR en el suelo ya estabilizado con cemento para tener una mayor confiabilidad a la hora de establecer el uso que tiene en la estructura del pavimento.
- Al momento de escoger la cantidad porcentual de cemento para la estabilización, se recomienda hacer varias mezclas con cantidades diferentes de cemento para ver la variabilidad estructural y económicamente de dicha estabilización, y así obtener una mayor amplitud de datos al momento de la escogencia de la cantidad porcentual de cemento.
- Para obtener un análisis completo del estudio comparativo de costos realizado en el presente trabajo, deberá tomarse en cuenta, además de los costos de ejecución, los costos de mantenimiento, para ambos pavimentos.
- Hablar de qué tan económico resulta un pavimento respecto al otro, es muy relativo, debido a que, si se toma en cuenta el costo total, el cual incluye la inversión inicial más el costo de mantenimiento, no se obtendrá una alternativa definitiva. Por lo tanto, dependerá de las autoridades respectivas tomar la decisión



Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos de baja plasticidad mediante el uso del cemento para capa de rodadura en vías terciarias



acerca de qué tipo de pavimento emplear en un proyecto determinado, contando con los fondos y financiamiento necesarios.

- En el momento de analizar la confiabilidad y representatividad de los resultados encontrados, se debe tener en cuenta que la investigación es una prueba piloto y que sus resultados antes de utilizarlos necesitan de un mayor estudio que confirmen los resultados encontrados en esta investigación.



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

(s.f.).

Alcantara, M. A., Nunes, S. C., Rio, J. F., & de Lima, D. C. (2017). *Rheology and mechanical aspects of a self-compacting soil-cement in the fresh state*. Rio de Janeiro.

Arenas, H. (2000). *Conferencia Teoría De Los Pavimentos*. Universidad del Cauca.

Arría, P., & Aiassa, G. (2007). *Diseño de mezclas de suelo compactado para la construcción de terraplenes*. Recuperado el 03 de Septiembre de 2017, de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372007000100005

Badillo, J. (2005). *Mecánica de suelos*. Mexico : Limusa .

Bañon, L., & Beviá, J. (2000). *Manual De Carreteras 2, Construcción y Mantenimiento*. Alicante: Ortiz e Hijos.

Blanco, J. M. (2017). *Ensayo a compresión de cilindros de concreto*. Cartagena. Recuperado el 02 de Junio de 2018, de <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/ensayo-compresin-de-cilindros-de.html>

Bowles, J. (1980). *Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil*. Ciudad de Mexico: McGraw Hill.

Braja Das, M. (2002). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* . Sacramento: International Thomson.

Casagrande, A. (1948). *Classification and Identification of Soils*.

Cepeda Dovala, J. M. (1991). *Química de suelos*. Mexico: Trillas.

Coronado, J. (2002). *Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos*. Secretaria de Integración Económica Centroamericana.

Corral, J. T. (2008). El suelo-cemento como material de construcción. *Ciencia y Sociedad*, XXXIII(), 520-571. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87012672003>



- Crespo Villalaz, C. (2004). *Mecánica de suelos y cimentaciones*. Mexico: Limusa.
- DataCauca. (2016). *Gobernacion del Cauca*. Obtenido de <http://www.datacauca.gov.co/apu/query/207/6>
- de Pablo, L. (1964). Las arcillas, clasificación, identificación, usos y especificaciones industriales. En L. de Pablo. Mexico.
- Dolan, R., Hayden, P., & Felder, W. (1977). Systematic variations in inshore bathymetry. *The journal of Geology*, 85(2).
- Duque Escobar, G. (2016). Origen formación y constitución del suelo, fisicoquímica de las arcillas. En G. Duque Escobar, *GEOMECÁNICA PARA INGENIEROS*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Eduardo, L. (2014). *Suelo-Cemento sus usos, propiedades y aplicaciones*. Mexico: M. en A. Soledad Moliné Venanzi.
- Gomez, C. (2011). Suelo cemento el camino mas firme.
- Halsted, G. E. (2006). Guide to cement-treated base (CTB). *Portland Cement Association*, 6-23. Recuperado el 8 de Septiembre de 2017, de <http://secement.org/wp-content/uploads/2017/04/EB236.pdf>
- Instituto del Cemento Portland Argentino. (2015). Construcción de bases y subbases de suelo cemento. *ICPA*. Recuperado el 05 de Septiembre de 2017, de <http://www.icpa.org.ar/publico/files/articulos-tecnicos/2015-07-Construccion-Suelo-Cemento.pdf>
- Instituto Nacional de Vías. (2017). APUS Bolivar 2017-1. Obtenido de <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/analisis-precios-unitarios/6083-apus-bolivar-2017-1>
- INV E-122-07. (s.f.). *Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) del suelo*.
- INV E-123-07. (s.f.). *Análisis granulométrico de suelos por tamizado*.
- INV E-125-07. (s.f.). *Determinación del límite líquido de los suelos*.



- INV E-125-07, 0. (s.f.). *Determinación del límite líquido de los suelos.*
- INV E-126-07. (s.f.). *Límite plástico e índice de plasticidad de suelos.*
- INV E-142-07. (s.f.). *Relaciones de humedad – masa unitaria seca en los suelos (ensayo normal de compactación).*
- INV E-148-07. (s.f.). *Relación de soporte de California del suelo en el laboratorio.*
- INV E-611-13. (s.f.). *Relaciones humedad-densidad de mezclas de suelo-cemento.*
- INV E-611-13. (s.f.). *Relaciones humedad-densidad de mezclas de suelo-cemento.*
- INV E-612-13. (s.f.). *Humedecimiento y secado de mezclas compactadas de suelo-cemento.*
- INV E-613-13. (s.f.). *Preparación y curado de probetas de suelo-cemento.*
- INV E-614-13. (s.f.). *Resistencia a la compresión en muestras de suelo-cemento.*
- INVIAS. (2013). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos para vías con bajos volúmenes de tránsito.*
- Mas, J. M., & Kirschbaum, C. F. (2010). Vivienda rural en suelo cemento: Investigación, transferencia y autoconstrucción. *Construcción con tierra*, 351-366. Recuperado el 10 de Septiembre de 2017, de https://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2011/2011_9788469481073_p351-366_mas.pdf
- Milani, A. P., & Barboza, C. S. (2016). *Contribution to the study of properties of the self-compacting soil-cement for construction of monolithic walls.* Porto Alegre.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de pavimentos para carreteras.* Bogotá D.C: Universidad Católica de Colombia.
- Neville, A., & Brooks, J. (1987). *Concrete Technology.* Edimburgo: Pearson Education Limited.
- Pennsylvania Transportation Institute. (1995). Cold in-place recycling on low-volume roads in Austria. *TRID.* Recuperado el 24 de Septiembre de 2017, de <https://trid.trb.org/view.aspx?id=426076>



- Pereira, A. M. (2017). Con suelo cemento, rionegro recupera 144 kilometros de vias rurales. *Blog 360° en concreto*. Recuperado el 07 de Septiembre de 2017, de <http://blog.360gradosenconcreto.com/suelo-cemento-rionegro-recupera-144-kilometros-vias-rurales/>
- Portlad Cement Association. (1971). *Soil-cement laboratory*. Estados Unidos .
- Quintanilla, C. (2006). Estado del Arte del suelo-cemento en estructuras de pavimento. *Revista del instituto salvadoreño del cemento y del concreto*, 5-19.
- Rivera, G. (2006). *Concreto simple*. Popayán.
- Rivera, W. (2013). *Correlación del valor de soporte de california (CBR) con la resistencia a la compresión inconfiada y la plasticidad del suelo*. Santiago de Cali.
- Rodríguez, A. R., & Castillo, H. d. (1977). La ingeniería de suelos en las vías terrestres, Volumen 2. En A. R. Rodríguez, & H. d. Castillo, *La ingeniería de suelos en las vías terrestres, Volumen 2* (págs. 505-528). Mexico : Limusa.
- Sagüés, P. (2008). *Rigidez a baja deformación en el Pampeano compactado*. Buenos Aires.
- Scullion, T. (2001). *Field Investigation: Pre-Cracking of Soil-Cement Bases to Reduce Reflection Cracking*. Texas, Collage Station. Recuperado el 24 de Septiembre de 2017, de http://www.cement.org/docs/default-source/th-paving-pdfs/soil_cement/scullion-field-investigation-pre-cracking-of-soil-cement-bases-to-reduce-reflection-cracking.pdf?sfvrsn=4
- Serigos, P. A. (2009). *Rigidez a baja deformación de mezclas de suelo de la formación pampeano y cemento portland*. Buenos Aires.
- SI. (2012). *Sistema Internacional de Medidas*. Republica Dominicana.
- Torrente, M., & Sagüés, L. (1974). *Estabilizacion de suelos: Suelo-cemento*. Editores tecnicos y asociados.
- United States Bureau of Reclamation. (1998).



Valdivia Cariat, J. A. (Octubre 2016). *Factibilidad de implementación del material suelo-cemento como material de construcción para viviendas de bajo costo en el Perú*. Lima.

Valparaiso, U. C. (19 de Abril de 2004). *Laboratorios mecanica de suelos*. Recuperado el 14 de marzo de 2015, de http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/limites.pdf

Valparaiso, U. C. (s.f.). *Escuela de ingenieria en construccion*. Valparaiso . Obtenido de http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/03_clases_catedra/clases_catedra_ms1/05_terzaghi_3.pdf